



ENGREF



THESE

présentée par

Olivier Barreteau

pour obtenir le grade de :

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences de l'eau

Sujet :

**Un Système Multi-Agent pour explorer la viabilité des
systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes
d'organisation**

Soutenue publiquement le 8 septembre 1998

**à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
Centre de Montpellier**

devant le jury suivant :

M. Jacques Ferber	Rapporteur
M. Alan Kirman	Rapporteur
M. Claude Millier	Directeur de Thèse
M. François Bousquet	Examineur
M. Vincent Dollé	Examineur
M. Paul Mathieu	Examineur
M. Rémi Pochat	Examineur
M. Sidi Mohammed Seck	Examineur



ENGREF

Dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal comme en de nombreux endroits, la viabilité des systèmes irrigués semble compromise. L'étude de cette viabilité nécessite la conception et la mise au point de démarches interdisciplinaires et prenant en compte l'existence de plusieurs niveaux d'organisation.

A la suite de travaux sur la gestion des ressources renouvelables, nous proposons une démarche en trois étapes : analyse des interactions en œuvre dans un système irrigué et de leur dynamique, modélisation sous la forme d'un système multi-agent des connaissances qui en découlent et simulations sur ce modèle. Ces trois étapes s'enchaînent, les résultats des simulations posant de nouvelles questions au terrain.

L'objectif de cette thèse est de tester la pertinence d'une telle démarche pour explorer les liens entre modes de coordination et viabilité des systèmes irrigués.

L'application de deux cycles de cette démarche sur des terrains de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal nous a amené à constituer un modèle basé sur la coordination entre les paysans pour l'accès à l'eau et au crédit et sur les processus d'apprentissage. Cette représentation met l'accent sur les réseaux sociaux, internes au système irrigué ou non. Les agents, qu'ils représentent des paysans ou des groupes, agissent et communiquent en fonction de règles qui leur sont propres et qu'ils peuvent faire évoluer. L'utilisateur du modèle fixe les conditions initiales qui constituent un scénario.

Ce modèle a donné lieu à un ensemble de simulations selon un plan d'expériences en deux étapes : des scénarios constitués aléatoirement pour appréhender le comportement du modèle, des scénarios spécifiques à des hypothèses particulières sur les modes de coordination ayant de l'importance pour la viabilité du système irrigué. Ceci nous permet de mettre en évidence la variabilité des résultats des simulations et un critère de partition des scénarios en classes de viabilité. Nous montrons ainsi que la viabilité d'un système irrigué semble liée à la cohérence entre règles collectives et comportements individuels.

Enfin, après avoir discuté de questions relatives à la validation, à la genericité et aux usages possibles de ce type de modèle, nous concluons sur la pertinence de cette démarche pour étudier un système irrigué comme un système complexe.



ENGREF

Mots clé : système irrigué, viabilité, système multi-agent, modélisation, coordination, organisation, processus de décision, Sénégal

PREMIERE PARTIE : LE CONTEXTE

1. ET LES SYSTÈMES IRRIGUÉS ARRIVÈRENT DANS LA VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL	14
1.1 UNE APPARITION DUE À DIVERSES CAUSES	14
1.1.1 la sécheresse des années 60-70 et les cultures de décrue	14
1.1.2 des barrages et des digues	17
1.1.3 des choix politiques.....	18
1.2 UNE APPARITION EN PLUSIEURS VAGUES	21
1.2.1 variété d'histoires et de structures.....	21
1.2.2 constance de la dépendance à l'extérieur	23
1.2.3 Une dépendance non spécifique à la vallée du Fleuve Sénégal.....	25
1.3 QUELLE VIABILITÉ POUR CES SYSTÈMES IRRIGUÉS ?	31
1.3.1 de la gestion de l'eau à la viabilité des systèmes irrigués.....	31
1.3.2 Quelques définitions.....	34
1.3.3 Cette problématique nécessite des méthodes spécifiques.....	37
2. ETAT DES CONNAISSANCES AUTOUR DE CETTE QUESTION.....	39
2.1 DES APPROCHES THÉMATIQUES POINTUES	39
2.1.1 pour la maîtrise et la distribution de la ressource en eau.....	39
2.1.2 pour l'allocation de plusieurs ressources.....	43
2.1.3 sur les relations sociales au sein des systèmes irrigués	49
2.1.4 ce qui constitue de multiples points de vues.....	53
2.2 QUELQUES APPROCHES INTERDISCIPLINAIRES	55
2.2.1 Couplage de modèles	55
2.2.2 Applications de la théorie des systèmes et autres approches intégrées	57
2.2.3 Apports pour la question de la viabilité.....	61
2.3 DU CÔTÉ DE LA GESTION DES RESSOURCES EN PROPRIÉTÉ COMMUNE ET DES SMA.....	64



ENGREF

2.3.1 La gestion des ressources en propriété commune : modes d'appropriation et processus de décision.....	64
2.3.2 Les SMA	68
2.3.3 Pourquoi cette approche ?.....	77

DEUXIÈME PARTIE : DU TERRAIN AUX SIMULATIONS

3. DU TERRAIN AU MODÈLE, UNE MODÉLISATION D'ACCOMPAGNEMENT DE LA

RECHERCHE 81

3.1 LE TERRAIN 82

3.1.1 Choix des sites et construction des thèmes d'enquêtes..... 82

3.1.2 mise en œuvre de l'approche présentée..... 88

3.1.3 un cadre de représentation des systèmes irrigués dans la moyenne vallée du Sénégal..... 91

3.2 LA MODÉLISATION..... 110

3.2.1 Hypothèses de construction du modèle..... 110

3.2.2 une deuxième représentation des systèmes irrigués dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal..... 116

3.2.3 Un système irrigué virtuel..... 133

3.3 VERS QUELLES SIMULATIONS 138

3.3.1 Des scénarios aléatoires 138

3.3.2 Un outil de recherche sur les systèmes irrigués..... 140

3.3.3 Plan d'expérience en résultant..... 141

4. QUELQUES EXPÉRIENCES DE SIMULATIONS 148

4.1 UNE VUE D'ENSEMBLE..... 148

4.1.1 Description "naturaliste" des observations simulées..... 148

4.1.2 Comparaison des variabilités 160

4.1.3 Quelles corrélations..... 165

4.2 COHÉRENCE AVEC LES VERSIONS ANTÉRIEURES DU MODÈLE 170

4.2.1 Un exemple d'étude "en tranche" du comportement du modèle..... 170

4.2.2 Description des scénarios initiaux..... 171

4.2.3 Effet des changements de valeurs des paramètres..... 173

4.3 DES QUESTIONS PARTICULIÈRES POSÉES AU MODÈLE : À PROPOS DES CHANGEMENTS DE RÈGLES 176

4.3.1 Autour de l'apprentissage individuel 176



ENGREF

<i>4.3.2 Autour de l'apprentissage collectif.....</i>	<i>177</i>
<i>4.3.3 Autour de l'évaluation individuelle.....</i>	<i>180</i>
<i>4.3.4 Autour de l'évaluation collective.....</i>	<i>181</i>

TROISIÈME PARTIE : DES SIMULATIONS AU TERRAIN ET RETOUR AU MODÈLE

5. DES SIMULATIONS À LA VIABILITÉ DES SYSTÈMES IRRIGUÉS.....	183
5.1 DISCUSSION DE L'EFFET DE QUELQUES PARAMÈTRES DES SCÉNARIOS.....	183
5.1.1 <i>Quelques paramètres semblent avoir de l'importance.....</i>	<i>183</i>
5.1.2 <i>D'autres paramètres semblent ne pas avoir d'importance.....</i>	<i>191</i>
5.1.3 <i>Effet local de quelques paramètres : des réseaux sociaux à l'apprentissage individuel et collectif.....</i>	<i>196</i>
5.2 LA VIABILITÉ DANS LE LIEN INDIVIDUEL / COLLECTIF.....	202
5.2.1 <i>Situation dans le débat individuel / collectif.....</i>	<i>202</i>
5.2.2 <i>Cohérence entre règles collectives et comportements individuels.....</i>	<i>206</i>
5.2.3 <i>Conséquences.....</i>	<i>213</i>
6. RETOUR SUR LA MÉTHODE UTILISÉE.....	217
6.1 AU SUJET DE LA MODÉLISATION.....	217
6.1.1 <i>Question de la validation de ce genre d'outil.....</i>	<i>217</i>
6.1.2 <i>Question de la généralité du modèle.....</i>	<i>221</i>
6.1.3 <i>Quels autres usages du modèle sont envisageables ?.....</i>	<i>223</i>
6.2 AU SUJET DE LA MÉTHODE UTILISÉE POUR L'ANALYSE DES OBSERVATIONS DE TERRAIN.....	227
6.2.1 <i>Implications de cette démarche.....</i>	<i>227</i>
6.2.2 <i>Conséquences de cette démarche.....</i>	<i>229</i>
6.2.3 <i>situation par rapport à d'autres démarches ?.....</i>	<i>230</i>

INTRODUCTION

"Les savoirs sont dans le ventre les uns des autres. Ils sont mêlés comme des chemins de vache". (Diawara, 1990)

Le Fuuta Tooro, aussi dénommé parfois moyenne vallée aval du Fleuve Sénégal, a été depuis le milieu des années 70 le lieu d'un développement rapide de l'irrigation. Cet aménagement correspond à la réalisation d'un vieux rêve d'aménagement de l'autorité coloniale. A la vue de ce grand fleuve parcourant des terres propices à la riziculture mais irrégulièrement approvisionnées en eau, l'importation des "techniques modernes" de maîtrise de l'eau était tentante. L'administration sénégalaise, une période de sécheresse, divers bailleurs de fonds et des Organisations Non Gouvernementales ont transformé ce rêve en réalité, à grand renfort de financements, de digues, de gasoil et de programmes de formation et d'encadrement. Température, ensoleillement, eau, sol : les éléments semblaient là pour transformer la région en un grenier à riz pour le pays.

Pourtant, les promesses de rendement initiales n'ont pas été tenues. Les taux de mise en culture des parcelles n'ont jamais atteint la double campagne sur toute la superficie comme il avait été programmé. Et aujourd'hui ils régressent : après quelques années où une double campagne a été mise en œuvre sur une partie des périmètres, il n'y a plus actuellement qu'une seule campagne par an, et bien souvent seulement sur une partie des périmètres. Les aménagements se sont également dégradés plus vite que prévu. Au niveau financier enfin, les fonds de roulement qui avaient parfois été alloués ont fondu et les crédits n'ont pas été complètement remboursés. Ainsi la merveille attendue ne s'est pas produite. De réhabilitations en applications de nouveaux modèles de conception, un retour vers la situation antérieure étant difficile, l'aménagement de la vallée s'est poursuivi, à la recherche de la solution...

Différents points de vue sur les systèmes irrigués

Tous ces problèmes observés concernent en fait la question de la viabilité des systèmes irrigués au Fuuta Tooro. Ils sont en résonance avec un ensemble de travaux relatifs à la gestion des systèmes irrigués, aussi bien théoriques que spécifiques à des terrains particuliers dans différentes régions du monde. Si tous ces travaux s'intéressent à la gestion

des systèmes irrigués, ils ne sont cependant pas toujours comparables : leur objet d'étude constitue parfois leur unique point commun.

Ces travaux se différencient tout d'abord par le point de vue disciplinaire porté sur le système irrigué. Cette distinction a certes tendance à s'estomper actuellement en particulier dans les travaux traitant de "gestion" de l'eau. Mais après la reconnaissance d'un caractère pluridisciplinaire de la gestion de l'eau, celle-ci est déclinée selon plusieurs angles d'approche dont un seul, correspondant à une question particulière, est traité. Ainsi, sans nier l'existence des autres, chacun s'attache à approfondir la connaissance dans une voie correspondant à son domaine de compétence et parle de gestion technique, de gestion sociale, de gestion économique ou encore de gestion financière. L'approfondissement de la connaissance porte *a priori* sur une discipline particulière pour déboucher sur des recommandations relatives à cette discipline.

Pourtant une des premières particularités de la problématique des systèmes irrigués est son caractère interdisciplinaire. Les interactions entre les différentes composantes étudiées sont nombreuses. Ainsi les recommandations éventuelles issues d'une discipline auront des conséquences pour le système irrigué ne pouvant être comprises qu'en ayant recours à d'autres disciplines.

Il s'agit là d'un premier niveau de complexité : les connaissances sur les systèmes irrigués sont partagées et gagnent à être rassemblées. A la suite de travaux dans des domaines voisins pour lesquels la question de la prise en compte de l'interdisciplinarité se pose également, environnement, halieutique ou agronomie, plusieurs méthodes ont été mises au point et testées pour prendre en compte cette caractéristique des systèmes irrigués. Ce travail se situe dans la suite de ces démarches. Il cherche également à tenir compte également d'une autre différenciation existant dans les points de vue portés sur les systèmes irrigués : les niveaux d'organisation à partir desquels ils sont abordés.

Les travaux sur la gestion des systèmes irrigués se distinguent également en fonction du niveau d'organisation à partir duquel ils abordent le système. Cette seconde différenciation ne se superpose pas à la précédente. A la suite du *Despotisme Oriental* (Wittfogel, 1957), elle correspond à un choix entre deux perspectives sur les possibilités de contrôle de l'évolution d'un système irrigué : gestion centralisée donnant les bons cadres pour garantir le bon fonctionnement du système d'une part, autonomie des individus dont les comportements construisent le fonctionnement du collectif d'autre part (Kremer et Lansing, 1995).

Il s'agit là d'un second niveau de complexité : non seulement les systèmes irrigués sont constitués de nombreux composants, mais ceux-ci se regroupent en différents niveaux d'organisation qui doivent être considérés. Chacune des deux perspectives présentées ci-dessus correspondent en fait à une tentative de réduction de ce facteur de complexité par un niveau d'organisation particulier, collectif ou individuel.

La première perspective considère que les aspects collectifs, normes de conception, normes d'usage, équipements partagés suffisent pour diriger la dynamique d'un système irrigué. Ainsi on s'intéressera à la gestion de l'eau pour amener de l'eau du Fleuve à la parcelle, ce qui se passe à l'aval de la buse d'entrée de la parcelle n'étant pas pris en compte. Ceci débouche par exemple sur des recommandations en termes de taille idéale d'aménagement ou de règles de distribution de l'eau (Diemer et Speelman, 1990). Les limites de cette perspective poussée à l'extrême apparaissent rapidement : il faut que les paysans se conforment individuellement aux normes issues de la gestion collective. Le niveau collectif est toujours le seul garant du bon fonctionnement du système irrigué... à condition que les paysans se comportent comme on pense ou souhaite qu'ils le fassent.

Cette prise en compte des comportements des individus a alors évolué vers l'autre perspective mentionnée selon laquelle ils constituent le moteur essentiel de la dynamique du système irrigué. Ainsi on s'intéressera aux pratiques des différents paysans relativement à leurs irrigations, durée et fréquence, ou plus largement à leur itinéraire technique. Cependant dans toute opération d'aménagement telle que la conception ou la réhabilitation d'un système irrigué, le point de vue collectif ne peut être éliminé : il y a en effet toujours un ordonnateur. Cette perspective évolue alors vers la question des incitations à mettre en œuvre en fonction des caractéristiques d'une population donnée pour qu'elles conduisent à des comportements individuels dont l'évolution qui en résulte pour le système est viable.

Position de cette thèse dans ce contexte

La question de la viabilité des systèmes irrigués, au Fuuta Tooro et ailleurs, continue à se poser. Parmi les approches interdisciplinaires, entre les deux points de vue explicités sur les niveaux d'organisation, quelques approches intermédiaires ont été mises en œuvre récemment. Elles cherchent à mêler les niveaux d'organisation ou à séparer le système irrigué en deux sous-systèmes pour lesquels ce dualisme n'existerait plus.

Or une première expérience du terrain en DEA et la lecture de quelques études de cas nous ont incité à voir le système irrigué comme le lieu de nombreuses coordinations entre les paysans ainsi qu'entre les paysans et des groupements de paysans. Ainsi à Valence en

Espagne, pendant plusieurs siècles, un tribunal de l'eau a regroupé tous les jeudis devant la cathédrale les responsables élus de communautés autonomes d'irrigation pour statuer sur les conflits entre usagers au sein de l'une de ces communautés (Glick, 1970). La coordination entre les paysans passe par un niveau collectif institué. Dans le périmètre étudié en DEA, le démarrage de la campagne d'hivernage posait problème parce que de nombreux paysans n'étaient pas jour de leurs cotisations. Le bureau de l'Union avait alors décidé de fermer les modules d'accès à l'eau de tous les groupements qui n'étaient pas à jour. Un paysan doublement concerné car à la fois membre de la commission chargée de l'application de cette décision et en retard pour ses paiements de redevance nous a alors expliqué : *"je ne suis pas à jour mais je ferai la campagne quand même : je ne vais quand même pas fermer mon propre module !"*. Cette année là, la décision susmentionnée n'a pas été appliquée.

Ces expériences nous ont amené à choisir un angle d'approche particulier, prenant en compte l'interdisciplinarité et l'existence de plusieurs niveaux d'organisation. Nous avons choisi de nous intéresser à la problématique ***des liens entre les modes d'organisation et la viabilité des systèmes irrigués***. Etant donné son ampleur, cette question constitue plus un cadre qu'un objectif à ce travail.

L'hypothèse qui va nous guider dans ce travail est alors de ne pas chercher à réduire la complexité des deux niveaux d'organisation, mais de les prendre en compte en particulier *via* les interactions qui en sont à l'origine : nous allons aborder la question des liens entre les modes de coordination en œuvre au sein d'un système irrigué et la viabilité de ce dernier.

L'existence de nombreux réseaux sociaux, propres au système irrigué ou intersections de celui-ci avec d'autres réseaux ayant leur origine à l'extérieur nous incite à adopter ce point de vue. Ces réseaux constituent une base collective préalable à une coordination entre des paysans ayant leurs propres objectifs et contraintes. Ils peuvent eux-mêmes être plus qu'une instance de coordination et jouer un rôle direct dans la dynamique du système irrigué *via* des rôles qui peuvent leur être dévolus.

Un volet important de cette problématique est méthodologique. Il s'agit de trouver un moyen d'aborder cette question de la dynamique d'interactions, dans un contexte où la diversité est importante : comment conduire le travail de terrain, quels outils utiliser pour traiter la question posée en relation avec celui-ci ? Il ne s'agit pas seulement de répondre à la question de l'existence d'un lien entre modes de coordination et viabilité mais également de comprendre d'où vient ce lien éventuel, comment il se construit.

Pour chercher une telle méthode, une caractéristique importante des systèmes irrigués peut nous guider : il s'agit d'un lieu d'appropriation et d'usage d'une ressource en propriété commune, l'eau, au moyen d'équipements également en propriété commune, station de pompage, canaux, vannes. C'est pourquoi les travaux sur la gestion des biens en propriété commune, et en particulier sur les ressources renouvelables, peuvent constituer une base de départ intéressante d'un point de vue méthodologique. Pour ces ressources, la question de la viabilité dans un contexte où les interactions sont nombreuses se posent de la même manière.

Cet intérêt vient également du fait que l'usage de ces ressources se fait au sein de systèmes complexes devant être traités de manière interdisciplinaire. Pour cela des liens peuvent aussi être faits avec des techniques de modélisation et de simulation prenant explicitement en compte les interactions et se prêtant bien à des points de vue interdisciplinaires. Il s'agit en particulier des systèmes multi-agents, pour lesquels la représentation de la complexité issue de l'existence de différents niveaux d'organisation est actuellement au centre des débats. La modélisation n'est utilisée ici que dans un but exploratoire, pour la compréhension de la dynamique des systèmes irrigués.

Objectifs de cette thèse

Les objectifs de cette thèse concernent essentiellement cet aspect méthodologique. Il s'agit de ***mettre au point une démarche d'étude des systèmes irrigués et de la mettre en œuvre afin de vérifier sa pertinence pour traiter la question des liens entre modes d'organisation et viabilité des systèmes irrigués.***

Cette démarche va s'appuyer en particulier sur la réalisation d'un modèle, un système irrigué virtuel, permettant de simuler diverses hypothèses de compositions de règles collectives, de comportements individuels et de modes d'organisation en usage. Il s'agit d'explorer les différents usages possibles de ce type d'outil, en relation avec les connaissances de terrain, pour le traitement d'une question relative à la compréhension de la viabilité des systèmes irrigués.

Plan du travail

Le contexte dans lequel sont apparus ces systèmes irrigués au Fuuta Tooro et la problématique qu'ils amènent à traiter sont développés dans le premier chapitre de la première partie. Cette dernière se poursuit par une présentation des diverses méthodes

existantes pour traiter au moins partiellement de la viabilité des systèmes irrigués. Elle finit sur les principes de la méthode utilisée pour traiter la question posée, basée sur les concepts de modes d'appropriation, de processus de décision et sur l'usage de simulations.

La deuxième partie commence par présenter une description des terrains étudiés. La construction du modèle à partir de cette complexité observée est ensuite présentée : choix de représentation et hypothèses simplificatrices sous-jacentes. Le plan d'expérience des simulations pour lesquelles le modèle a été utilisé ainsi que les résultats de ces simulations, qui constituent le chapitre 4, achèvent la deuxième partie.

La troisième partie enfin discute dans le chapitre 5 de la viabilité des systèmes irrigués et des paramètres qui paraissent importants à prendre en compte à la suite de ces simulations. Ceci débouche sur des propositions d'éléments de méthodes pour des opérations de conception ou de réhabilitation de systèmes irrigués. Le chapitre 6 enfin concerne une discussion de la méthodologie employée. Les questions de validation, de généricité et d'usage des modèles utilisés sont en particulier abordées dans un premier temps et les implications de la démarche utilisée relativement aux autres démarches existantes dans un second temps.

PREMIERE PARTIE : LE CONTEXTE

Les deux enjeux de ce travail sont d'une part d'approfondir la compréhension de la viabilité des systèmes irrigués à partir de la coordination entre les paysans et leurs groupements et d'autre part la mise au point et l'utilisation d'une méthode adéquate.

La question de la viabilité des systèmes irrigués, posée à partir de cas situés dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal, reste à préciser. L'histoire du développement de l'irrigation dans la vallée du Fleuve Sénégal permet de mettre en évidence quelques unes des caractéristiques de ces aménagements, qu'il s'agit de situer ensuite par rapport au développement de l'irrigation ailleurs dans le monde. Ces questions conduisent dans la fin du premier chapitre à reposer la problématique de la thèse tout en explicitant les termes.

Le deuxième chapitre est consacré à une revue de diverses méthodes existantes pour l'étude de la gestion des systèmes irrigués. Leurs limites dans le cadre de la question posée nous amènent enfin à élargir le champ de recherche de méthodes vers la gestion des biens en propriété commune pour lesquels des questions semblables se posent et les systèmes multi-agents comme outils de représentation et de simulation.

1. Et les systèmes irrigués arrivèrent dans la vallée du Fleuve Sénégal

1.1 Une apparition due à diverses causes

Depuis la "révolution *toorodo*" au début du 19^{ème} siècle jusqu'aux années 1960-70, le *Fuuta Tooro*¹, a connu une organisation économique, sociale et politique autour de la crue du Fleuve se traduisant par un système de production fondé sur la culture de mil, la pêche et l'élevage (Boutillier et Schmitz, 1987 ; Schmitz, 1994). Des épisodes de sécheresse répétés dans les années 70 et des aménagements lourds dans l'ensemble de la vallée du Fleuve Sénégal ont depuis déplacé le mode majeur de production de céréales des cultures de mil de décrue vers des cultures de riz irrigué.

1.1.1 la sécheresse des années 60-70 et les cultures de décrue

Le système de production précédant l'arrivée de l'irrigation et encore en usage par endroit, s'appuie sur un milieu structuré autour d'un axe longitudinal, le Fleuve Sénégal. Ainsi, si on quitte la rive du fleuve en marchant selon un chemin perpendiculaire à son lit, après avoir salué les pêcheurs, on commence par gravir la pente du bourrelet de berge, le *falo*, constitué de sols assez légers. On traverse alors les villages habités auparavant seulement en saison sèche, puis on redescend dans les cuvettes de décrue, le *waalo*, parfois assez larges, jusqu'à une dizaine de kilomètres, constituées de sols lourds argileux. On arrive enfin en vue du *jeeri* plus sableux, avec ses dunes et ses hameaux peuls. La Figure 1 représente les différents éléments de ce parcours.

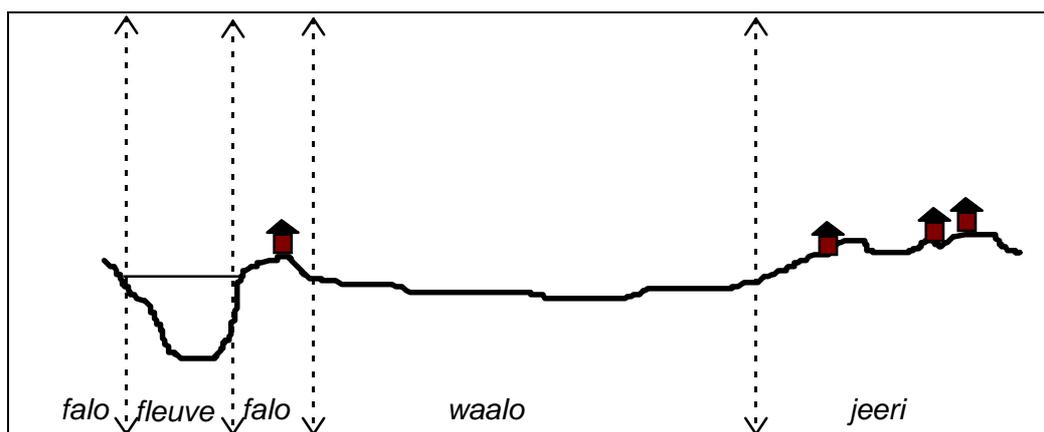


Figure 1 : coupe transversale à la vallée

¹ Une carte de la région est en annexe 1 et permet de situer les différents lieux mentionnés.

Ce chemin est aussi celui de l'eau au moment de la crue, entre juin et septembre, si elle a lieu et si de nouveaux obstacles tels que des digues ne viennent pas la gêner. Le passage de l'eau marque le temps et permet aux différents usagers de profiter de manière complémentaire du même espace à des moments différents. Reprenons le parcours précédent en suivant l'eau et en s'intéressant plus particulièrement au Waalo. Le Fleuve monte, emprunte des passes où le bourrelet de berge est plus bas, voire submerge celui-ci en cas de fortes crues et inonde les cuvettes de décrue. C'est le temps des pêcheurs. Quelques cultures pluviales se pratiquent en bordure du jeeri. Le fleuve redescend, mais l'eau reste dans la cuvette de décrue. Le *falo* est alors cultivé de produits maraîchers comme la décrue progresse. Quand l'eau a pratiquement disparu des cuvettes, si elle est restée assez longtemps, 30 jours environ, le mil est semé et donnera sa production en mars ou en avril, à la fin de la saison sèche et froide. C'est le temps des agriculteurs. Après la récolte c'est au tour des troupeaux de venir pâturer les résidus de culture à la place de l'herbe qui commence déjà à manquer dans le jeeri, et enrichir la cuvette par la même occasion. C'est le temps des éleveurs. Déjà il a commencé à pleuvoir à l'amont dans le *Fuuta Djallon*, une nouvelle crue s'annonce, sera-t-elle bonne ? C'est le temps du Fleuve.

C'est autour de cette succession de passages de l'eau que s'est organisée la vie politique locale qui a elle-même façonné les différents usages de l'espace décrits ci-dessus. Le *Fuuta Tooro* connaît en effet jusqu'à aujourd'hui une société hiérarchisée associant différents niveaux de statuts sociaux spécifiant des rôles particuliers dans la société ainsi que dans les relations de celle-ci avec le milieu. Ainsi les *TooroBe* ou les *FulBe* nobles ou encore parfois les *subalBe*² ont dans un village donné le pouvoir politique et la maîtrise de l'accès aux terres. Cette relation entre statut social et rôle parmi les activités politiques et de production d'une communauté est variable d'un village à un autre selon son histoire et l'activité principale pratiquée : agriculture, pêche ou élevage. Ici les chefs de village sont choisis parmi une famille de *TooroBe*, là parmi une famille de pêcheurs. À côté de cette hiérarchie foncière, il existe d'autres statuts d'hommes libres, de castés et de descendants d'esclaves dont l'accès à la terre dépend des précédents mais qui pour certains d'entre eux ont des droits d'usage de la terre³. *In fine* la répartition des récoltes est assez égalitaire au sein de la population *via* un mécanisme de redistribution et de paiement de redevances foncières

² *TooroBe* (sing. *Toorodo*) : lettrés coraniques ; *FulBe* (sing. *Pullo*) : éleveurs ; *subalBe* (sing. *Cuballo*) : pêcheurs. Tous les termes pulaar sont repris dans un index en fin de thèse.

³ Deux termes différents en pulaar désignent la maîtrise de l'accès à la terre d'une part et la maîtrise de l'usage d'autre part : *jom leydi* d'une part et *jom ngesa* d'autre part. Le terme *leydi* fait référence à un territoire dont il peut être fait usage le temps d'une campagne sous forme de champ, le *ngesa*.

(Magistro et al, 1994). La relation entre statut et rôle dans le rapport au milieu se traduit aussi au niveau des représentations que chaque communauté villageoise se fait du milieu. Ainsi seuls certains *subalBe* peuvent communiquer avec les crocodiles pour qu'ils laissent la communauté en paix. Enfin même si chacun de ces statuts est *a priori* endogame (Ba, 1977), les frontières ne sont pas étanches et "on peut devenir toorodo en trois générations" (Schmitz, 1994).

Pour que cette société vive avec ce système de production, un élément important est la présence de l'eau, qu'elle vienne du ciel ou du Fleuve, surtout quand les températures maximales moyennes mensuelles atteignent les 45 °C comme à Podor en mai ou en juin. Or les années 70-80 ont vu passer la pluviométrie moyenne annuelle de 300 à 200 mm à Podor⁴ (Raes et Sy, 1993). Cette sécheresse n'a pas non plus été locale au Fouta Tounsi mais a touché avec acuité l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. La crue ne venait plus comme auparavant et ne prenait donc plus le relais de pluies devenues pratiquement toujours insuffisantes. Le système de production décrit plus haut semble ainsi se trouver en défaut : le poisson disparaît du Fleuve, la production céréalière de mil chute faute de superficies inondées, les troupeaux diminuent, les hommes migrent chercher travail et revenu ailleurs. L'irrigation apparaît alors *a priori* comme un moyen d'augmenter et de sécuriser la production céréalière, les sols et le climat étant jugés bons pour le riz (Verheye, 1995).

La justification paraît cohérente au premier abord. L'apport de l'eau par pompage dans le Fleuve, dont le niveau d'étiage pourrait être soutenu par des barrages, permettrait de pallier la disparition de la crue. Cependant cette sécheresse, même si elle a été importante et grave, n'est peut être pas si exceptionnelle. Ces années 1970-80 sont certes sèches en elles-mêmes, mais surtout relativement aux années qui les précédaient, c'est-à-dire aux années observées et durant lesquelles des séries de données météorologiques locales ont été enregistrées. Ceci ramène dans le meilleur des cas au début du siècle. Cette série de données montre déjà une variabilité importante de la pluviométrie ; l'épisode sec récent s'y distingue cependant nettement. Par contre les siècles qui précèdent semblent avoir connu aussi des épisodes de sécheresse comparables (Adams, 1992). Or le système de production actuel y était déjà en place. Dans ce contexte la sécheresse, si elle a été sans aucun doute un adjuvant de taille, justifiait-elle à elle seule l'apparition des systèmes irrigués ?

⁴ Raes et Sy (1993) mentionnent 195 mm pour la période 1968-1990 à Podor alors que Séguis (1995) mentionne 288 mm sur la période 1950-1980.

1.1.2 des barrages et des digues

En tout cas, la vallée a vu apparaître des digues modifiant la circulation locale de l'eau en cas de crue et surtout deux barrages, à Manantali à l'amont et à Diama. Les premiers aménagements ont aussi modifié l'accès aux terres de décrue et ainsi remis en cause le droit foncier sur lequel s'appuyait le système agro-halio-pastoral décrit plus haut. La mise en place des barrages, même si leur justification ne réside pas seulement dans le développement de l'agriculture irriguée mais aussi dans la production d'énergie électrique et la navigabilité du fleuve (Horowitz et Salem-Murdock, 1994), demande une exploitation plus intensive de l'eau pour être "rentabilisés". Ce premier choix a alors demandé la mise en place d'aménagements hydro-agricoles pour lesquels les experts promettaient des rendements de 5 t/ha de riz (contre 1 à 2 t /ha de mil) et la possibilité de faire 2 campagnes par an (Lericollais, 1995). Cependant ces barrages ont été mis en place à la fin des années 80 et les premiers périmètres, sauf un cas particulier, datent du milieu des années 70. Ils font partie du même mouvement que l'apparition de l'agriculture irriguée, l'ont renforcée, mais n'en sont pas à l'origine.

Les premiers aménagements et les endiguements⁵ ont entretenu le besoin de nouveaux aménagements par la modification de la circulation de l'eau et de l'accès aux terres accessibles à la crue ou irriguées. Ils ne sont pas à l'origine de ces changements mais peuvent être comparés à des autocatalyseurs en chimie : les changements induits par les premiers aménagements ont rendu nécessaire la création de nouveaux aménagements suite à la disparition de terres de décrue, sans parler des modifications des circuits économiques.

Chacun de ces aménagements constitue un point d'ancrage dans l'avancement d'un processus de modification du système de production de la vallée fortement irréversible. Cette irréversibilité est due tout d'abord à l'ampleur des modifications engendrées sur le paysage et du coût engagé qu'il convient de rentabiliser. Il ne s'agit pas de revenir en arrière à une situation *ex ante* mais de prolonger ces aménagements par d'autres dans une espèce de fuite en avant. Comme dans le cas de l'aménagement portuaire de l'estuaire de la Loire décrit et analysé par Henry (1987), des premiers aménagements lourds sont faits qui garantissent la plus grande liberté de manœuvre ultérieure possible. Ici, au Fuuta Tooro, des aménagements lourds sont faits, le développement de la superficie irriguée est rendu nécessaire. Cette irréversibilité est probablement aussi à voir dans la modification des

⁵ pour un périmètre, la crue devient en effet gênante et il faut s'en protéger par des digues parfois importantes.

usages du milieu et des structures sociales engendrées par l'arrivée de l'irrigation (Boutillier et Schmitz, 1987). A partir de la situation antérieure décrite ci-dessus et perçue comme inégalitaire par les experts ayant participé aux programmes d'aménagement⁶, l'introduction des systèmes irrigués, partant d'un principe de justice et surtout d'augmentation de la production agricole attendue, tend à mettre en place un système où l'accès à la terre irriguée serait le même pour tous. Ce faisant elle modifie les rapports entre les différentes catégories sociales ainsi que les relations entre la société et son milieu d'une manière plus rapide et à plus grande échelle que les évolutions antérieures : il est peu probable qu'une telle évolution des rapports sociaux soit réversible.

La modification par les aménagistes du milieu participe ainsi au changement de système agraire dans la vallée en tant qu'accompagnatrice de ce changement et de catalyseur, elle est facteur d'irréversibilités dans ce processus mais ne le justifie pas. Il faut remonter plus en amont aux choix politiques à l'origine de ce changement et, par la suite, de ces aménagements.

1.1.3 des choix politiques

Si l'aménagement de la moyenne vallée a commencé essentiellement dans les années 70, les premiers projets de développement hydro-agricoles datent de la période coloniale. Après une phase pré-coloniale centrée sur un développement du fleuve orienté vers une amélioration de sa navigabilité, l'expérience du barrage d'Assouan et de la mise en valeur de la vallée du Nil au 19^{ème} siècle et dans la première moitié du 20^{ème} donne des idées aux autorités coloniales dont les besoins en coton pour les industries textiles sont importants (Meublat et Inglès, 1997). Les objectifs évoluent ensuite vers la riziculture mais, pour des raisons économiques, débouchent peu concrètement. Il en résulte cependant un grand nombre d'études hydrologiques, pédologiques et agronomiques. Après l'indépendance les premières réalisations apparaissent, le gouvernement sénégalais donnant pour objectif la production de riz pour le pays tout en fixant la population de la région (Seck, 1990 ; Meublat et Inglès, 1997).

Ce développement de l'irrigation dans la vallée du Fleuve est ainsi le résultat de choix politiques extérieurs au Fuuta : autorité coloniale puis Etat sénégalais. Dans la dernière phase, il a été accompagné par d'autres acteurs tout aussi extérieurs au Fuuta : bailleurs de

⁶ L'inégalité politique et foncière observable à une génération donnée est traduite en une inégalité à tous les points de vue et permanente : ce qui est observé lors de missions de quelques mois ou même de quelques années est interprété comme permanent et à travers les grilles de lecture propre à la culture des experts, dans laquelle la notion de servage n'a pas toujours exactement le même sens.

fonds, ONG et autres experts (Diemer et Speelman, 1990). Il fallait financer ces aménagements que les rapports présentaient comme non rentables économiquement. Pour cela les bailleurs de fonds sont intervenus, certes dans une perspective de soutien alimentaire, mais aussi pour des raisons d'influence politique et la perspective de récupérer des marchés pour des bureaux d'études et des entreprises des pays bailleurs⁷ (Goldsmith, 1996). L'influence des experts garantissant des rendements de riz importants et un développement rapide de l'hydroélectricité, qui ne se sont vérifiés ni l'un ni l'autre, est aussi intervenue dans le développement de l'irrigation.

Ces choix politiques se sont concrétisés au travers de la mise en place de divers organismes publics nationaux ou plurinationaux de mise en valeur. A l'échelle de l'ensemble du bassin du Fleuve Sénégal, l'OMVS⁸ est le lieu de la coordination entre les pays riverains : Mali, Mauritanie, Sénégal. Elle constitue l'instance de gestion des barrages et donc de choix de la politique de gestion du Fleuve, pouvant être orientée vers le maintien de crues artificielles, le soutien d'étiage pour l'irrigation en contre-saison, la navigation ou l'énergie hydroélectrique. Il apparaît ainsi que ces choix, importants pour la production agricole irriguée sont pris loin des agriculteurs. Sans la mise en place de moyens de diffusion de l'information sûrs et efficaces, l'aléa climatique sur le niveau du fleuve est remplacé par un nouvel aléa tout aussi imprévisible pour le producteur. Par rapport au système de production précédent, l'OMVS s'est ajoutée comme intermédiaire entre Allah et les paysans, aussi éloignée du Premier que des autres. Du côté sénégalais, la SAED⁹ est responsable dans un premier temps de l'exploitation des aménagements, de l'encadrement des paysans et de l'ensemble de la filière de production depuis l'approvisionnement en intrants jusqu'à la commercialisation et à la transformation des produits. La nouvelle politique agricole qui met en place le désengagement de l'Etat en 1984 lui retire peu à peu ses activités de production pour lui laisser un rôle de conseil aux exploitants et de gestion des aménagements structurants, c'est-à-dire dans la plupart des cas à l'amont des stations de pompage. Ce désengagement de l'Etat observé à travers l'évolution des fonctions de la SAED ne s'est pas traduit par une ré-appropriation complète des terres par les paysans. Si l'usage revient maintenant presque complètement aux paysans, selon la loi sur le domaine national de 1964

⁷ "L'aide se révèle actuellement un excellent instrument pour ouvrir les marchés, une bonne part de cette assistance étant liée à l'acquisition de produits exportés par le pays donateur" (Goldsmith, 1996).

⁸ Organisation de Mise en Valeur du fleuve Sénégal. Tous les sigles sont repris dans un index en fin de thèse.

⁹ Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et de la vallée du fleuve Sénégal et de la Falémé

modifiée par l'introduction des communautés rurales en 1981, les terres aménagées restent la propriété de l'Etat et sont attribuées aux paysans pour être mises en valeur, les transferts de droits entre paysans ne concernent que l'usage. Aux différentes phases dans la mission de la SAED, correspondent différentes phases dans les types d'aménagements apparaissant dans la vallée.

1.2 Une apparition en plusieurs vagues

La succession des différents rôles de l'encadrement de la SAED n'est pas seule à l'origine de la variabilité des périmètres irrigués : à une époque donnée, les types de périmètres aménagés et donc les contextes dans lesquels se situent les paysans, diffèrent aussi. Ils ont par contre tous la particularité, qu'ils partagent avec nombre de leurs congénères dans le monde, de dépendre fortement de l'extérieur : financements pour des réhabilitations fréquentes, accès aux intrants dont l'eau n'est qu'un exemple (Dedrick et al., 1989).

1.2.1 variété d'histoires et de structures

Les différents types de périmètres irrigués présents aujourd'hui au Fuuta Tooro ont des histoires différentes selon d'une part la politique agricole en vigueur et d'autre part la mode chez les aménagistes des pays bailleurs au moment de leur création. Les grands types présents actuellement sont les suivants : grands périmètres, PIV¹⁰, périmètres privés, périmètres intermédiaires. Ces différents types se distinguent par leur structure physique, leur taille, leurs normes de gestion, les superficies affectées aux paysans attributaires. Les grands périmètres sont historiquement les premiers au Fuuta Tooro, le périmètre de Nianga, dont la partie la plus ancienne fut aménagée en 1974, est un représentant emblématique de ce type, il est aussi le premier aménagement de la zone à l'exception du périmètre de Guédé chantier¹¹. Ces périmètres sont de grande taille, ils ont été dans un premier temps gérés par la SAED, les paysans ayant un rôle proche de celui d'ouvrier agricole (Diemer et al., 1991). Aujourd'hui, ce sont les plus grands : 1200 ha pour le périmètre de Nianga. Chaque parcelle fait environ 1 ha et théoriquement chaque paysan a une seule parcelle. Ils sont aménagés avec une station de pompage et pour une maîtrise totale de l'eau. Ils sont essentiellement rizicoles. Les paysans attributaires des parcelles sont regroupés en organisations paysannes hiérarchisées en plusieurs niveaux. Celles-ci, en liaison

¹⁰ Périmètre Irrigué Villageois

¹¹ Le périmètre de Guédé chantier, premier périmètre de la moyenne Vallée doit son origine en 1939 à la Mission d'Aménagement du Sénégal dans un but d'expérimentation de méthodes importées d'Indochine. Il a connu un démarrage difficile dans les années 40, une phase de réussite, dans un cadre expérimental, grâce à un encadrement rapproché par la coopération chinoise à partir de 1969, cette réussite a appuyé les convictions des partisans du développement de l'irrigation dans cette région, le périmètre a ensuite été repris par la SAED pour une exploitation du même type que celle de Nianga en 1979 (Lericollais et Sarr, 1995).

rapprochée avec la SAED, ont en charge la gestion des biens communs : réseaux de canaux, équipements de pompage et éventuellement parc de matériel agricole.

Les PIV sont plus petits, une dizaine d'hectares, alimentés par des GMP¹², de qualité d'aménagement plus sommaire : planage succinct, pas de drainage. Ils sont plus nombreux et ne peuvent tous être rangés dans la même catégorie, même en ne considérant que les conditions initiales théoriques des aménagements. Leur point commun est l'esprit "small is beautiful"¹³ dans lequel ils ont été constitués à la fin des années 70 et durant les années 80. Chacun est affecté à un groupement villageois de type coopératif ou faisant partie d'une fédération de groupement villageois ayant un statut de coopérative. L'investissement initial en travail demandé aux paysans y est important. L'objectif est le plus souvent une production vivrière, riz et cultures maraîchères (Lericollais et Sarr, 1995). Ils se distinguent par l'organisme responsable de leur aménagement (SAED, FED¹⁴, Coopération italienne, OFADEC¹⁵...) en particulier en ce qui concerne les superficies affectées aux paysans (de 0,2 à 1 ha), le mode d'accès à l'eau des parcelles au canal principal (buse, siphon). A cette variabilité en grande partie due aux conditions initiales de leur mise en place se superpose une autre variabilité due à la manière dont les groupements se les sont appropriés et les ont fait évoluer. Ils connaissent une relative réussite jusqu'à la fin des années 80 (Diemer et al., 1991), depuis un certain nombre de difficultés sont apparues (Niasse, 1991) pour une partie d'entre eux au moins.

Plus récemment, au début des années 90, sont apparus des périmètres dits intermédiaires de quelques centaines d'hectares. Ceux-ci ont cherché à reprendre les avantages des deux modèles précédents et à les associer à un effort de formation des paysans. Des grands périmètres ont été repris la maîtrise complète de l'eau, un approvisionnement par station de pompage, des parcelles d'assez grande taille (1 ha). Des PIV sont restés une prise en compte partielle de l'usage de l'aménagement à des fins vivrières, la nécessité d'entités autonomes sur le plan de l'irrigation de taille raisonnable. Il en est ressorti une structure "en grappe" (Diemer et Huibers, 1991), où un réseau principal alimenté par une station de pompage commune dessert des Unités Autonomes d'Irrigation de quelques dizaines d'hectares. Une structure fédérative des organisations paysannes correspondantes est en cours de mise en place sous l'encadrement rapproché du FED.

¹² groupes motopompes sur des radeaux flottants placés sur le fleuve

¹³ titre d'un ouvrage de E.E. Schumacher (1973, 1978 pour l'édition française)

¹⁴ Fonds Européen de Développement.

¹⁵ Office Africain pour le Développement et la Coopération

Récemment aussi, avec le désengagement de l'Etat, des périmètres privés se sont développés, surtout dans le Delta (Bélières et Faye, 1994), mais aussi au *Fuuta Tooro*. Ils sont petits, quelques hectares, et attribués à des GIE¹⁶ dont une partie des membres au moins a des droits fonciers coutumiers sur la terre aménagée¹⁷. Il faut aussi que l'un des membres ait des ressources propres et/ou les relations nécessaires pour avoir accès à un crédit pour l'aménagement. Ils ressemblent le plus souvent à des PIV en ce qui concerne la structure sommaire, le mode d'exhaure et les spéculations mises en œuvre. Leur exploitation est moins régulière que les précédents. Leur dépendance à un modèle extérieur au moment de l'aménagement a été moins importante que pour les autres types de périmètres.

Mis à part le dernier type, chacun de ces modèles d'aménagement trouve son origine hors de la vallée dans des bureaux d'études à S^t Louis, à Dakar ou en Europe. Ainsi, même si il est parfois fait appel à des méthodes dites participatives pour leur conception, chaque aménagement est marqué par les conditions initiales inhérentes à sa conception. Cependant, à cette variabilité des conditions initiales, s'en superpose une autre due à la manière dont chaque groupe social adapte à sa façon l'aménagement qui lui a échoué : deux aménagements conçus selon un même modèle n'auront pas nécessairement la même évolution.

1.2.2 constance de la dépendance à l'extérieur

Si le développement de l'agriculture irriguée présente une assez grande diversité, il est cependant une caractéristique commune à la quasi totalité des aménagements hydro-agricoles dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal : leur dépendance vis-à-vis de l'extérieur. Cette dépendance se mesure principalement en termes financiers. Tous les périmètres de plus d'une dizaine d'années ont subi, au prix d'investissements importants (Wackermann, 1995), une ou plusieurs réhabilitations, même ceux qui sont montrés en exemple aujourd'hui, tel celui de Guia 4 étudié dans la suite. Ces réhabilitations ont parfois consisté en de véritables "ré-initialisations" : normes de gestion, mécanisation, réseau, organisation, pompage... tout est remis à plat. Seuls les paysans ne changent pas.

La dépendance extérieure ne se limite pas à ces périodes de crise. L'entretien du périmètre, l'accès aux intrants, la commercialisation dépendent aussi d'acteurs extérieurs au périmètre

¹⁶ Groupement d'Intérêt Economique. Ce statut juridique vaut en particulier personnalité morale et donne ainsi accès au crédit auprès de la Caisse Nationale de Crédit Agricole.

¹⁷ et des relations sociales pour accéder aux subventions et financements nécessaires.

depuis le désengagement de l'Etat. La profession agricole a encore du mal à faire valoir ses intérêts face à des interlocuteurs peut-être mieux organisés. Ce regroupement des forces pour avoir du poids dans les discussions avec les autres acteurs de la filière fait partie des objectifs d'union d'associations actuellement à l'œuvre (Sall, 1995). Elle s'est appropriée les techniques de culture mais ne maîtrise pas son environnement que ce soit pour le fonctionnement des réseaux ou l'approvisionnement en intrants (Lavigne-Delville, 1993).

Cette dépendance se traduit en particulier au niveau de l'endettement croissant des GIE de la vallée. La conception initiale d'une agriculture à crédit associée à des taux de remboursement assez faibles a conduit à un blocage de ce système de financement. Dans l'état de crise actuel, l'accès au crédit est pratiquement bloqué au niveau de la CNCAS¹⁸ et certains aménagements ont du mal à démarrer faute de moyens financiers, les fonds de roulement étant épuisés. Cette situation sur le plan financier se retrouve au niveau des infrastructures : le taux médiocre de paiement de la redevance hydraulique a participé au non entretien de l'aménagement et à l'absence de fonds pour les travaux nécessaires de remise en état. Et la question de l'amortissement du périmètre n'est pas abordée ici...

Ce n'est pas nécessairement la discipline des paysans pour payer qui est en cause. Un bilan économique d'un périmètre montre que dans les conditions actuelles en prenant en compte tous les coûts, un aménagement ne peut dégager de bénéfices qu'avec deux campagnes de riz à 6 t/ha par an, ce qui est nettement plus que les résultats couramment observés (de Coster et de Nys, 1996).

Ces ressources extérieures viennent de plusieurs endroits : bailleurs de fonds, ONG, mais aussi migrants ou ressortissants ayant pu s'enrichir. Les ressources fournies par les bailleurs de fonds¹⁹ ou les ONG sont parfois remises directement aux groupements intéressés mais le plus souvent passent entre les mains d'institutions locales (Wackermann, 1995). Il s'agit de prêts mais le taux de remboursement de ces crédits est faible, qu'ils soient à court terme pour les crédits de campagne ou à moyen terme pour les crédits d'aménagement. En ce qui concerne les migrants et les ressortissants ayant pu s'enrichir, leur part est considérée comme très importante voire indispensable dans le développement de l'agriculture irriguée : apport d'argent à certains GIE pour constituer leur apport personnel afin qu'ils aient accès à un crédit pour aménager un périmètre irrigué, financement de GMP, remboursement de dettes, participation aux frais de campagne (Diemer et van der Laan,

¹⁸ Caisse Nationale de Crédit Agricole du Sénégal

¹⁹ dans la moyenne vallée du Fleuve, il s'agit essentiellement du FED et des coopérations française, allemande, italienne, canadienne...

1987 ; Lavigne-Delville, 1991). Etant donné l'imbrication des revenus de la migration dans les grande villes africaines ou en Europe dans le système de production familial²⁰, la localisation lointaine des acteurs qui participent au financement de l'irrigation ne rend pas cette source de revenu à proprement parler extérieure. La migration est un élément du système de production, ses revenus peuvent donc en être considérés comme une partie intégrante. Par contre elle dépend de la capacité de ces acteurs à distance à pouvoir trouver un revenu voire à pouvoir migrer temporairement, c'est en cela que réside son caractère exogène. Cependant cette dépendance externe *via* la migration est à relativiser dans la zone d'étude où le phénomène est moins répandu que plus à l'amont (Lericollais, 1989), on y voit moins dans les villages de "signes extérieurs de migrants" tels que de belles grandes villas.

1.2.3 Une dépendance non spécifique à la vallée du Fleuve Sénégal

Cette grande variété et cette grande dépendance vis-à-vis de l'extérieur des aménagements hydro-agricoles ne sont pas spécifiques à la vallée du Fleuve et au caractère relativement récent de leur apparition dans cette région. On retrouve ces caractéristiques dans de nombreux endroits dans le monde.

Les 250 millions d'hectares irrigués ont une grande importance dans l'agriculture mondiale : un tiers de la production agricole mondiale, 55 % de la production des céréales de base telles que blé et riz (Verdier, 1995). Les aménagements correspondant à cette superficie sont de type très divers, en fonction des différentes époques où ils ont été conçus ou réhabilités, à leurs modèles de conception et aux caractéristiques physiques du milieu dans lequel ils se sont insérés. Même si on se limite aux aménagements de type gravitaire, de nombreux éléments utilisés pour les décrire varient d'un aménagement à l'autre. Ces éléments peuvent concerner aussi bien la structure physique que le mode de gestion ou encore l'approvisionnement en eau. Un premier élément de structure physique variant est la taille de l'aménagement. Il peut paraître simple au premier abord, mais n'est en fait pas toujours facile à définir. Si la taille de l'aménagement est considérée comme la superficie dépendant d'une arrivée d'eau donnée, cela peut poser problème quand plusieurs sources ont des surfaces irrigables qui se recouvrent partiellement, ou surtout pour les grands aménagements subdivisés en plusieurs aménagements : l'ensemble des superficies irriguées à partir du canal de Provence constituent-elles un seul aménagement ou

²⁰ Lavigne-Delville parle de 30 % du budget familial.

plusieurs ? La hiérarchisation du ou des réseau(x)²¹ et les différents ouvrages de régulation dont ils sont éventuellement parsemés sont aussi des sources de variation : taille des canaux tertiaires ou irrigateurs (Meijer, 1989), répartition du débit. La définition des limites physiques d'un périmètre irrigué n'est pas aussi évidente qu'il y paraît au premier abord. Elle ne peut pas être considérée *a priori* comme fixe.

La variabilité sur la gestion concerne aussi bien qui en a la charge, que les règles collectives concernant le partage de l'eau ou l'entretien de l'aménagement, ou encore la gestion financière. Plusieurs types d'acteurs ont une responsabilité de gestion : administration nationale, administration régionale, un entrepreneur privé, un groupe d'usagers ou une fédération de groupes d'usagers (Hunt, 1992). Ceux-ci peuvent avoir à gérer l'ensemble de l'aménagement, mais souvent plusieurs coexistent, en gérant chacun une partie ou s'occupant d'une fonction particulière. Ces groupements qui coexistent ne sont pas nécessairement tous du même type. En ce qui concerne les règles collectives, en particulier les règles d'allocation de l'eau, plusieurs types existent, voire coexistent au sein d'un même aménagement. Gilot (1994) relève des modes d'allocation de l'eau entre les usagers selon des règles de type :

tour d'eau

rotation entre les usagers

rotation entre des petits groupes d'usagers

en fonction d'un calendrier déterminé

en suivant un ordre particulier

partition du débit

programmation quotidienne centralisée

à la demande

chaque agriculteur a accès à l'eau quand il le désire

"à la demande modifiée"

comme ce qui précède mais avec un délai entre la demande et l'attribution de l'eau pour permettre une programmation

Enfin, les pratiques de gestion financière varient d'un aménagement à l'autre notamment avec le mode de calcul et de prélèvement de la redevance : forfait dépendant ou non de la culture choisie, selon le volume utilisé avec partie fixe ou non (Svendsen et Changming, 1990).

²¹ Réseau d'irrigation et éventuellement réseau de drainage quand il existe (l'existence et la nature de ce réseau de drainage étant une autre source de variabilité).

Le mode de capture de l'eau enfin est une dernière source de variabilité : dérivation de rivière, réservoir rempli dans la nuit et vidé le jour, réservoir rempli pour la saison, pompage dans une rivière, pompage dans la nappe, captages par des galeries souterraines. Ces modes "d'acquisition" de l'eau ne sont pas exclusifs les uns des autres. Dans des périmètres du Pundjab au Pakistan, l'eau arrive d'un canal alimenté depuis un barrage et est complétée par les paysans au moyen de forages.

Toutes ces sources de variabilité montrent bien l'immense diversité d'aménagements possibles et, même s'ils donnent tous peu ou prou satisfaction, la fatuité de proposer une solution type même à l'échelle d'une petite région comme le Fuuta Tooro.

Comme ceux décrits au Sénégal, nombre de ces aménagements sont fortement dépendants d'acteurs ou d'événements extérieurs à ces aménagements ou aux structures de gestion les ayant en charge. Les nombreuses études de cas présentes dans la littérature à l'occasion de réhabilitations montrent la nécessité de faire appel dans ce cas à des organismes extérieurs et sont l'occasion de mettre en évidence la nécessité de cette dépendance pour la poursuite de l'exploitation de ces périmètres. La dépendance mise en cause est souvent d'ordre financière : à Madagascar par exemple, Droy (1991) a des doutes sur la capacité à long terme des associations d'usagers de maintenir l'aménagement à cause de coûts de fonctionnement prohibitifs.

Il est alors parfois nécessaire pour les acteurs ayant en charge la gestion de ces aménagements de recourir à des sources de revenus extérieurs pour équilibrer leur budget. En Chine, dans l'Ouest de la province de Hunan, ces activités secondaires sont variées et nombreuses : pêche dans le réservoir, vente d'énergie hydroélectrique, arboriculture sur les bords du réservoir. Elles ont pour objectif d'équilibrer le budget sans trop charger les redevances payées par les usagers des périmètres irrigués (Svendson et Changming, 1990). La production et la vente d'hydroélectricité est aussi une solution retenue en Ethiopie durant les années 80 pour rentabiliser des fermes irriguées au bilan économique désastreux, malgré les coûts qu'elle implique (Gascon, 1994). Ces revenus extérieurs prennent aussi parfois la forme de subventions directes ou non. Certains aménagements donnent l'impression de réussir, comme la Compagnie Sucrière du Sénégal, un peu plus à l'aval que la zone étudiée, mais bénéficient d'un marché du sucre protégé (Legoupil et Sene, 1994). Cette dépendance à l'extérieur n'est bien entendu pas le privilège des aménagements situés dans des pays en développement : en France, diverses formes de subventions constituent un apport financier non négligeable pour l'agriculture irriguée.

Mais la dépendance n'est pas seulement d'ordre économique. Elle peut aussi être hydraulique : l'eau prise par un aménagement le long d'une rivière n'est plus disponible pour un autre plus à l'aval et dans certains cas, si l'eau est rare, cela peut poser problème. Elle peut encore être due à la possibilité d'un accord entre différents groupes sociaux dont la relation est perturbée par la présence de l'aménagement. Par exemple au Guidimaka en Mauritanie, dans un contexte d'émigration masculine très importante, les femmes qui avaient l'exclusivité de la production de riz auparavant ont bloqué la plupart des périmètres irrigués mis en place (Blanchard de la Brosse, 1989).

Jusqu'à présent, il n'a été question que d'aménagement hydro-agricole, de périmètre, de structures ayant en charge la gestion... La notion "d'extérieur" a aussi été utilisée mais sans vraiment préciser par rapport à quoi. Il est temps de rassembler les différents éléments en interaction et de passer à la notion de système irrigué et tout d'abord de bien définir ce que l'on entend par là. La forte dépendance vis-à-vis de "l'extérieur" demande notamment de bien définir où se trouvent les limites d'un système irrigué et par où passent les interactions avec son environnement. Malgré la grande diversité observée et les problèmes liés à la définition de certains termes, des points communs apparaissent dans la manière de décrire un système irrigué, ce qui rend possible la proposition d'une définition.

De nombreuses propositions existent dans la littérature. Si l'on se limite aux définitions concernant un *système* irrigué, celles-ci peuvent être classées en deux catégories : celles qui portent sur les *éléments* constituant un système irrigué et celles qui portent sur les *fonctions* mises en œuvre au sein d'un système irrigué. Uphoff (1986) présente les activités propres à un système irrigué selon une matrice à trois dimensions :

activités de gestion des organisations : gestion des conflits, communication, mobilisation des ressources, prises de décision.

activités liées au fonctionnement du système physique : maintenance, mise en œuvre, construction, conception.

activités relatives à l'usage de l'eau : acquisition, allocation, distribution, drainage.

Svendsen et Small (1990) définissent un système irrigué comme "un ensemble d'éléments physiques et institutionnels utilisés pour capter de l'eau depuis une source naturellement concentrée (telle qu'un canal naturel, une dépression, un fossé de drainage ou un aquifère) et faciliter et contrôler le déplacement de cette eau depuis cette source jusqu'à la zone

racinaire de la terre dédiée à des productions agricoles"²². Cette définition est intéressante car suffisamment large pour retrouver l'ensemble de la diversité des systèmes irrigués observés. Cependant elle paraît se prêter assez peu à l'étude des relations d'un système irrigué avec son environnement or celles-ci ont souvent de l'importance. Ostrom et Benjamin (1993) quant à eux définissent un système irrigué comme la réunion d'un ouvrage physique dont dépendent un ensemble de paysans pour l'obtention d'eau d'irrigation, d'un système de distribution, de ressources d'appropriation (petits canaux terminaux, buses...) et enfin d'un ensemble de règles de mise en œuvre (qui fait partie du système, actions autorisées, diffusion de l'information, punitions et récompenses). Cette définition leur a permis de décrire et comparer plus de 130 systèmes irrigués au Népal. Mais là encore si les limites du système sont clairement exprimées, les modes de relation avec l'environnement n'apparaissent pas explicitement. C'est pourquoi nous proposons la définition ci-dessous que nous retiendrons dans la suite.

Un système irrigué gravitaire est 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 pouvant être 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.

Définition 1 : système irrigué

La définition littérale ci-dessus peut aussi être exprimée par la Figure 2 ci-dessous. Dans cette figure l'accent est mis sur les interactions entre les paysans, les parcelles, les canaux et les ouvrages et entre ceux-ci et leur environnement. Dans la suite, seules les interactions représentées en trait plein dans cette figure seront prises en compte.

²² "a set of physical and institutional elements employed to acquire water from a naturally-concentrated source (such as a natural channel, depression, drainageway, or aquifer), and to facilitate and control the movement of the water from this source to the root zone of land devoted to the production of agricultural crops" (traduction personnelle).

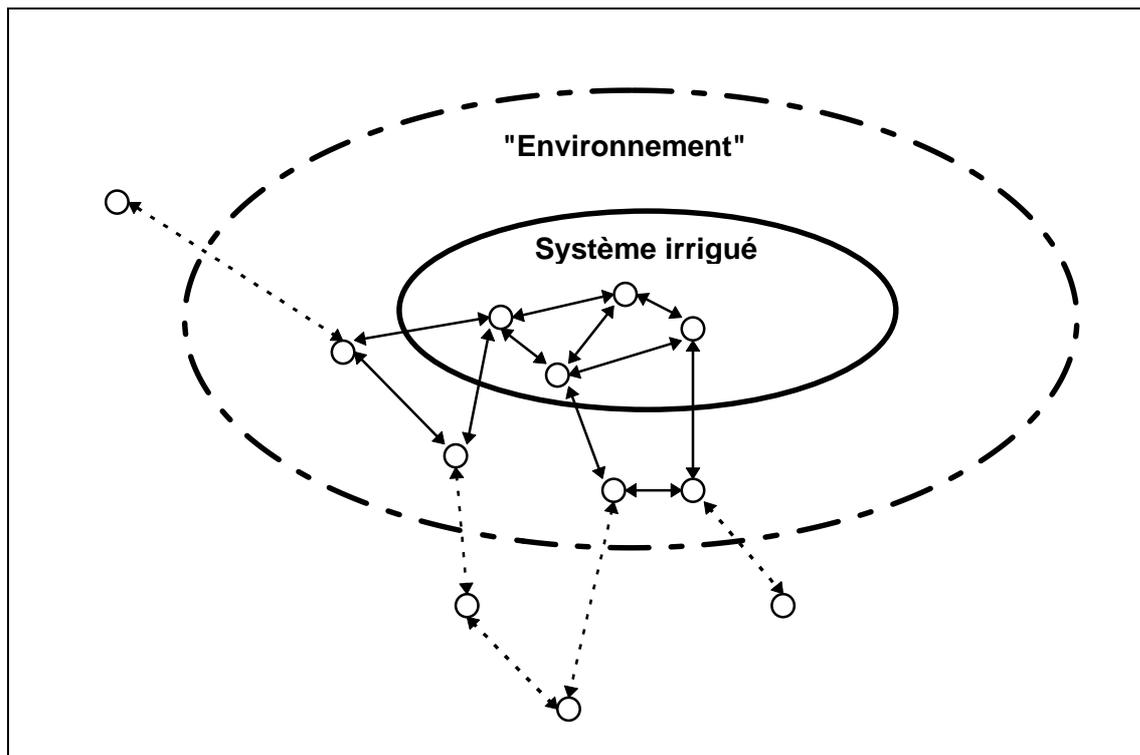


Figure 2 : représentation des interactions dans et autour d'un système irrigué.

Retenons de cette définition et de cette représentation schématique que le système irrigué est avant tout un lieu d'interactions entre différentes composantes elles-mêmes prises dans des interactions avec des entités extérieures au systèmes irrigué.

1.3 Quelle viabilité pour ces systèmes irrigués ?

La situation de crise chronique de nombreux systèmes irrigués, de dépendance en particulier financière à des ressources extérieures, pose problème vu les attentes dont fait l'objet l'irrigation pour les années à venir, la limitation de la ressource en eau d'irrigation prévue, les sommes investies et les perturbations induites sur les systèmes de production antérieurs. La recherche est alors interpellée sur la gestion de l'eau dans les systèmes irrigués, et plus précisément sur la viabilité de ces derniers.

1.3.1 de la gestion de l'eau à la viabilité des systèmes irrigués

Mais les besoins évalués pour l'irrigation consistent plus en une meilleure utilisation des systèmes irrigués déjà existant que en une extension des surfaces irriguées : "l'accent devrait moins être mis sur l'extension des surfaces irriguées que sur une meilleure gestion de celles existant, dans des conditions plus difficiles et avec davantage de contraintes" (Verdier, 1995). Cette "meilleure" utilisation veut dire le plus souvent économie de la consommation d'eau, plus grande efficacité de cette consommation en terme d'eau arrivant réellement à la plante ou encore limitation de la dégradation de l'environnement induite par l'irrigation. Selon les cas observés et en tenant compte des spécialités des experts envoyés au chevet des systèmes irrigués, la demande de compréhension de la viabilité des systèmes irrigués se décline selon différents modes, selon différents "problèmes" identifiés, comme l'exprime la Figure 3. Comme le précisent de nombreux auteurs depuis une quinzaine d'années, les systèmes irrigués demandent maintenant des approches de différentes origines et plus seulement d'hydraulique agricole (Chambers, 1981).

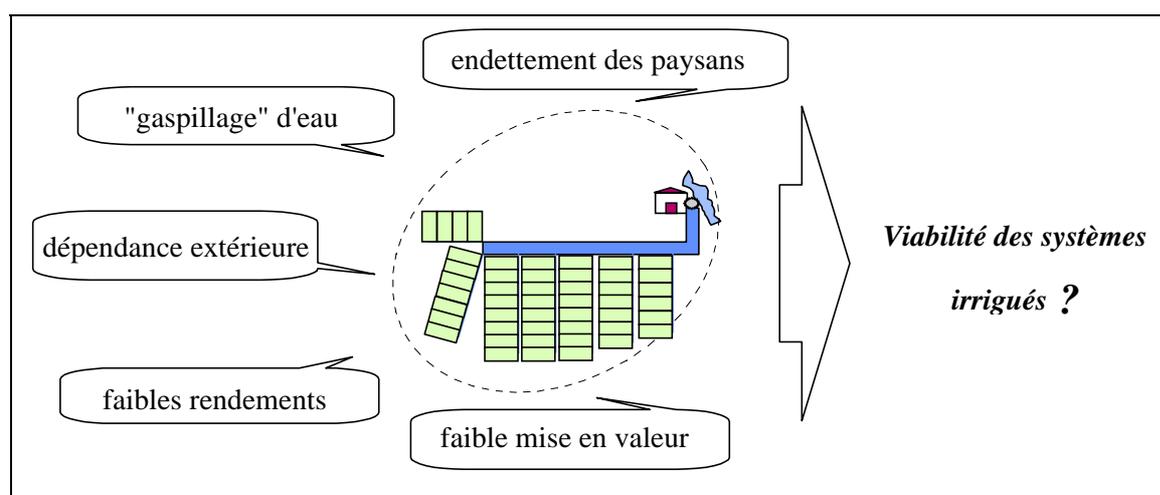


Figure 3 : différentes questions sur la viabilité des systèmes irrigués.

Les questions qui se posent alors sont : *quelle gestion de l'eau adopter pour résoudre ces problèmes et aller vers cet objectif de meilleure utilisation des systèmes irrigués ?*

Cela revient à se poser des questions sur l'effet d'un mode de gestion donné sur chacun de ces facteurs à améliorer. La grande quantité d'indicateurs relevés par Rao (1993) dans la littérature donne une bonne idée de la complexité de la tâche pour qui voudrait s'atteler au lien entre la gestion de l'eau et l'ensemble de ces indicateurs. La question se subdivise en plusieurs sous-questions telles que : sachant que 10 % des terres irriguées souffrent de salinité et qu'un million d'hectares aménagés est perdu chaque année (von Urff, 1994), quel est le lien entre un type de gestion de l'eau et l'évolution de la salinité du sol ? quelle gestion de l'eau à la parcelle pour améliorer ce que Bos et Nugteren (1990) appellent l'efficacité d'application de l'eau²³ ? ou encore quelles techniques d'irrigation utiliser pour diminuer la consommation d'eau ?

Ces questions sont destinées à mieux comprendre certaines facettes du fonctionnement d'un système irrigué en particulier liées à la circulation de l'eau dans les canaux et dans les sols. Elles laissent en suspens d'autres questions, posant d'ores et déjà le problème de leur coordination avec celles-ci. En particulier, les différents objectifs auxquels elles sont censées répondre sont-ils compatibles ? Et quelles seraient les conséquences pour les autres questions déjà posées d'une gestion de l'eau améliorant des indicateurs correspondant à ces objectifs dans un contexte où les problèmes des systèmes irrigués sont aussi des questions d'endettement, de non rentabilité, de besoins d'activités complémentaires ?

Ceci conduit dans une deuxième étape à s'intéresser au système irrigué comme le lieu non seulement d'un flux d'eau mais aussi de flux financiers. Il s'agit donc aussi d'approfondir la gestion financière des systèmes irrigués et en particulier les questions relatives aux dysfonctionnements observés tels qu'endettement généralisé et évaporation de fonds de roulement.

Dans cette optique une nouvelle question posée au monde de la recherche est : *Quels outils économiques mettre en place et quels modes d'organisation proposer pour des systèmes irrigués économiquement viables ?*

Cette question se subdivise également en plusieurs sous-questions sur lesquelles de nombreuses équipes travaillent à l'heure actuelle : comment garantir une autonomie

²³ C'est à dire la proportion de l'eau entrant dans la parcelle directement utilisée par la plante.

financière des systèmes irrigués ? quelle réglementation mettre en place ? comment transférer des aménagements gérés par l'Etat aux usagers ? quel système de crédit mettre en place ?

Ces questions sont destinées à accroître les connaissances correspondantes sur les systèmes irrigués. Elles correspondent en fait le plus souvent à une recherche d'efficience économique, c'est pourquoi leur traitement est alors orienté vers des analyses en termes d'équilibre budgétaire, de profit ou de fonctions d'utilité. Cependant ces questions s'intéressent aussi aux impacts de modes de gestion en termes d'équité (Tsur et Dinar, 1995), même si comme pour les indicateurs de performance, on rencontre plusieurs bases d'évaluation de l'équité. Dans ces conditions, la cohérence entre eux de modes de gestion qui en découleraient n'est alors pas certaine, pas plus que leur "acceptabilité sociale".

Des réponses à ces questions accroissent la connaissance sur les systèmes irrigués mais, appliquées telles quelles, risquent d'arriver au mieux à de nouvelles méthodes de gestion de système irrigué. Certes ces méthodes pourraient être spécifiées selon une typologie de systèmes irrigués. Mais pourquoi le catalogue qui en résulterait serait-il le bon alors que ces questions sont partielles et qu'elles n'ont pas nécessairement un sens pour les usagers des systèmes irrigués ? Leur principale limite, dans une perspective de "recherche pour le développement"²⁴ tient en ce qu'elles proposent des modifications, pour une réhabilitation par exemple, essentiellement en fonction de points de vue et d'analyses externes alors que l'une des difficultés mise en évidence est déjà une forte dépendance vis-à-vis de l'extérieur. En conservant l'exemple d'une démarche de réhabilitation, les modifications apportées intégreront au moins en partie des solutions d'origine externe au système irrigué. Même dans le cas de démarches participatives, l'initialisation et l'interprétation sont le plus souvent exogènes : les entretiens et débats avec les "populations bénéficiaires" ou les "partenaires" passent par le filtre d'une traduction en un programme de réhabilitation conçu en grande partie par des acteurs extérieurs au système. Ainsi de nombreux éléments du système irrigué peuvent finalement ne pas être pris en compte.

Il n'en demeure pas moins que toutes ces questions sont importantes et doivent être considérées par qui veut comprendre le fonctionnement d'un système irrigué. Comment les

²⁴ Ce qui n'est pas nécessairement la perspective dans laquelle les travaux auxquels il est fait référence sur ces questions sont conduits.

prendre en compte²⁵ sans arriver sur une tâche d'une ampleur inconsiderée ? Quel est leur plus grand dénominateur commun ?

En fait ce qui a amené ces questions, la recherche d'une "meilleure gestion des surfaces irriguées existantes", peut se poser aussi de la manière suivante : comment faire en sorte qu'un système irrigué donné continue à fonctionner. La continuité du fonctionnement implique que l'évolution du milieu laisse celui-ci possible, que ce fonctionnement soit satisfaisant pour ceux qui en sont le moteur et que les liens avec l'extérieur du système ne le bloquent pas.

D'où la question constituant la problématique au sein de laquelle se situe cette thèse :

Quelle est l'influence des modes d'organisation et de gestion d'un système irrigué sur sa viabilité ?

Avant d'aller plus loin il est nécessaire de préciser quelques définitions de termes contenus dans cette question et d'explorer les conséquences de la question retenue.

1.3.2 Quelques définitions

L'un des mots clé de cette question est celui de *viabilité*. Plusieurs définitions, plusieurs utilisations existent. Pour le dictionnaire Le Petit Robert, il est utilisé depuis 1939 dans le sens de "caractère de ce qui est viable, peut vivre, se développer".

Ce terme est parfois utilisé dans la mouvance du concept de développement durable développé dans le rapport Brundtland : "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs" (CMED, 1989). Cette approche a tendance à opposer l'écologique à l'humain, à les poser *a priori* en situation de conflit, il s'agirait de trouver le moins mauvais chemin entre perte de bien-être à venir et dégradation du milieu naturel. Elle considère en fait les interactions entre deux sous-systèmes plutôt qu'entre leurs composantes, selon la représentation de gauche de la Figure 4 plutôt que selon la représentation de droite.

²⁵ Ce qui ne veut pas dire les résoudre ! Les prendre en compte signifie qu'elles ne peuvent être mises de côté sans une réflexion préalable.

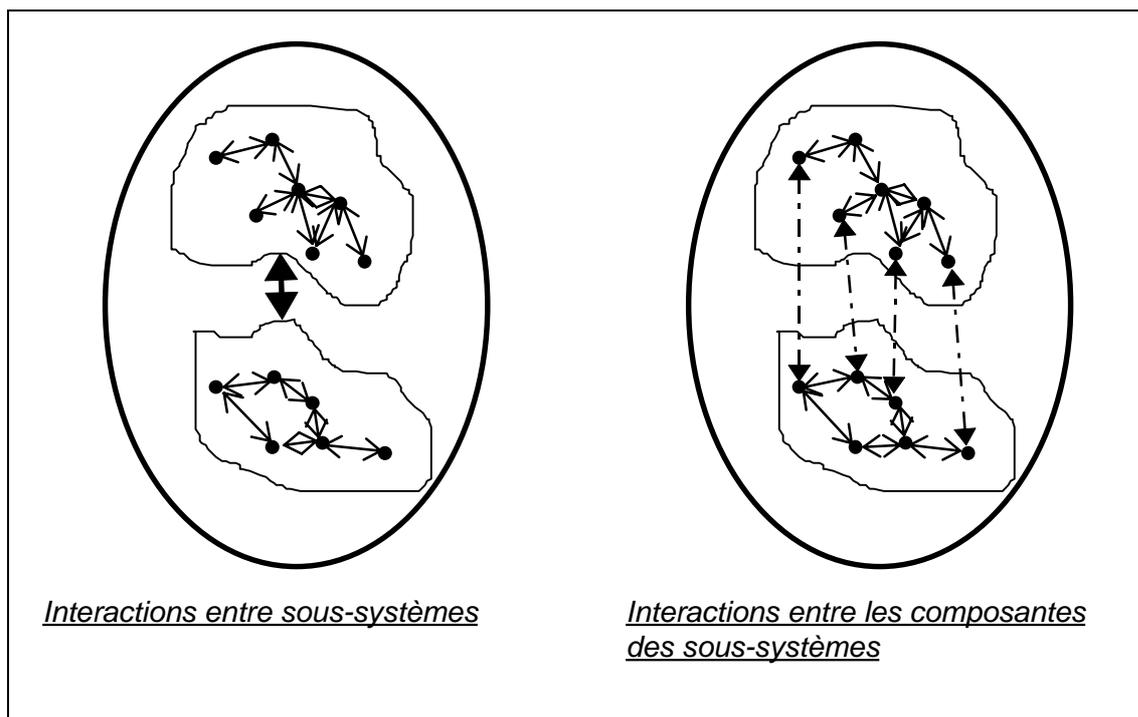


Figure 4 : deux approches différentes pour la prise en compte des interactions

Or c'est à ce niveau qu'ont le plus souvent lieu les interactions, par une relation de connivence entre les hommes et le milieu qui les entoure et l'élaboration de stratégies s'adaptant aux variabilités que rencontrent ceux-ci quelles qu'elles soient (Henry, 1987 ; Weber et al., 1990 ; Weber, 1995). C'est pourquoi il est intéressant de regarder les usages de ce terme faits par les "systémiciens" puis les mathématiciens des systèmes dynamiques aujourd'hui.

Pour Ashby et les cybernéticiens (Kauffman, 1989) tout comme pour la métaphore de la théorie mathématique de la viabilité (Aubin, en préparation), la viabilité est la propriété d'un système dynamique dont une partie des variables, "variables d'état" dans les termes employés par Aubin, "variables essentielles" pour Ashby, reste incluse dans certaines limites, appelées "contraintes de viabilité" par Aubin, pouvant évoluer avec le temps. Les variables d'état permettent de décrire l'état du système et évoluent en fonction des variables de régulation²⁶. Ces variables de régulation n'évoluent *a priori* que si la viabilité du système est en jeu. Le système évolue alors en fonction des contraintes de viabilité.

En ce qui nous concerne, nous retiendrons la définition suivante :

La viabilité d'un système est sa capacité à continuer à fonctionner pour des conditions initiales particulières et dans un contexte donné.

²⁶ Selon la nature du système représenté, il peut s'agir des prix ou des codes culturels par exemple.

Définition 2 : viabilité

C'est-à-dire, pour des conditions aux limites données, existe-t-il une trajectoire viable ? Il ne s'agit pas de savoir si un système est viable dans l'absolu mais si pour des "conditions aux limites" particulières, il est possible que le mouvement du système aille dans une direction viable. Remarquons que cette définition est en fait relative à une perception donnée du système, le même système pourra être viable pour certaines contraintes de viabilité et pas pour d'autres, pour un point de vue particulier sur le système et pas pour un autre.

L'autre terme clé de la question posée est celui de "mode d'organisation". Le Petit Robert propose plusieurs sens à "organisation". C'est à la fois l'action d'organiser, le résultat de cette action et une "association qui se propose des buts déterminés". L'organisation est à la fois un état et une dynamique : l'état renvoie souvent à la notion de groupes structurés, entreprise, association ou administration, et la dynamique le processus de coordination des comportements pour une action collective (Friedberg, 1993). Cet aspect dynamique entraîne en particulier des points de vue sur les organisations fondés sur les interactions entre les membres et les jeux de pouvoir (Crozier et Friedberg, 1977). Ainsi, pour Morin (1977), c'est "l'agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité complexe ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus".

Cet "agencement" n'est pas nécessairement transitoire ni propre à une action collective particulière. La constitution d'un jeu de relations pour une tâche donnée et sa disparition cette tâche étant terminée est un cas particulier de mode d'organisation : "l'adhocratie" (Mintzberg, 1982). De la même manière, le point de vue statique en organisation structurée sur le modèle de l'entreprise ou de l'administration est un autre cas particulier. Les dynamiques d'interaction peuvent également résulter sur des états, tels que des réseaux d'acteurs complémentaires, qui ne correspondent à aucun de ces modèles (Callon, 1989).

La notion de relations entre composants est très importante dans le cadre de définition d'un système irrigué retenu. Telle quelle cette définition est encore un peu restrictive car il ne s'agit pas seulement de l'agencement des relations entre les composants mais aussi de leurs relations avec l'environnement du système. Cet agencement est dynamique et peut résulter sur diverses formes plus ou moins structurées.

C'est pourquoi on retiendra pour la question posée qu'un mode d'organisation est :

une manière de mettre en relation les composants d'un système entre eux et avec leur environnement.

Définition 3 : mode d'organisation

Cette définition inclut bien sûr la question de la coordination entre les différents acteurs et groupes d'acteurs du système, à l'origine de l'évolution des modes d'organisation.

La question posée revient alors à tester la viabilité résultant de différents modes d'organisation dans les systèmes irrigués et à chercher si il en existe des caractéristiques particulières pouvant donner des indications *a priori* sur la viabilité du système irrigué, pour un point de vue donné sur les systèmes irrigués lié à la définition proposée au § 1.2.

1.3.3 Cette problématique nécessite des méthodes spécifiques

Cette question, associée à ces définitions, implique des besoins de développement d'outils de représentation des systèmes irrigués et de connaissances sur ces systèmes irrigués.

Mais en même temps que l'outil il faut aussi définir un cadre d'analyse, c'est-à-dire un guide pour l'appréhension du système complexe²⁷ que constitue le système irrigué. Parmi toutes leurs composantes, sous quel angle observer et représenter différents modes d'organisation d'un système irrigué ? L'interaction entre une dynamique naturelle et une dynamique sociale nécessite en particulier la mise en place d'un cadre d'analyse adéquat qui devra éviter l'écueil d'une dominance de l'une des deux dynamiques *a priori*, et se poser la question des raisons d'une telle dominance le cas échéant. C'est pourquoi on s'orientera vers des travaux menés pour d'autres ressources où la "co-évolution" (Weber, 1995) d'une dynamique naturelle et d'une dynamique sociale sont aussi en œuvre.

Il est impossible de tester des modes d'organisation sur des systèmes irrigués en grandeur nature. En effet, même s'il était possible de s'affranchir des difficultés dues à la durée de ces tests, à l'ampleur des moyens nécessaires, il n'en resterait pas moins que ces observations se feraient sur des systèmes complexes et donc impossibles à décomposer en processus élémentaires. Il convient de mettre en place un outil permettant de tester des hypothèses sur le fonctionnement des systèmes irrigués dans le cadre de la question posée, avec une condition de reproductibilité des expériences.

²⁷ Un système est complexe s'il ne peut être décomposé et reconstruit à partir d'éléments simples et indépendants, par opposition à un système compliqué qui est démontable en un ensemble fini de pièces. Aborder la complexité d'un système revient à s'intéresser aux articulations entre ses différentes composantes et leur ensemble. (d'après Weinberg, 1995).

Il s'agit de mettre au point une démarche vérifiant les conditions précédentes et permettant d'aborder la problématique relative aux liens entre modes d'organisation et viabilité des systèmes irrigués puis, en la mettant en œuvre dans le cas de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal, de tester sa pertinence pour traiter ce type de question.

C'est là l'objectif principal de cette thèse : ***mettre au point une démarche d'étude des systèmes irrigués et la mettre en œuvre afin de vérifier sa pertinence pour traiter la question des liens entre modes d'organisation et viabilité des systèmes irrigués.***

Avant de présenter le cadre d'analyse et l'outil retenu, il est temps de faire un détour vers les différentes approches ayant déjà été mises en œuvre autour de cette question ou de questions voisines, en particulier celles répondant spécifiquement à certaines des questions particulières posées au paragraphe précédent. Celles-ci, dans leur diversité, constituent la richesse de l'étude des systèmes irrigués.

2. Etat des connaissances autour de cette question

La question des liens entre modes d'organisation et viabilité des systèmes irrigués posée au § 1.3.1 a déjà attiré un grand nombre de chercheurs au Sénégal et ailleurs, par des approches thématiques pointues aussi bien que des approches intégrées ou interdisciplinaires, parfois les deux cumulées.

2.1 Des approches thématiques pointues

La question de la viabilité des systèmes irrigués sous l'influence des pratiques de gestion mises en œuvre est souvent traitée selon une composante du système. Elle est exposée globalement puis traitée en fonction d'un problème particulier observé, dépendant des cas d'études et des spécialités des scientifiques concernés. Il s'agit de travaux thématiques ayant pour objectif de contribuer à mieux comprendre des éléments entrant en compte dans la viabilité des systèmes irrigués. Ces différentes composantes sont ici classées en trois catégories aux limites relativement diffuses : approches liées à la maîtrise et à la distribution de la ressource en eau, approches liées à l'allocation des différentes ressources utilisées dans un système irrigué, approches s'intéressant aux relations sociales en œuvre au sein de systèmes irrigués. Toutes ces approches débouchent sur une multiplicité de points de vue sur les systèmes irrigués.

2.1.1 pour la maîtrise et la distribution de la ressource en eau

Ces approches posent le problème de la viabilité du système irrigué à partir de la gestion de trois types de composants physiques du système irrigué : l'eau, le réseau de canaux avec ses différents ouvrages, les sols.

L'eau

Il s'agit d'abord de préserver la ressource en eau en limitant sa consommation et en l'utilisant mieux. La viabilité est ici vue sous l'angle de l'assurance de l'approvisionnement en eau du système. Cette question de maîtrise de la ressource concerne aussi la sensibilité d'un aménagement au contexte dans lequel il se trouve du point de vue du climat et de la disponibilité éventuelle de réserves d'eau souterraines. Par exemple quelle est la sensibilité d'un réseau de réservoirs à un changement climatique (Schnaydman, 1993) ? Il s'agit là d'améliorer la viabilité en cherchant à adapter le moyen d'acquisition de la ressource aux conditions du milieu.

Au sein de la base de données sur les projets de recherche en irrigation et drainage IPTRID²⁸ (IPTRID, 1996), plusieurs projets abordent la viabilité des systèmes irrigués sous l'angle d'une meilleure utilisation de la ressource en travaillant sur les méthodes de programmation / planification des irrigations. Cette programmation peut avoir lieu à plusieurs échelles différentes : le périmètre, l'ensemble de la superficie irriguée dépendant d'un même canal secondaire ou d'un même irrigateur, l'exploitation, la parcelle. Ces échelles ne sont pas pertinentes dans tous les cas, mais peuvent l'être. Pour l'aménagement ou un ensemble de parcelles dépendant d'un même canal, il s'agit en fait de la question de l'allocation de l'eau entre les usagers. De nombreuses méthodes existent dans les aménagements avec des paysans ayant de faibles superficies devant la taille du périmètre (Burton, 1989) : répartition du débit en proportion de la surface cultivée, tour d'eau strict connu par exemple en Inde et au Pakistan sous le nom de warabandi (Malhotra, 1982), besoins des plantes relevés chaque semaine par des ayguadiers, répartition proportionnelle à la surface multipliée par un facteur dépendant des besoins de la plante, assisté par un ordinateur.

A l'échelle de l'exploitation, il s'agit cette fois de sélectionner l'usage qui est fait de l'eau en fonction des besoins des différentes cultures. Cette problématique concerne peu les systèmes irrigués rencontrés au Sénégal où dans chaque système irrigué la plupart des irriguants n'ont qu'une seule parcelle. A l'échelle de la parcelle enfin, dans le cadre fixé par la règle d'allocation de l'eau, il existe encore différentes méthodes (Hill et Allen, 1996) : selon l'activité des voisins, selon le stress observé de la plante, selon le tour d'eau, selon une estimation de la teneur en eau du sol ou encore selon un suivi du bilan en eau du sol. Burton comme Hill et Allen conclue à la nécessité de règles de programmation des irrigations simples, ne nécessitant pas de collecter beaucoup d'informations et n'utilisant pas d'outil compliqué, aussi bien au niveau collectif qu'au niveau de chaque parcelle.

Ces travaux sur la planification des irrigations en induisent d'autres, d'une part vers la compréhension des processus physiques en particulier pour ajuster au mieux les irrigations aux besoins en eau des cultures, d'autre part vers la mise au point de nouveaux équipements facilitant la mise en place de nouvelles méthodes de planifications des irrigations. Parmi ceux-là, certains ont montré que la précision temporelle des irrigations a beaucoup plus d'effets sur la variabilité d'une production rizicole que le volume appliqué (Meinzen-Dick, 1995), justifiant ainsi les travaux sur la programmation des irrigations.

²⁸ Base de données internationale sur la recherche en irrigation et drainage.

Le réseau de canaux et les ouvrages

Le réseau de canaux et les ouvrages de prise et de régulation dont il est équipé constituent également un ensemble de biens à gérer au sein du système irrigué. La base de données de l'IPTRID contient de nombreuses références à des projets de recherche abordant des questions relevant de la viabilité des systèmes irrigués sous cet angle. L'objectif est d'avoir et de conserver un réseau amenant l'eau correctement aux parcelles et de limiter les pertes d'eau au cours du transport.

Un premier élément pris en compte à ce niveau est l'état des canaux. Les canaux sont le plus souvent en terre. Il se pose alors la question de l'intérêt d'un revêtement en ciment pour améliorer leur performance hydraulique en particulier en diminuant les pertes par infiltration le long du canal et en diminuant la perte de charge le long du canal. Plusieurs auteurs observent que ces résultats attendus ne sont pas obtenus ou alors seulement les toutes premières années de mise en place du canal (Goldsmith et Makin, 1989 ; Murray-Rust et Vander Velde, 1994).

Cependant des cas d'envasement et d'enherbement des canaux en terre sont fréquemment observés. Ceci pose une double question : quelles sont les conséquences de la dégradation des canaux pour la viabilité d'un système irrigué d'une part, quelle maintenance mettre en œuvre d'autre part. La première question a été relativement peu traitée jusqu'à présent à part dans des études empiriques ponctuelles permettant de caler un coefficient de Manning-Strickler (Murray-Rust et Vander Velde, 1994).

La gestion du réseau hydraulique est aussi abordée sous l'angle de la gestion et de la régulation des canaux. Des modèles sont développés de manière à simuler les écoulements le long du réseau pour pouvoir mieux satisfaire la demande en eau, ainsi que les transports solides afin de limiter la sédimentation (Baume et al., 1993).

Au delà de la maintenance se pose enfin la question de la réhabilitation des systèmes irrigués que nous avons vue fréquente (Dedrick et al., 1989). Ces opérations, menées par des ingénieurs, touchent le plus souvent d'abord une remise en état des moyens d'accès à l'eau, de distribution de l'eau et éventuellement de drainage (Eilander, 1996). Le jeu Irrigation Rehab²⁹ demande à ses participants en premier lieu de résoudre les problèmes d'approvisionnement en eau et de drainage (Steenhuis et al., 1989).

²⁹ Le jeu Irrigation Rehab (Steenhuis et al, 1989) a été développé pour faire jouer des équipes multidisciplinaires afin de proposer sur un cas imaginaire un plan de réhabilitation.

Les sols

Enfin, les systèmes irrigués comportent une autre ressource aussi importante que l'eau pour leur viabilité : les sols. En fonction de la gestion de l'eau en surface, de la composition de celle-ci et de leur nature, différents processus de dégradation peuvent apparaître : salinisation, sodisation, alcalinisation (Boivin et al., 1995). Il s'en suit deux voies de recherches : une meilleure compréhension des processus en œuvre d'une part, la relation entre des modes de gestion de l'eau à l'échelle de la parcelle comme à celle du canal et l'activation de ces processus d'autre part.

Plusieurs processus sont en œuvre dans l'évolution de la salinité d'une parcelle : remontées capillaires, dynamique de la nappe, concentration sur la parcelle des sels contenus dans l'eau d'irrigation quand celle-ci s'évapore³⁰. Le cas de la riziculture est particulier : le riz étant inondé, il n'y a pas de remontées capillaires pendant la mise en culture et les sels présents dans la zone racinaire sont lessivés. Par contre, sauf en cas de drainage, toute quantité de sels apportée par l'eau d'irrigation reste sur la parcelle. Des recherches menées dans ces conditions dans le Delta du Sénégal montrent que pour des périmètres rizicoles, les processus intervenant dans la salinisation observée des parcelles sont les remontées capillaires entre les campagnes et les apports de sel par l'irrigation (Ceuppens et al., 1997). Mais ces processus dépendent en fait des pratiques agricoles et en particulier de la gestion de l'eau à l'échelle du système irrigué d'une part et de la parcelle d'autre part.

Ceci renvoie à la deuxième gamme de travaux sur la salinisation : comment contrôler cette évolution du sol en particulier par la gestion de l'eau. Par exemple, une irrigation de surface associée à des drainages de contrôle du niveau de la salinité est efficace pour enlever les sels dans les horizons superficiels du sol (Raes et al., 1995). D'autres équipes s'intéressent au bilan hydro-salin à l'échelle régionale en fonction de scénarios d'aménagement et d'exploitation (Senghor, comm. pers) ou à l'échelle du périmètre en fonction de scénarios de gestion du réseau principal (Kuper, 1997). Il y a ici un premier recoupement avec des questions traitées auparavant : quelle est la cohérence des différentes recommandations de planification d'irrigation pouvant apparaître ? La gestion de l'eau, et les différents acteurs qui la mettent en œuvre, sont au nœud de cette intersection. C'est pourquoi il est intéressant de s'orienter de ce côté pour une approche de la viabilité d'un système irrigué, avec ces études techniques en mémoire.

³⁰ La composition de l'eau en sels dissous conduit vers une voie d'évolution de la salinité du sol ou une autre.

Une des composantes souvent prise en compte pour la viabilité des systèmes irrigués concerne le développement de la plante en relation avec l'approvisionnement en eau au sein du système irrigué. La recherche s'oriente vers des itinéraires techniques plus intensifs, plus souples et plus diversifiés comme dans la Vallée du Fleuve Sénégal (Jamin, 1995). En particulier les questions relatives à l'élaboration du rendement en itinéraire intensif sont assez complexes car elles doivent prendre en compte de nombreux facteurs (Poussin, 1995). Il semble pour le moment difficile de les prendre en compte dans une optique de gestion d'un système irrigué : les conséquences des modifications d'un facteur sur l'ensemble du processus sont encore mal connues.

La plupart de ces travaux débouchent sur ou sont mis en forme dans des modèles. Ces modèles sont souvent considérés comme des outils d'aide à la décision devant servir de support en général pour le gestionnaire d'un canal ou du système irrigué dans son ensemble. Ce sont en particulier des modèles de simulation de manœuvres d'ouvrages ou de règles d'allocation de l'eau (Dhillon et Paul, 1988). Cependant la plupart ne sont pas utilisés seuls, ils demandent des informations sur les usages effectifs ou prévisibles d'eau. Ils sont associés à d'autres outils issus notamment d'approches économiques de la gestion de l'eau dans les systèmes irrigués.

2.1.2 pour l'allocation de plusieurs ressources

Une large part des travaux sur les liens entre gestion et viabilité des systèmes irrigués prennent un point de vue basé sur l'allocation des ressources nécessaires à leur fonctionnement, il s'agit pour l'essentiel de travaux prenant une perspective issue de la discipline économique. Outre la ressource en eau, les systèmes irrigués font appel largement à des ressources en capital sous forme d'investissement lors de leur aménagement et dans leur usage ainsi qu'en travail dans leur mise en œuvre (Carruthers et Clark, 1981). Il se pose alors la question de l'allocation de ces ressources, en partie substituables l'une par l'autre, pour et au sein d'un système irrigué. Cette allocation peut se faire pour différents objectifs : efficacité économique, équité et viabilité.

des objectifs d'efficacité économique

L'efficacité économique est relative à l'estimation de la rentabilité du système irrigué pour un mode de gestion particulier. Même s'il s'agit toujours d'une analyse coût / bénéfice, plusieurs modes d'évaluation de la rentabilité existent : prise en compte des coûts

d'opportunité relatifs aux autres usages des ressources, répartition de la rente entre les différents acteurs concernés, évaluation d'indicateurs physiques.

Pour chacune de ces ressources, il se pose la question de leur usage pour le système irrigué alternativement à d'autres usages : autres investissements, autres usages de l'eau, autres répartitions de la force de travail disponible. Cette question des coûts d'opportunité se pose pour chaque paysan individuellement comme pour le système irrigué dans son ensemble. Ces autres usages peuvent aussi bien concerner d'autres systèmes irrigués que d'autres activités, agricoles ou non, lucratives ou non. Ce point de vue implique donc *a priori* de prendre en considération de nombreuses interactions entre le système irrigué et son environnement, ce qui rend son analyse plus difficile. Cette question de coût d'opportunité est particulièrement importante pour l'allocation de la ressource en travail, pourtant peu traitée dans les études économiques de systèmes irrigués. Celle-ci est en effet soit du ressort des paysans soit du ressort du gestionnaire du système irrigué. Les paysans disposent d'une main d'œuvre familiale évoluant dans le temps qu'ils répartissent entre plusieurs tâches (Tchayanov, 1924) parmi lesquelles se trouvent des actions sur une ou plusieurs parcelle irriguée et éventuellement sur le réseau du système irrigué. Mais pour ces approches le périmètre irrigué n'est pas l'échelle d'étude adéquate. A la représentation de la figure 2 il faudrait substituer celle de la Figure 5. Ce point de vue sur un système irrigué où la question de la disponibilité en main d'œuvre ne pose pas de problèmes revient à faire implicitement l'hypothèse que, dans la mise en œuvre d'un système irrigué, le travail n'est pas collectivement une ressource rare et sort donc du champ de l'économie. Ce point de vue est à associer à la représentation fréquemment rencontrée de paysans mono-actifs n'ayant que leurs parcelles à s'occuper, ce qui est loin d'être le cas dans certains systèmes irrigués, en particulier dans la vallée du Fleuve Sénégal. La main d'œuvre disponible est souvent un facteur limitant, notamment dans les régions sahéliennes (Mathieu, 1995).

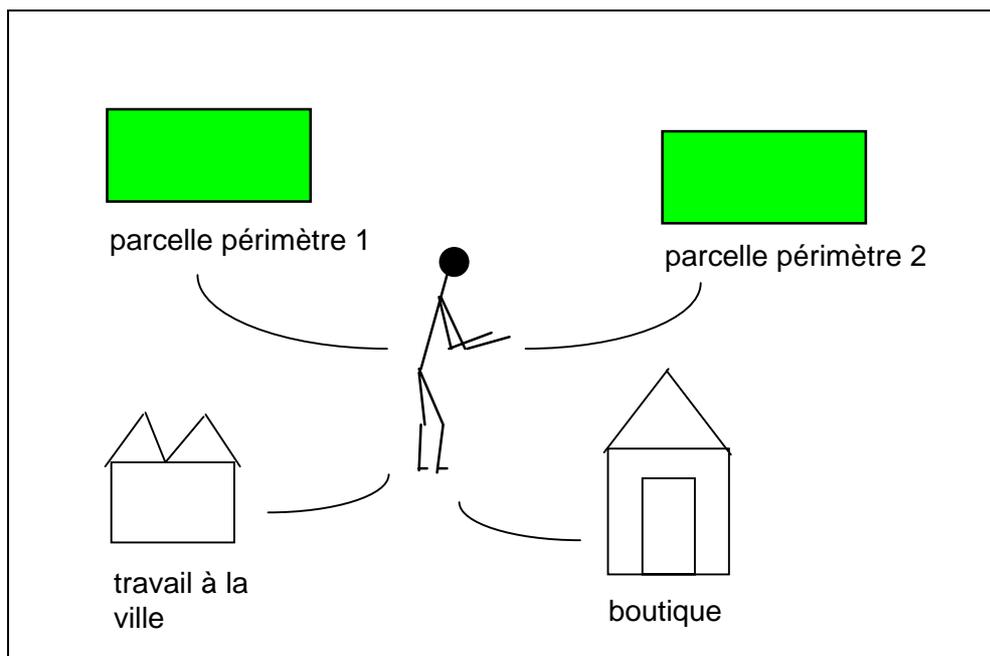


Figure 5 : représentation de la problématique de la répartition du travail d'un paysan

Les marchés de l'eau, sous des hypothèses assez fortes et non vérifiées au Sénégal et dans la plupart des pays en développement³¹, constituent un cadre pour la réallocation permanente ou temporaire de la ressource en eau entre les différents usagers *via* des transactions marchandes d'eau ou de droits d'eau (Strosser et Rieu, 1993). En tant que tel, ils viennent nécessairement en complément d'autres outils de gestion permettant une première allocation de l'eau. L'objectif est alors d'atteindre une meilleure efficacité économique du système irrigué (Strosser, 1997), au sens d'une maximisation du bénéfice net total (Tsur et Dinar, 1995). La régulation de l'allocation de l'eau pour de tels marchés commence à se mettre en place dans quelques systèmes irrigués notamment en pays industrialisés (Strosser, 1997).

L'évaluation de l'efficacité passe par le calcul des coûts et des bénéfices. Mais une bonne détermination des coûts n'est ni aisée ni unique : ainsi pour l'évaluation *ex ante* de choix entre diverses alternatives d'aménagement, Cordeiro Netto relève différentes méthodes d'analyse des coûts : un objectif d'équité ou de conservation du patrimoine est parfois explicitement pris en compte, différentes méthodes sont utilisées pour corriger dans l'évaluation les erreurs dues aux distorsions du marché (de Moraes Cordeiro Netto, 1995).

³¹ Les marchés de l'eau ne peuvent s'appliquer que pour des systèmes irrigués dans lesquels les usagers peuvent spécifier et modifier leur demande en fonction du prix de l'eau et de leurs besoins. Des conditions nécessaires de fonctionnement et d'efficacité économique des marchés de l'eau concernent également la rareté de l'eau, la liberté d'entrer ou de sortir du marché pour tout vendeur ou acheteur, la prise en compte des externalités.

L'investissement initial est une dépense *a priori* à l'échelle du système dans son ensemble, même si elle peut être répartie entre les différents acteurs. De même les coûts de maintenance se situent pour la plupart à l'échelle du système parce qu'ils concernent des équipements communs aux différents acteurs du système. Ces financements viennent pour la plupart de l'extérieur du système. Les coûts de fonctionnement pour la mise en œuvre des campagnes agricoles existent aussi bien au niveau collectif pour le fonctionnement des équipements communs et au niveau individuel pour les achats d'intrants. Le retour des bénéfiques peut aussi être fortement décalé dans le temps. Même si c'est le même niveau d'organisation qui perçoit les bénéfiques de coûts qu'il a consentis, par exemple le gestionnaire, le pas de temps du retour sur l'investissement peut-être long devant l'horizon d'évaluation de celui-ci, par exemple la durée de son poste s'il s'agit d'un fonctionnaire. Différents types d'acteurs, paysan, gestionnaire et Etat, sont impliqués dans un système irrigué et ne sont pas toujours pris en compte de la même manière, avec les mêmes poids relatifs. La question du pas de temps dans l'évaluation de l'équilibre budgétaire se pose en particulier : une grande partie des coûts ont lieu au début de la vie du système irrigué pour des revenus arrivant au cours de cette vie, ainsi se posent des questions relatives à l'équilibre à mettre en place entre investissement et entretien optimal du réseau et ses conséquences sur la rente économique (Chakravorty et al., 1995).

Encore faut-il qu'il y ait des bénéfiques... La somme des revenus directs attendus aux différents niveaux d'organisation du système irrigué atteint rarement les coûts de fonctionnement et d'entretien additionnés de l'investissement initial (Sengupta, 1993). L'efficience peut alors être évaluée selon des indicateurs physiques tels que la proportion d'eau effectivement utilisée par la plante par rapport au volume pompé (Rao, 1993).

des objectifs d'équité

Dans ce contexte de faible rentabilité des aménagements hydro-agricoles, d'autres objectifs que l'efficience économique se rencontrent pour la gestion des systèmes irrigués. Les investissements initiaux venant de l'Etat ou de bailleurs de fonds extérieurs au système, un objectif souvent rencontré est lié au concept d'équité. Ces objectifs ont donné lieu à la mise en place d'outils de gestion spécifiques.

Plusieurs principes d'équité sont utilisés dans les systèmes irrigués. Tout d'abord au moment de l'affectation de terres aménagées, la superficie attribuée peut dépendre du niveau de participation à l'aménagement en travail et / ou en capital. Ce principe d'équité par rapport à l'investissement initial se rencontre aussi pour l'affectation des droits d'eau initiaux ou lors de réhabilitations (Scheer, 1996). L'équité peut aussi être évaluée en fonction de la

capacité supposée du bénéficiaire à utiliser la part de la ressource qui lui est allouée ou de ses besoins. Par exemple on rencontre parfois lors de l'affectation des terres des règles du type : "1 ha par foyer comportant au moins deux actifs" (Scheer, 1996). L'équité est évaluée pour la distribution des revenus liés à l'arrivée de l'irrigation : l'allocation de la ressource en eau peut alors dépendre de la culture faite par chaque paysan et du stade cultural de celle-ci, l'eau sera allouée en priorité à celui qui risquerait la plus grosse perte en revenu s'il ne recevait pas l'eau. Pourtant, la variabilité des revenus entre les paysans se trouve généralement accrue par l'arrivée de l'irrigation, sauf s'il ne s'agit que d'irrigation de complément (Rosegrant, 1992).

Quelques outils de gestion spécifiques prennent en compte explicitement un principe d'équité. Ainsi on trouve des modes d'attribution de l'eau par quota tels que : à chacun le même volume en fonction ou non de sa superficie ou de la culture, à chacun un volume correspondant à une participation initiale dans l'aménagement par exemple en travail. Des outils de type fiscaux permettent également dans certains cas de redistribuer les revenus pour compenser des accès à la ressource inéquitables (OCDE, 1994).

des objectifs de viabilité de la ressource en eau et du système irrigué

Enfin une troisième gamme d'objectifs s'intéresse plus spécifiquement aux externalités engendrées par l'usage de l'eau dans les systèmes irrigués, externalités entre acteurs différents et / ou à des moments différents.

Les questions relatives aux externalités négatives engendrées par l'usage de l'eau pour l'irrigation sont nombreuses : augmentation mal connue des maladies liées au développement de l'irrigation (Robert et al., 1989 ; Handshumacher et al., 1995), pollution induisant des coûts de traitement pour la rendre potable à l'aval ou encore modification de sa composition en sels la rendant inadéquate à un usage agricole³². Ces externalités négatives peuvent également être quantitatives : elles concernent alors la diminution de volume ou de débit disponible à l'aval ou pour des campagnes agricoles ultérieures. Cette diminution éventuelle est due à un usage d'eau abusif par un système irrigué donné à une période donnée dans un contexte de rareté de la ressource en eau.

Les outils de gestion actuellement mis en œuvre se préoccupent essentiellement de cet aspect quantitatif des externalités. Ainsi les quotas limitent l'accès à la ressource à un niveau maximum. Ce niveau peut être une durée d'accès, un débit ou un volume

³² Ce qui peut modifier les processus en jeu dans l'évolution de la salinité des sols plus à l'aval.

(Montginoul, 1997). Ils peuvent être exclusifs ou transférables d'un paysan à un autre et/ou dans le temps. Certains de ces quotas correspondent en fait à des modes de programmation des irrigations tels qu'ils ont été présentés au § 2.1.1. Un des objectifs des quotas est explicitement une préservation de la ressource en limitant la consommation de chaque usager, sachant qu'un quota en durée peut donner lieu à des détournements *via* des surinvestissements en équipement.

Un autre outil de gestion, la tarification, se place dans ce contexte de viabilité, mais plutôt au niveau du système irrigué lui-même, même si elle peut avoir un impact sur le niveau d'utilisation de la ressource en eau. La tarification a pour objectif de faire payer l'eau aux usagers. Plusieurs structures tarifaires existent (Montginoul, 1997) : forfait dépendant de la superficie irriguée, fonction de la quantité d'eau consommée, taxes sur d'autres intrants ou sur la production agricole. Cet outil de gestion pose problème dans de nombreux pays où, selon la coutume ou la religion, l'eau ne peut faire l'objet de transactions marchandes. C'est alors le service de distribution de l'eau et les équipements qu'il nécessite qui sont facturés. L'objectif dans ce cas est d'inciter les paysans à un comportement particulier dans leur usage de l'eau. Ces incitation peuvent se situer dans le cadre d'un objectif de viabilité du système irrigué. Cet outil de gestion permet également de générer des ressources financières permettant de viser un équilibre budgétaire et une autonomie financière du système irrigué et ainsi d'augmenter les possibilités de reconstitution de l'aménagement à la fin de sa vie.

Limites pour une utilisation normative

Le passage des travaux sous-jacents aux outils de gestion présentés ci-dessus repose sur des hypothèses qui en marquent les limites et mettent en doute la pertinence d'une utilisation normative. Ces hypothèses concernent en particulier les comportements des acteurs pour estimer la consommation de ces différentes ressources qui résulteraient de choix de gestion donnés. Il s'agit généralement d'une modélisation agrégée des comportements des acteurs sur la base de comportements types pouvant le plus souvent se décrire comme la maximisation sous contrainte d'une utilité, *via* des méthodes de programmation linéaire (Boussard et Daudin, 1988). Dans le cas des systèmes irrigués, des limites apparaissent à cause de la multiplicité des objectifs réels des acteurs (Hatzius, 1994). Les problèmes d'accès et de diffusion de l'information imposent d'autres limites à ces outils. Les paysans ont besoin d'information avant la saison sur la disponibilité en eau à venir, les prix de vente des récoltes et durant la campagne sur les besoins des cultures et les réserves en eau disponibles (Jensen et Lord, 1990). Les gestionnaires peuvent avoir besoin

d'information sur la consommation d'eau réelle des paysans. La diffusion de l'information est loin d'être parfaite et les acteurs peuvent profiter de cette inégalité d'accès à l'information dans leur comportement. Les objectifs de gestion peuvent alors ne pas être atteints (Montginoul, 1997).

Cependant la modélisation économique a amélioré ces outils pour répondre à ces limites. Par exemple la théorie de l'agence permet de traiter les problèmes d'asymétrie de l'information entre niveaux d'organisation différents (Montginoul, 1997) tout en conservant le même type d'hypothèses sur les comportements des acteurs. La modélisation économique a aussi développé d'autres outils peu utilisés à notre connaissance dans le domaine de l'irrigation. Parmi ces derniers, mentionnons en particulier les applications économiques de la théorie mathématique de la viabilité qui permet un point de vue dynamique et de ne pas devoir poser certaines hypothèses, parfois peu réalistes, telles que l'existence d'un équilibre ou la centralisation des comportements (Aubin, 1997).

Comme les approches techniques exposées précédemment, ces approches basées sur l'allocation de la ressource cherchent à développer des outils d'analyse ou d'aide à la décision. Cependant ces outils ont besoin d'autres informations telle que l'offre en eau et sont donc associés à d'autres outils notamment issus des approches techniques exposées au § 2.1.1.

Ces approches orientées vers les questions d'allocation et de redistribution de ressources au sein des systèmes irrigués montrent que le système irrigué tel qu'il est défini dans ce travail est un système ouvert à plusieurs niveaux. L'allocation des différentes ressources se fait entre les différents acteurs du système mais aussi au niveau de chacun de ceux-ci entre des usages internes et externes. Il est donc nécessaire d'avoir une approche distribuée de la dynamique des systèmes irrigués pour comprendre leur viabilité.

Cependant cette approche distribuée implique une compréhension des interactions entre les différents acteurs. C'est là le projet d'autres approches de la gestion des systèmes irrigués, vers une "gestion sociale de l'eau" (Ruf et Sabatier, 1992). Le rôle des règles collectives d'allocation de l'eau est aussi de constituer un support d'action collective (Lee Brown et Ingram, 1996 ; Aguilera Klink, 1995).

2.1.3 sur les relations sociales au sein des systèmes irrigués

Enfin d'autres travaux étudient le lien entre mode de gestion et viabilité de systèmes irrigués sous l'angles des relations sociales au sein des systèmes irrigués et/ou avec l'extérieur du système. Ces travaux se divisent en deux catégories : d'une part des études de cas, de

systèmes anciens essentiellement, l'étude de modes d'organisation débouchant sur des analyses institutionnelles d'autre part.

Des études de cas de systèmes irrigués anciens

La première catégorie, essentiellement empirique, explore des panoplies d'alternatives de modes de gestion fondés sur une définition des rôles et des droits des différentes catégories d'acteurs présents dans un système irrigué. Ces modes de gestion sont le plus souvent présentés de manière dynamique en tant que résultat de processus historiques (Coward, 1979). Les systèmes irrigués modernes, d'origine exogène, dans des régions parfois sans culture de l'irrigation, ne sont pas pris en compte mais peuvent être comparés à ces systèmes anciens. Le matériau de base est constitué d'études de cas assez fines réalisées spécialement pour des travaux sur la gestion des systèmes irrigués ou aussi, parfois, avec un objectif de compréhension du fonctionnement d'un groupe social autour d'un objet technique particulier, le système irrigué. Ces derniers travaux ne se posent pas *a priori* la question de la viabilité des systèmes irrigués observés : ils considèrent la fonction sociale de l'irrigation. Ils partent de l'hypothèse que dans certains milieux, telles les oasis sahariennes, l'irrigation révèle et cristallise le fonctionnement de la société étudiée : "l'eau raconte la société" (Bédoucha, 1987). Décrivant de manière très fine des systèmes anciens ayant duré ou durant encore, dont on peut donc penser qu'ils ont été viables au moins à un moment de leur histoire, ces travaux sont à l'origine d'autres études de cas dont l'objectif est plus spécifiquement l'étude de systèmes irrigués et de leur mode de gestion.

Il s'agit pour ces études de cas de comprendre comment "fonctionne" le système irrigué du point de vue des relations sociales dont il est le lieu, pour en tirer des enseignements sur ce qui peut en faire le succès. Cette compréhension passe d'abord par une analyse des perceptions et représentations symboliques, souvent nombreuses, liées à l'eau. Certains auteurs s'intéressent en particulier aux liens avec les rites et structures religieux : ceux-ci permettent parfois d'expliquer l'évolution d'un système irrigué (Nederlof et van Wayjen, 1996 ; Lansing, 1991). Les rôles et droits dans le système irrigué des différents groupes sociaux en présence sont au centre de nombreux travaux : place de la femme (Cleaver et Elson, 1995), affectation des droits et rôles en fonction du rang social (Layton et al., 1994). Il en ressort une grande variabilité en fonction des cas. Ceci amène à se poser la question d'une dépendance du mode de gestion au milieu physique (Coward, 1991), la viabilité du système irrigué dépendant de l'adéquation du mode d'organisation à des variables écologiques de référence parmi lesquelles la densité de population et les besoins d'irrigation (Wade, 1995).

D'autres études de cas soulignent l'importance de la prise en compte du risque dans les modes de gestion observés et notent que lorsque le risque n'est plus pris en compte, comme après des restructurations ou dans des aménagements récents, la viabilité des systèmes irrigués n'est plus aussi sûre. Ces comportements des paysans relatifs à une prise en compte du risque, qui peuvent modifier les conséquences attendues de modes de gestion particuliers s'ils ne sont pas pris en compte, consistent notamment dans une diversité des sources de revenus potentiels : si l'une des sources de revenu vient à manquer elle peut être compensée par les autres. La viabilité du système irrigué est alors liée à l'insertion de son mode de gestion dans son environnement socio-économique qui garantit l'accès à ces différentes sources de revenu³³ (Karsenty, 1993), c'est-à-dire à la cohérence de celui-ci avec les différentes activités des paysans (Mathieu, 1995). D'autres auteurs expriment cette manière de voir la viabilité à travers un niveau de dépendance des paysans à leur environnement, ce qui leur permet d'expliquer les échecs des nouveaux aménagements par l'augmentation du niveau de dépendance qu'ils induisent : à la dépendance antérieure pas toujours résolue s'ajoute dans certains cas une dépendance à une technique ou à des intrants (Pérennès, 1993). Un cas particulier de ce point de vue sur la viabilité des systèmes irrigués consiste à associer celle-ci à l'appropriation de l'outil par les acteurs (van der Zaag, 1992) : l'introduction d'une nouvelle technologie non maîtrisée augmente parfois la dépendance en nécessitant le recours à des spécialistes.

Nombre de ces travaux font plus ou moins implicitement une analogie entre les systèmes irrigués indigènes décrits et des systèmes irrigués implantés récemment d'origine exogène, comme dans la vallée du Fleuve Sénégal, pour inférer des conseils pour la conception et la gestion de ces derniers. Cependant la comparaison pose parfois problème, en particulier en ce qui concerne le statut de l'autorité de gestion et la nature des interactions entre les différentes composantes des systèmes irrigués concernés (Hunt, 1989). La comparaison pose également problème par rapport à la place relative dans le système irrigué des facteurs travail et capital : les systèmes irrigués anciens dépendaient beaucoup du facteur travail alors que les systèmes irrigués récents reposent plus sur le facteur capital : ainsi le manque de main d'œuvre pour l'entretien des canaux a conduit à l'apparition des premiers barrages sur le Nil à la fin du 19^{ème} siècle (Mazoyer et Roudart, 1997). Des limites de cette approche de la viabilité des systèmes irrigués actuels par l'analyse de systèmes anciens viennent des approches sur les modes d'organisation développées en particulier au sein de l'IIMI.

³³ C'est-à-dire aussi dans l'environnement socio-économique de chacun des acteurs du système.

Etudes de modes d'organisation

Ces approches sur les modes d'organisation correspondent à une première tentative d'abstraction sous la forme d'un corpus de connaissances sur les spécificités des organisations dans les systèmes irrigués. Elles partent du principe que c'est là que se trouvent actuellement les problèmes de gestion dans les systèmes irrigués (Manig, 1994). Ces approches des organisations se font à partir des fonctions : quelles sont les tâches à accomplir dans un système irrigué, spécifiques ou non à l'irrigation³⁴ (Coward, 1991). La restriction précédente sur les systèmes irrigués anciens ne s'impose ainsi plus. Par contre l'aspect dynamique de ces modes de coordination n'est pas toujours apparent dans ces analyses. La viabilité du système irrigué est alors vue dans une bonne affectation des rôles ainsi définis. L'ouverture des systèmes irrigués mentionnée plus haut se retrouve ici aussi, les modes d'organisation sont ainsi présentés comme fortement dépendant de l'extérieur, *via* des organisations ayant des intérêts dans le système irrigué, ou *via* les objectifs des différents acteurs (Manig, 1994).

Elargissant ces travaux sur les modes d'organisation à l'étude des différentes institutions³⁵ en présence et se basant sur les nombreuses études de cas présentées précédemment, des travaux récents s'intéressent aux périmètres irrigués en tant que bien commun (Sengupta, 1991). Ils se placent dans une perspective plus formelle, certains travaux cherchent à proposer des cadres pour des démarches de conception des systèmes irrigués sous forme de principes à respecter pour la conception de systèmes viables (Ostrom, 1992). Ces travaux s'intéressent plus à la phase de conception car celle-ci est identifiée avec raison comme un moment clé d'initialisation des règles collectives de gestion du système irrigué : un des principes de conception de systèmes irrigués viables est la nécessité d'établir des règles claires et acceptées avant la mise en route. La littérature des études de cas montre qu'il y a un grand nombre de règles endogènes, identifiées comme des institutions limitant les coûts de transaction et mettant en place des contraintes qui facilitent la coopération entre les usagers. La manière dont ces jeux de règles peuvent être modifiés constitue un autre corpus de règles qui doit être stable pour la confiance des usagers et la viabilité du système (Tang, 1992). Cette démarche a été appliquée pour expliquer les résultats d'intervention de l'Etat en vue de l'amélioration de la performance de petits périmètres irrigués au Népal qui

³⁴ Coward mentionne ainsi 5 types de tâches : acquisition de l'eau, allocation de l'eau, maintenance du réseau, mobilisation des ressources et gestion des conflits.

³⁵ Au sens de "a set of rules in use" (Ostrom, 1990).

souvent n'ont pas atteint leur objectif pour ne pas avoir tenu compte des institutions existant préalablement. Ceci amène à chercher comment concevoir l'intervention du gouvernement, ou d'un bailleur de fonds dans d'autres cas, pour se placer en connivence avec les relations entre les paysans (Lam, 1996).

Outre l'importance de la diversité des cas analysés par ces travaux qui permettra de confronter le traitement fait de la question à partir de terrains au Sénégal à d'autres terrains, les approches présentées ci-dessus montrent la nécessité de traiter de la viabilité des systèmes irrigués en prenant en compte les règles mises en œuvre par les acteurs. On retiendra en particulier la nécessité de connivence avec les paysans pour le succès d'opérations d'amélioration de systèmes irrigués.

2.1.4 ce qui constitue de multiples points de vues

Il résulte de toutes ces approches des connaissances partielles multiples. Certaines d'entre elles expriment parfois le besoin d'informations venant d'autres approches, les considérant alors comme des contraintes. Toutes apportent des informations sur des facteurs pouvant entrer en compte pour la viabilité d'un système irrigué. Il ne s'agit pas d'en faire la somme, même en tenant compte des interactions entre ces différents éléments, non pas à cause de la quantité de travail qui en résulterait mais en premier lieu à cause de spécificités de chacune d'entre elles qui les rendent incompatibles.

Il s'agit en particulier des questions d'échelle d'observation, aussi bien pour l'espace que pour le temps. Même si l'objet est au départ à chaque fois le même, il est traduit de manière différente dans chacune des composantes exposées ci-dessus entre lesquelles il se pose alors des problèmes de communication. Des problèmes scientifiques particuliers se posent au niveau des relations entre une dynamique naturelle et une dynamique sociale (Godard, 1992). Dans le cas particulier des systèmes irrigués, c'est un des objets de cette recherche.

Ceci rapproche de certaines questions que se posent les sciences de l'environnement en particulier vis-à-vis de l'interdisciplinarité (Jollivet et Pavé, 1993). De la même manière que pour ce champ de recherche, il s'agit d'inverser la question en n'explorant plus les conséquences d'un aspect particulier de la gestion d'un système irrigué sur sa viabilité mais en se plaçant du point de vue du système irrigué et en interrogeant les connaissances

particulières exposées ci-dessus quand le besoin s'en fait sentir³⁶. Il s'agit d'une intégration par l'objet, le système irrigué, et par la problématique, le lien entre mode de gestion et viabilité des systèmes irrigués (Godard, 1992).

Ce type de démarche appelle des méthodologies particulières. Certains auteurs recommandent de faire appel à des démarches systémiques (Janssen et Goldsworthy, 1996) ou de manière plus large à des techniques de modélisation (Jollivet et Pavé, 1993). Une des fonctions de la modélisation est alors de servir d'objet commun sur lequel peuvent travailler les différents savoirs auxquels il est fait appel et autour duquel ils peuvent communiquer (Bousquet, 1994).

³⁶ Cette "interrogation" peut prendre la forme d'une consultation de connaissances déjà acquises mais aussi et le plus souvent d'un questionnement sur certains points particuliers, enclenchant de nouvelles voies de recherche aux différentes composantes thématiques exposées au § 2.1.

2.2 Quelques approches interdisciplinaires

Certains auteurs, ressentant la nécessité de prendre en compte les différentes dimensions d'un système irrigué, se sont déjà intéressés à ce type de démarche. Les solutions les plus fréquemment rencontrées sont le couplage de modèle et des représentations intégrées ou systémiques.

2.2.1 Couplage de modèles

Cette approche part du principe que les travaux thématiques exposés ci-dessus fournissent un grand nombre de connaissances mobilisables sous forme de modèles s'ils ne sont pas déjà exprimés sous cette forme. Le principe du couplage consiste alors à utiliser chaque modèle de manière isolée, chacun fournissant des informations aux autres. L'un des modèles est généralement considéré comme maître par les utilisateurs : il constitue la porte d'entrée dans le modèle et c'est lui qui "donne la main" aux autres selon la modélisation de l'interface. Ce type de démarche peut se représenter selon le schéma de la Figure 6. Le tout est le plus souvent réuni dans un modèle d'ensemble avec autant de compartiments que de sous-modèles.

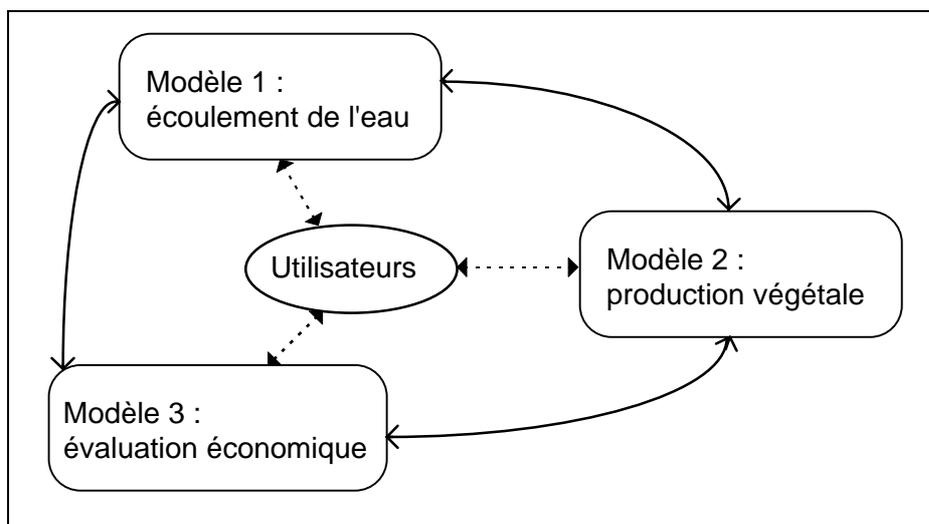


Figure 6 : représentation d'approches par couplage de modèles (les types de modèles sont donnés à titre d'exemple).

Beaucoup de ces travaux s'inscrivent dans des démarches d'aide à la décision concernant une ou plusieurs questions posées sur le système irrigué, questions qui indiquent alors le sous-modèle maître à retenir. Ainsi un système expert dédié à la rénovation de canal (Nakamura et Tsukiyama, 1992) part d'un état initial du canal, simule son évolution en fonction de cet état (sous-modèle 1), en déduit des tâches appropriées à entreprendre

(sous-modèle 2), évalue les coûts y afférents (sous-modèle 3) et fournit des recommandations de travaux de rénovation.

Le type d'outil qui en découle peut aussi avoir comme objectif une utilisation en aide à la gestion, en fonction d'objectifs qui peuvent être l'une des variables d'entrée du modèle. Ainsi un modèle mis en place à partir d'un terrain népalais (Onta et al., 1995) utilise également trois sous-modèles couplés : un module d'optimisation du revenu net total donnant des choix d'itinéraires techniques en fonction des choix de gestion, un module simulant la répartition de l'eau, un module simulant la production selon les stress hydriques éventuels résultant de la répartition de l'eau et des choix de culture. Les résultats de ces simulations sont comparés en fonction des objectifs retenus et donnent lieu à l'indication d'un meilleur scénario de gestion.

D'autres utilisent cette démarche de modélisation pour évaluer les conséquences de l'irrigation, par exemple en termes de revenus et de production agricoles (Rosegrant et Shetty, 1994). Rosegrant et Shetty ont mis au point un modèle à trois compartiments : approvisionnement en eau, bilan hydrique à la parcelle et production agricole en fonction des décisions de l'agriculteur. Le premier modèle fournit un approvisionnement en eau des parcelles, le deuxième, un état de teneur en eau de chacune des parcelles fonction des résultats du premier et le troisième, des choix de pratique découlant des résultats du précédent et les productions agricoles en résultant. Dans ce cas il n'y a pas besoin de sous-modèle maître, chacun "donne la main" au suivant ou interroge le précédent³⁷.

Ces méthodes permettent bien, *a priori*, d'utiliser de nombreuses connaissances sur le système irrigué dont elles ont besoin pour leurs objectifs. Elles ont cependant quelques difficultés inhérentes à la démarche de leur conception qui leur imposent des limites et les rendent inadéquates pour avancer sur la question de la viabilité des systèmes irrigués. Certains auteurs qui les utilisent éprouvent des difficultés dans la modélisation de l'interface entre les différents sous-modèles. Il s'agit notamment du format des données générées par un sous-modèle qui n'est pas toujours compatible avec celui des données utilisées par un autre (Affholder, 1996). Ce n'est en fait bien souvent qu'une autre formulation du problème du choix des échelles rencontré dans les démarches multidisciplinaires.

Admettons ce problème résolu. Il se pose alors le problème de la diffusion des erreurs de simulation d'un sous-modèle à l'autre (Gaunt et al., 1997). Or les sous-modèles utilisés

³⁷ "suivant" et "précédent" font ici référence à la chronologie du processus représenté.

correspondant à des domaines de connaissance souvent assez larges, la marge d'erreur propre à leurs estimations peut être importante et la question de la sensibilité des autres sous-modèles à la variabilité de leurs variables d'entrées, c'est-à-dire des valeurs estimées par les autres modèles, est rarement évoquée dans les processus de couplage.

Cette question d'erreurs transmises d'un sous-modèle à un autre est d'autant plus importante que le nombre de canaux de transmission de données d'un sous-modèle à un autre est faible voire unique dans de nombreux cas : le sous-modèle 1 fait son travail, en sort une série de données utilisée de manière globale par le sous-modèle 2. Sauf à faire un outil lourd à gérer, les valeurs échangées par les sous-modèles sont assez intégratrices d'un état du système car elles transitent par un nombre de canal limité entre les sous-systèmes correspondant aux différents sous-modèles, et non entre leurs composants. Tout se passe comme si il y avait au niveau de chaque sous-modèle une centralisation des entrées et des sorties de données. Seules les variabilités internes à chaque sous-système sont ainsi vraiment prises en compte. La variabilité interne du système est amoindrie pour en rendre possible la modélisation avec ce type de démarche.

C'est à ce niveau que se posent les difficultés qui font que cette démarche n'est pas utilisable telle quelle pour avancer sur la question de la viabilité des systèmes irrigués si l'on ne veut pas faire l'hypothèse que cette variabilité n'a pas d'influence et si l'on ne veut pas tendre vers le paradoxe d'un modèle à l'échelle 1:1 dans lequel on risque de se perdre (Eco, 1988). Une solution possible est alors de s'intéresser à des modèles à base de règles fonctionnant sur un modèle générique de processus de décision (Dent et al., 1995). Avant d'approfondir cette voie, intéressons nous à d'autres démarches, systémique notamment, qui cherchent à représenter les différentes facettes des systèmes irrigués.

2.2.2 Applications de la théorie des systèmes et autres approches intégrées

Les théories des systèmes s'appuient sur un principe de base aujourd'hui bien reconnu : "le tout est différent de la somme des parties" (von Bertalanffy, 1993 ; Lemoigne, 1977). De celui-ci découle la nécessité d'un travail sur les interactions entre les différentes parties, à l'origine cette différence. Outre les interactions internes, ces théories s'intéressent aux échanges d'information et plus généralement d'entropie avec l'extérieur des systèmes (von Bertalanffy, 1993).

En parallèle, une autre école s'est développée suite à une analogie entre thermodynamique et écologie d'après les travaux de Odum (Hall, 1995). Ces chercheurs représentent la dynamique des systèmes par des flux d'information et d'énergie entre ses composantes et

entre celles-ci et son environnement. Elles se sont ainsi fortement inspirées de travaux sur des systèmes thermodynamiques ou électriques. L'analogie vers des systèmes naturels s'est d'abord faite en écologie et a permis de relier *via* une comptabilité énergétique les champs de l'économie et de l'écologie (Costanza, 1995 ; Passet, 1979), c'est l'approche éco-énergétique. Ces auteurs ont alors participé à l'émergence du débat sur le développement soutenable ou durable (CMED, 1989) pour une gestion des écosystèmes garantissant leur pérennité. Il s'agit d'une analyse en termes de bilans de flux énergétiques.

Les problèmes posés par les approches précédentes sur la non compatibilité des formats de données entre différents travaux sur les systèmes irrigués est ici résolue par l'introduction d'une valeur commune à l'interface entre les différentes composantes du système. Ce liant, que les approches précédentes de couplage de modèles cherchaient dans l'échange de données simulées, est proposé au travers d'échanges tous exprimés sous forme énergétique, et donc commensurables, dans le cas de l'éco-énergétique ou dans des variables de contrôle pouvant être de types différents en théorie des systèmes. Ces approches ont toutes en commun d'avoir traité de manière approfondie la question de la représentation de l'interface entre les différentes composantes d'un système... quitte à conclure dans certains cas qu'elle ne peut être représentée.

En ce qui concerne le cas particulier des systèmes irrigués, les approches de ce type sont encore rares et relativement récentes, elles prennent différentes appellations : approches système, intégrée ou encore holiste. Elles se placent en fait à la suite de l'application de la théorie des systèmes à la recherche sur les systèmes agraires centrée autour du concept de modèle d'action (Sebillote et Soler, 1990)³⁸, dans une perspective d'aide à la décision (Attonaty et al., 1989). Celles-ci se focalisent sur les flux d'énergie et de matière dirigés par les acteurs du système au sein de celui-ci : le système est étudié *via* le filtre des utilisateurs de ressources, quelles qu'elles soient (Reenberg et Paarup-Laursen, 1997). Pour cela ces travaux se focalisent sur une meilleure compréhension des comportements et motivations individuelles (van Arsdale et Lewis, 1995).

Ce type d'approche a été développé dans le domaine des systèmes irrigués après un certain nombre d'années de recommandations... non suivies de mise en pratique (Péreira, 1987). En effet les systèmes irrigués sont de la même manière que les systèmes agraires le produit de l'histoire d'un réseau, d'individus et d'organisations. A cela s'ajoute une caractéristique

³⁸ ce qui recouvre ici aussi les travaux anglo-saxons regroupés au sein des "Farming System Research".

propre, l'existence de contraintes fortes et partagées entre les acteurs du système due à la présence de l'eau (Molle et Ruf, 1994).

Une des limites rencontrées à l'application des méthodes issues des recherches sur les systèmes agraires dans le cadre des systèmes irrigués vient de l'importance donnée par ceux-ci au concept de "décideur", l'hypothétique paysan seul maître à bord après Dieu sur sa parcelle. Or pour des systèmes irrigués, le concept de "décideur" est essentiellement dans la tête du modélisateur (Biswas, 1988) : ce sont les interactions qui sont importantes à prendre en compte pour comprendre la structure du système. Si cette méthode s'applique bien à des exploitations de grande culture, dans d'autres cas, tels les systèmes irrigués, le cadre collectif des décisions prend plus d'importance (Le Gal, 1995).

Il y a cependant eu quelques applications de systèmes irrigués par des approches intégrées ou systémiques. Ainsi après une grande quantité de travaux sur les marchés de l'eau, l'évolution des sols sous culture irriguée, les comportements des paysans (Kuper, 1997 ; Strosser, 1997), il a été réalisé un modèle intégré de systèmes irrigués au Pakistan (Belouze, 1996). Le système irrigué rassemble des sous-systèmes actifs transformant des intrants en extrants au sein du système. En pratique le système ainsi représenté intègre en ligne un sous-système hydraulique, un sous-système économique et un sous-système hydro-pédologique. Les interrelations notamment *via* des rétroactions entre ces différents sous-systèmes ne sont pas représentées, l'intérêt de l'intégration est essentiellement de rassembler dans un outil commun des connaissances d'origine différente. La systémique apporte le cadre formel de représentation. Une autre expérience intéressante a été menée sur des cas à Bali s'inspirant plus des méthodes développées par l'éco-énergétique (Kremer et Lansing, 1995). Ceux-ci représentent de manière assez simple, avec trois sous-modèles de type fonctionnel, la structure du système irrigué particulier étudié à Bali et simulent son comportement. Ils insistent sur l'aspect structurel de la représentation systémique, la dynamique étant l'objet d'hypothèses de simulations.

Ces approches intégrées de systèmes irrigués prennent fréquemment la forme d'un modèle mathématique ou informatique, si bien qu'il existe des logiciels dédiés à la modélisation systémique (Ruth et Hannon, 1997). Ceci tient au fait de la situation généralement finale de cette démarche dans un ensemble de processus de recherche dans un système irrigué : il s'agit de rassembler dans un outil opérationnel, le plus souvent un modèle, un ensemble de travaux ayant eu lieu antérieurement. Dans la manière de les présenter et dans l'initialisation de ces démarches, il y a souvent la question : "comment faire pour utiliser ensemble et mettre en cohérence différentes connaissances déjà existantes ?" Ces démarches partent

des savoirs partiels pour aller vers l'objet et non pas de l'objet qui questionne les savoirs partiels quand cela est nécessaire.

Les outils produits par ces démarches ne sont pas uniquement des modèles, même si la systémique s'y prête particulièrement bien (Reenberg et Paarup-Laursen, 1997). Dans certains cas l'intégration, la représentation des interactions entre différentes composantes, se fait par des intervenants humains, chercheurs, acteurs politiques ou joueurs. Ceci revient à faire l'hypothèse que la complexité ne peut être représentée dans un modèle quel qu'il soit. Ainsi pour les travaux sur la dimension humaine des changements globaux, Robinson propose que ce soient les acteurs politiques qui fassent l'intégration des différentes connaissances issues de la recherche, notamment parce que ce sont les seuls qui peuvent prendre en compte "tout ce qui n'est pas pris en compte par la recherche" (Robinson, 1991).

Dans d'autres cas, l'intégration se fait par des joueurs dans des cadres de jeux de simulation ou de jeux de rôles. Le jeu est utilisé dans ce contexte comme la représentation de l'action d'une organisation (Piveteau, 1994) : exercice de liberté dans un cadre contraint par les représentations des différentes composantes du système. Cette méthode est assez utilisée dans le domaine de l'irrigation généralement avec un objectif de formation (Burton, 1989b ; Steenhuis et al., 1989 ; Smith, 1989). Leur principe est de mettre en œuvre sur différentes questions relatives aux systèmes irrigués un groupe d'individus jouant, avec une liberté d'action plus ou moins grande, des rôles existant dans un système irrigué selon des règles définies au départ et de simuler l'évolution du milieu en fonction des choix faits par les joueurs. Cette méthode est cependant assez lourde à mettre en œuvre, ce qui deviendrait un handicap dans un usage de recherche où l'on veut explorer différentes hypothèses de fonctionnement d'un système irrigué.

Récemment est apparue une nouvelle approche intégrée des systèmes irrigués dont l'objectif vise directement la compréhension de la gestion des systèmes irrigués. Elle résulte en partie des démarches de type système agricole et des recherches en sciences de la gestion. Les démarches sur les systèmes agricoles et les recherches en gestion des petites entreprises ont donné naissance au concept de "modèle d'action" selon lequel, chaque acteur possède un ensemble d'indicateurs, un corps de règles de décision et un mode d'évaluation du résultat qui évoluent avec le temps et l'acquisition d'expérience (Sebillote et Soler, 1990). L'utilisation de ce concept nécessite l'hypothèse d'existence de décideurs bien identifiés, ce qui pose problème dans le cas des systèmes irrigués (Legal, 1995).

A partir de là, une solution retenue a été de prendre comme point d'ancrage le système de pilotage du système irrigué et son action sur la production "d'eau maîtrisée" (Rey, 1996). Ceci permet bien de prendre en compte la diversité diffuse des centres décisionnels au sein du système irrigué en considérant comme support des interactions entre les acteurs la ressource à l'origine de la contrainte partagée entre ceux-ci. Si cette approche apparaît comme relativement opérationnelle pour ce qui concerne les aspects relatifs à la gestion de l'eau au sein du système irrigué, les autres ressources et biens utilisés en commun ne sont pas pris en compte dans cette représentation. Les aspects relatifs à la production de biens agricoles paraissent plus difficiles à appréhender par une telle démarche dans un contexte "fortement multi-acteurs et multi-objectifs" (Rey, 1996). Cette démarche s'applique bien aussi pour l'étude de la coordination entre exploitants agricoles et gestionnaire, c'est-à-dire entre producteurs et clients d'eau maîtrisée, dans des cas où les décisions au jour le jour sont le fait d'acteurs bien déterminés (Lamacq, 1997).

De ces différentes expériences, retenons en particulier que pour une étude du lien entre les modes de gestion et la viabilité des systèmes irrigués il est préférable de faire appel aux différentes connaissances existantes à partir du système irrigué pour éviter l'écueil du compliqué. Il apparaît aussi clairement que la dimension collective des systèmes irrigués doit être prise en compte en premier et qu'elle pose problème pour des approches s'appuyant sur les centres de décision. Ceci conduit à s'intéresser aux interactions entre les acteurs, c'est-à-dire dans la figure 2 aux flèches plutôt qu'à leurs extrémités. Ces interactions dépendent de règles qui gouvernent l'évolution du système (Schilizzi et Apedaile, 1994), ce qui renforce les conclusions tirées des démarches par couplage de modèles.

2.2.3 Apports pour la question de la viabilité

Tous ces travaux ne sont pas orientés vers la question de la viabilité des systèmes irrigués, ni même de la viabilité tout court. Quelques uns apportent cependant des informations à ce sujet utiles pour la suite. En particulier certains sont intéressants quant à leurs apports en tant qu'outil d'analyse, sur les effets des règles de distribution de l'eau ou encore sur la coordination entre les paysans.

Certains constituent des outils de diagnostic intéressants pour les systèmes irrigués particuliers représentés. Ainsi pour un périmètre andin, une représentation centrée sur les

règles de distribution de l'eau et une modélisation précise du bilan hydrique des parcelles a mis en évidence qu'une réhabilitation passe par une remise en cause des règles de distribution et non par une reprise des ouvrages ou du réseau (Gilot, 1994). Ceci accentue les conclusions des paragraphes précédents concernant la nécessité de fonder une représentation du système irrigué sur les règles. Pour aller plus loin, on s'attachera à prendre aussi en compte les règles autres que celles de distribution de l'eau pouvant *a priori* intervenir dans la viabilité des systèmes irrigués.

Toujours dans le domaine des règles de distribution de l'eau, mais s'y intéressant d'un point de vue plus théorique, des simulations sur un modèle intégré de système irrigué du type de ceux qui existent en Asie ont exploré les effets de différentes formes que peuvent prendre ces règles particulières au niveau du réseau principal en fonction des objectifs de gestion de celui-ci. Ces simulations montrent qu'une gestion visant une efficacité économique maximale n'est pas plus efficace qu'une gestion visant à optimiser l'apport en eau des parcelles (Small et Rimal, 1996). Ici l'usage d'un modèle intégré a permis de comparer des scénarios de gestion portant sur des critères issus de champs de connaissance différents et montré qu'une gestion selon l'un des critères peut être intéressante pour un objectif mesuré à l'aune de l'autre critère. Ce même modèle vérifie aussi, comme de nombreuses autres études (Sengupta, 1993), que le système irrigué représenté ne peut être viable si tous les coûts doivent être supportés par les usagers. Pour Small et Rimal, l'eau ne peut être facturée à son coût réel. Ces résultats nous incitent aussi pour la suite à nous intéresser à d'autres règles que celles liées à l'eau dans notre représentation d'un système irrigué. Retenons aussi de cette étude la possibilité d'exploration de scénarios sur un système irrigué ne correspondant à aucun système irrigué réel mais ayant une valeur représentative de tous les systèmes irrigués d'une région.

La représentation intégrée d'un système de terrasses irriguées à Bali mentionnée précédemment (Kremer et Lansing, 1991) a elle aussi permis d'explorer différents scénarios de gestion dans différentes hypothèses de coordination entre les terrasses et d'en discuter avec d'une part les experts des différents aspects de l'irrigation à Bali, ainsi qu'avec les responsables paysans. Ceci a permis en particulier de montrer l'importance d'une coordination à grande échelle, entre les terrasses *via* un réseau de temples, pour la viabilité du système du point de vue du contrôle des maladies du riz. Ces résultats confortent notre hypothèse de l'importance des modes de coordination entre les paysans dans les systèmes irrigués de la vallée du fleuve Sénégal pour leur viabilité si l'on fait une analogie parcelle / terrasse pour ce qui concerne l'unité spatiale de base.

Même si ce dernier cas permet bien de comprendre *a posteriori* pourquoi le système de Bali dure, il manque encore un outil pour traiter de la question de la viabilité des systèmes irrigués de manière exploratoire indépendamment de leur ancienneté. Or comme la viabilité est une notion relative à un point de vue sur le système, comme on sait peu de choses des "besoins des générations futures", la capacité à répondre à un changement d'objectifs assignés au système, qui implique un changement de contraintes de viabilité³⁹, est plus importante que le maintien du système dans un état de fonctionnement donné (Park et Seaton, 1996). Il s'agit donc d'utiliser un cadre d'analyse des systèmes irrigués centré non seulement sur les règles et les interactions en usage mais aussi sur leur dynamique. Ceci devrait déboucher sur un outil permettant d'explorer différentes évolutions possibles de systèmes irrigués, prenant ainsi en compte leur adaptabilité.

³⁹ Par exemple le passage d'un objectif de production de riz à un objectif d'équilibre budgétaire peut rendre non viable un système irrigué qui l'était.

2.3 Du côté de la gestion des ressources en propriété commune et des SMA

Suite à ce constat et dans la lignée de travaux dans le domaine de la gestion des ressources en propriété commune, nous nous proposons de nous appuyer sur une démarche d'analyse basée sur les modes d'appropriation et les processus de décision et une méthode de modélisation particulière, les Systèmes Multi-Agents.

2.3.1 La gestion des ressources en propriété commune : modes d'appropriation et processus de décision.

Parmi les différents travaux présentés au § 2.1.3 sur les relations sociales au sein des systèmes irrigués, certains ont une démarche centrée sur l'analyse des règles en œuvre et reconnues par les acteurs du système, démarche étayée par des études de cas. Or les quelques démarches systémiques ou intégrées présentées plus haut requièrent pour l'étude de la viabilité des systèmes irrigués un approfondissement de la représentation des règles d'interaction mises en œuvre. Il est donc intéressant de revenir sur les origines de ces travaux qui au départ s'intéressent aux périmètres irrigués en tant que bien commun (Sengupta, 1991).

Ce sont en fait des applications particulières aux systèmes irrigués d'un courant de recherche sur les biens en propriété commune et la gestion locale des ressources renouvelables. Pour ce courant de recherche, une ressource ou un bien en propriété commune est une ressource naturelle ou un aménagement d'origine humaine de suffisamment grande taille pour rendre difficile l'exclusion de bénéficiaires (Ostrom, 1990).

Ses caractéristiques sont les suivantes :

frontières du système clairement identifiées.

il existe un groupe d'utilisateurs et un groupe de personnes exclues.

nombre d'utilisateurs déterminé et supérieur à deux.

ces utilisateurs sont en compétition.

il existe des règles d'usage explicites ou non (une règle étant une interdiction ou une obligation ou une autorisation).

Ce courant de recherche ne se rattache à aucune discipline et se matérialise au sein d'une association spécifique, l'IASCP⁴⁰ (Weber, 1993). Il s'agit maintenant d'approfondir les fondements de ce courant de recherche.

⁴⁰ International Association for the Study of Common Property

Le point de départ commun de tous ces travaux réside dans le rejet de la théorie de la "tragédie des communs" selon laquelle toute ressource collective serait en accès libre et ainsi vouée à disparaître ou à se dégrader (Hardin, 1968). Les études de cas menées dans le cadre de travaux sur les ressources en propriété commune produisent de nombreux contre-exemples à cette théorie : il a existé et il existe des ressources en propriété commune gérées localement de manière viable. La prémisse de la théorie de Hardin selon laquelle toute ressource collective est en accès libre est à la base de cette remise en cause, une analyse plus poussée des régimes de propriété est nécessaire (Berkes et al., 1989).

Il s'agit de poser la question de la viabilité de la gestion d'un bien en propriété commune tel qu'un périmètre irrigué en termes de modes d'appropriation de ce bien, c'est-à-dire en fonction d'un ensemble de relations entre les individus dans un groupe et leur environnement, ou, dans le cas qui nous intéresse, entre les acteurs du système irrigué et le périmètre (Weber et Reveret, 1993). La notion de modes d'appropriation comprend, sans s'y réduire, les droits de propriété. La structure de ceux-ci peut être variée et complexe du point de vue de qui détient un droit de propriété et de la nature de ce droit (Schlager et Ostrom, 1992). Entre une régulation administrative de l'Etat et la propriété privée individuelle, des études de cas de biens en propriété commune montrent des situations variées où des groupes d'utilisateurs ont des droits sur un bien. Ces droits, évolutifs, peuvent se situer à différents niveaux : accès et prélèvement, régulation des prélèvements, régulation de l'accès (aussi dénommé droit d'exclusion), cession des droits (Schlager et Ostrom, 1992). Pour un bien particulier, un de ces droits peut dépendre d'une entité donnée (individu, groupe d'individus ou collectivité publique) et un autre droit d'une autre entité. Le raisonnement de la tragédie des communs n'est donc pas tenable.

Même si la reconnaissance de la diversité et de la complexité des droits de propriété suffit à rejeter l'idée selon laquelle les biens en propriété commune seraient voués à leur perte, une analyse portant sur ces seuls droits de propriété ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des relations entre une société et un bien ou une ressource (Weber, 1995), entre l'ensemble des paysans et le périmètre irrigué. Les relations entre les différentes catégories d'utilisateurs et les terres de décrue de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal présentées au premier chapitre ne peuvent être décrites par les seuls régimes de propriété. Il faut y ajouter les représentations de la ressource, les usages possibles ainsi que les modalités de répartition des coûts et des bénéfices (Weber et Reveret, 1993). Ainsi, en avant goût de la description des terrains, dans le plus récent des systèmes irrigués étudiés, la station de pompage n'a jamais fonctionné le jeudi durant la campagne d'hivernage 1996 : le marabout avait prononcé cette interdiction pour que les cultures soient protégées des attaques

d'oiseaux. Cette relation entre le périmètre et les paysans ne relève pas de la catégorie des droits de propriété.

La relation d'une société à son milieu passe le plus souvent par plusieurs biens ou ressources, même dans le cas de systèmes hautement artificiels. Dans le cas particulier d'un système irrigué, cette classification doit être appliquée d'une part à la régulation de l'accès à l'eau mais aussi à l'aménagement⁴¹ et au foncier (Mathieu, 1992). La discussion précédente sur les modes d'appropriation doit alors porter sur les trois, des liens existent en effet parfois, tels qu'un assujettissement des droits d'eau à la superficie déclarée comme utilisée ou bien un assujettissement de la superficie octroyée au temps de travail consacré à l'entretien du canal ou par un ascendant au creusement du canal. Ces liens n'existent pas toujours et ne régissent pas tous les droits. Or certains cas de négligence dans le choix de modes d'appropriation de l'eau ou du foncier peuvent conduire à des conséquences néfastes pour la viabilité de systèmes irrigués (van Steenberghe, 1992). La structure des modes d'appropriation au sein d'un système irrigué à l'issue de sa mise en place ou d'une réhabilitation constitue ainsi une condition initiale induisant des irréversibilités fortes : pour la plupart des systèmes irrigués mis en place notamment au Sénégal, le cadre institutionnel initial est exogène, limitant ainsi la flexibilité du système (Favereau, 1991).

Ces cas de modes d'appropriation faisant intervenir des groupes d'individus impliquent une lecture précise des processus de décision en œuvre pour la gestion de ces ressources, c'est-à-dire la dynamique de ces modes d'appropriation (Weber, 1995), en particulier au travers des interactions entre les différents acteurs concernés qu'ils soient membres du groupe ayant un droit ou non. Il faut des processus de décision spécifiques qui impliquent le groupe dans son ensemble et qui prévoient les moyens de mise en œuvre des choix qui en résultent (Quiggin, 1988), pour cela la qualité de la diffusion de l'information est primordiale (Ostrom et al., 1994). Ces modes d'appropriation intermédiaires entre la privatisation totale de la ressource et la gestion centralisée constituent souvent des solutions négociées, des "arrangements institutionnels" (Ostrom, 1990), prenant la forme d'ensemble de règles régissant la dynamique des modes d'appropriation : application des droits correspondants, modification de ces droits et modification des règles (Ostrom, 1990). Les trois niveaux de

⁴¹ L'aménagement (canaux, pompes, ouvrages) n'est pas une ressource renouvelable mais un ensemble d'équipements en propriété commune. Cependant les mêmes questions que pour les ressources renouvelables se posent. C'est pourquoi il y est ici associé.

règles existent toujours, la formation d'une nouvelle institution correspondant à une modification concertée de certaines d'entre elles.

En ce qui concerne les systèmes irrigués, le premier niveau de règles concerne aussi bien l'allocation de l'eau que l'entretien du réseau et des ouvrages. Il y a donc une grande diversité de règles à prendre en compte pour une analyse des processus de décision (Tang, 1992). La taille du système⁴² est un paramètre important, la mise en œuvre de règles collectives au sein de groupes de petite taille étant en général plus aisée. C'est l'argument le plus souvent retenu pour justifier *a priori* une gestion centralisée pour les grands aménagements. La structure hydraulique des systèmes irrigués hiérarchisée et / ou les réseaux sociaux existant en dehors du périmètre permettent cependant dans certains cas de favoriser des structures fédératives de groupements et ainsi de diminuer les coûts de transaction (Ostrom, 1990 ; Tang, 1992).

Une autre caractéristique commune aux travaux sur les biens en propriété commune concerne leur caractère empirique. Ils sont construits à partir d'études de cas toutes fouillées et souvent considérées sous différents points de vue : ressource, société et relations entre ressources et sociétés. Ils ont permis d'analyser et d'expliquer des situations de gestion collective viable et non viable de ressources en propriété commune. Une volonté récente de théorisation a rapproché une partie de ces auteurs de l'usage de la théorie des jeux pour formaliser les résultats obtenus et proposer une théorie de la gestion des biens en propriété commune qui ne soit pas mise en défaut par ces études de cas (Sengupta, 1991 ; Ostrom et al., 1994). Le dilemme du prisonnier est ainsi devenu le modèle classiquement utilisé pour exposer les résultats théoriques ainsi obtenus, même si des travaux récents ont montré qu'il ne constitue pas toujours une bonne représentation de la question de l'accès à une ressource en propriété commune, les hypothèses faites sur la matrice de gains n'étant pas toujours vérifiées (Romagny, 1996). Une autre limite relevée à cette approche est le caractère statique des résultats obtenus (Lomborg, 1994).

Cette démarche basée sur les modes d'appropriation et les processus de décision permet de prendre en compte tant de manière synchronique que diachronique les éléments repérés plus haut comme importants pour étudier les systèmes irrigués : les interactions entre les acteurs et les règles qui régissent celles-ci. Il s'agit maintenant d'utiliser cette démarche d'analyse *a priori* pertinente dans une démarche exploratoire sur les modes de coordination en œuvre au sein des systèmes irrigués. Il reste à mettre en place un outil pour mettre en

⁴² au sens du nombre d'attributaires.

œuvre cette exploration, c'est à dire en quelque sorte pour générer, ou simuler des études de cas : un système irrigué virtuel.

2.3.2 Les SMA

Pour une démarche exploratoire, il faut un outil rendant possible des simulations sur des pas de temps assez courts, à des coûts raisonnables, limitant les externalités négatives induites aux dépens des paysans des systèmes irrigués... et permettant néanmoins de discuter des systèmes irrigués. Pour cela une expérimentation sur des systèmes réels paraît difficile : les pas de temps sont longs et surtout les conséquences pour les paysans de ces systèmes seraient importantes même si un système de compensation est mis en place. Des solutions venues du côté de la modélisation doivent donc être envisagées. Ces modèles peuvent être mathématiques, informatiques, physiques ou encore littéraires. La nécessité d'une prise en compte des interactions amène alors à s'intéresser à un outil de modélisation particulier, les Systèmes Multi-Agents (SMA), qui place explicitement les interactions au centre de sa démarche. Après une présentation des caractéristiques principales de ce type d'outil, quelques exemples d'application à des cas issus de problématiques agricoles sont décrits.

Un SMA est un système composé d'un espace, d'un ensemble d'objets situés dans cet espace, parmi lesquels certains, dénommés agents, sont actifs, d'un ensemble de relations entre les objets, d'un ensemble d'opérations par lesquelles les agents traitent les objets et des opérateurs chargés de l'application de ces opérations et de l'évolution du système suite à ces opérations (Ferber, 1995). La Figure 7 donne une représentation d'un SMA. Les simulations multi-agents représentent un système, réel ou non, par un SMA qui évolue en fonction d'hypothèses faites sur les dynamiques en jeu, dans le but d'expliquer certaines caractéristiques du système représenté. Nous nous limiterons par la suite à des cas de SMA informatiques.

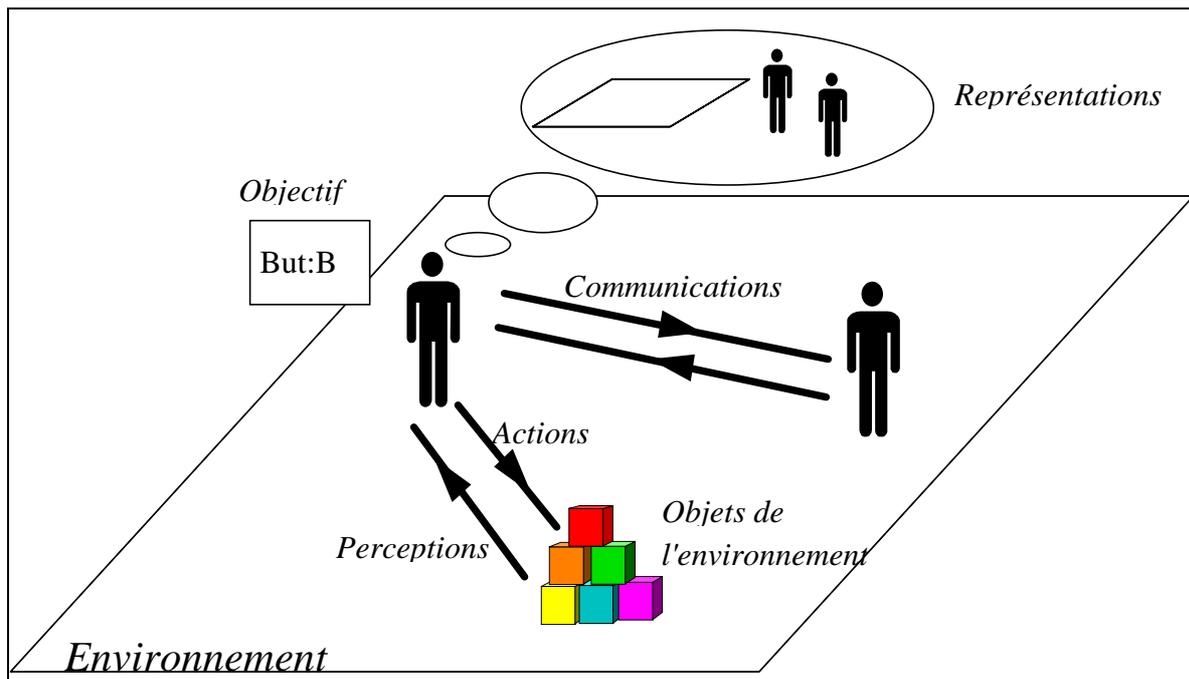


Figure 7 : représentation imagée d'un système multi-agent (d'après Ferber, 1995)

Dans le cas d'un SMA informatique, un agent est une entité informatique autonome capable de communiquer avec d'autres agents, de percevoir partiellement leur environnement et les objets qui y sont situés et d'avoir des représentations justes ou erronées sur les comportements d'une partie ou de l'ensemble des autres agents et de l'environnement⁴³, selon la représentation de la Figure 8. Ces perceptions, représentations, communications peuvent alors déclencher l'activation d'une ou plusieurs méthodes propres à l'agent qui va alors envoyer une communication à d'autres agents ou agir sur l'environnement et/ou les objets qui y sont situés, pouvant donner lieu à de nouvelles perceptions ou représentations des autres agents. Cette faculté de représentation et d'interprétation des agents est plus ou moins développée depuis des agents *réactifs* aux capacités limitées jusqu'aux agents *cognitifs* aux capacités de représentation plus importantes mais ne pouvant pas être aussi

⁴³ Dans le cadre d'une modélisation objet (cf. annexe 4), les agents ainsi définis sont caractérisés par des attributs qui les décrivent et des méthodes qui décrivent ce qu'ils savent faire et comment ils le font. Tous les agents d'une même classe, sont décrits par les mêmes attributs dont les valeurs particulières peuvent changer d'une instance d'agent à une autre. Pour reprendre un exemple classique de la modélisation orientée objet, une classe Voiture comprendra un attribut "couleur", et des instances auront leur attribut "couleur" valant vert ou rouge. Les méthodes de chaque instance sont les mêmes, pour l'exemple donné il peut s'agir d'avancer ou consommer de l'essence. Il ne s'agit cependant là que d'une méthode de construction de SMA.

nombreux. Dans la suite, sauf mention du contraire, le terme d'agent sera toujours utilisé dans ce sens d'entité informatique autonome. Il ne doit pas être confondu avec les notions d'agent économique, ou d'acteur. Selon l'objectif d'utilisation du SMA, un agent peut être une représentation d'un agent économique, d'un acteur, d'un groupe d'acteurs, d'un canal, d'un animal, d'un robot footballeur⁴⁴, d'une tâche de peinture sur un tableau (Hutzler et al., 1997) ou de protocoles en vue de la résolution d'un problème.

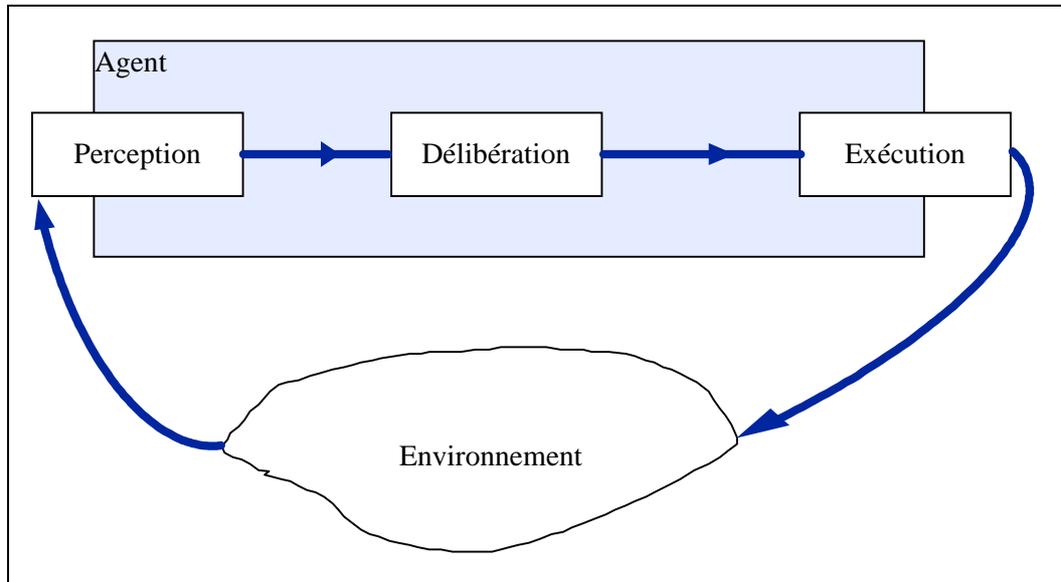


Figure 8 : Cycle perception / action d'un agent (Ferber, 1995)

Un des concepts auquel il est fait le plus fréquemment référence dans la communauté des chercheurs sur les SMA est celui d'émergence : des comportements collectifs peuvent être observés qui résultent de la simulation des interactions entre des agents individuels autonomes dont les comportements individuels seuls sont représentés (Ferber, 1994). Par exemple la modélisation du comportement de fourmis initialement identiques donne lieu à l'observation d'une spécialisation des tâches au niveau de la fourmière (Drogoul et Ferber, 1994). Pour aller plus loin dans la définition d'une émergence, il faut se souvenir que les SMA constituent une branche de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). L'aspect distribué est ici très important parce qu'il souligne qu'aucun agent n'a *a priori* une connaissance complète du système ni ne contrôle la dynamique de l'ensemble du système⁴⁵. Si cette

⁴⁴ une coupe du monde des robots footballeurs est prévue lors de la prochaine conférence internationale sur les SMA à Paris en juillet 1998.

⁴⁵ Les modélisateurs des communautés SMA et IAD ne cherchent pas indéfiniment à améliorer leur modèle pour le rendre plus complet au gré des progrès des matériels informatiques. Ils s'intéressent

dynamique évoluant au fur et à mesure des perceptions /représentations /actions locales se stabilise en laissant apparaître une structure globale, ou au moins intéressant plusieurs agents, on parle d'émergence (Jean, 1997). Ces propriétés "émergentes" d'un SMA modifient en retour les comportements des agents (Ferber, 1994). Elles existent bien dans le SMA et peuvent être visualisées avec des outils adéquats d'observation de la dynamique des interactions (Proton et al., 1997). Dans le cas fréquent de l'utilisation des SMA pour la résolution distribuée de problèmes, notamment dans l'industrie, cette propriété est à l'origine de l'usage de cette méthode de modélisation, la solution du problème émerge de la simulation (Müller, 1996).

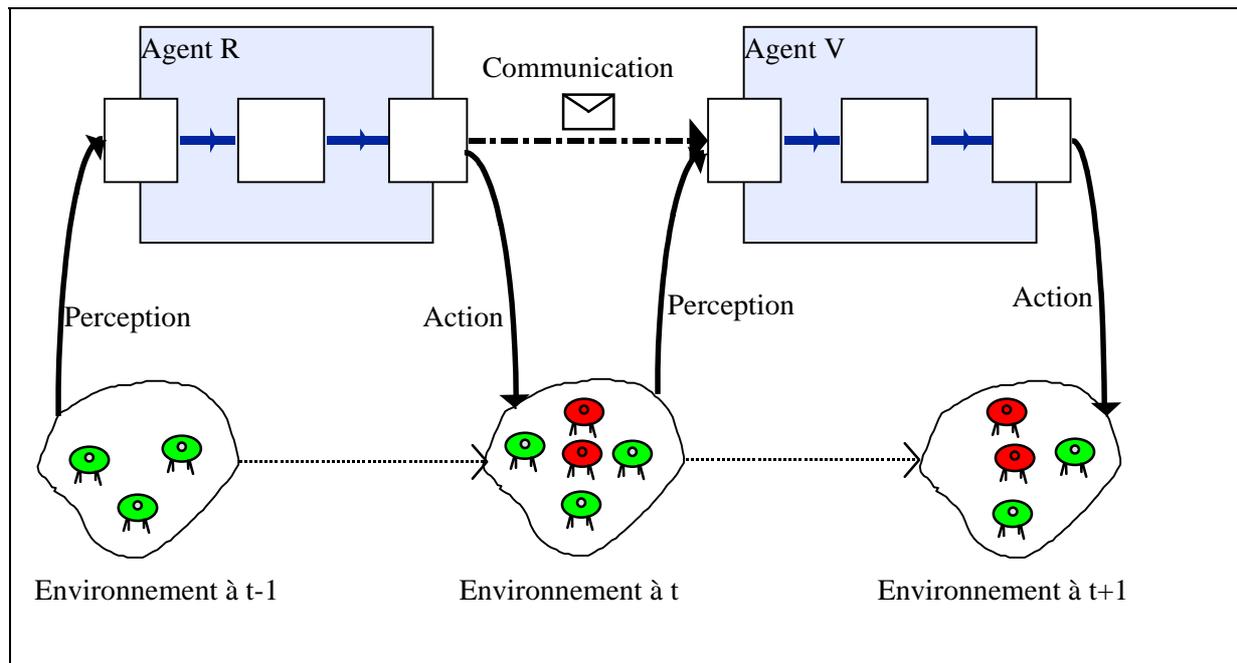


Figure 9 : deux modes d'interaction différents sont possibles et peuvent coexister dans un SMA.

Une autre caractéristique fondamentale des SMA, dans le contexte de ce travail, est de se focaliser sur la représentation des interactions entre les agents (Gleizes et al., 1994). C'est en particulier à ce niveau que cette méthode se distingue de la systémique qui met plus l'accent sur les flux entre sous-systèmes (Ferber, 1994). Selon le type d'agents et de SMA, les interactions peuvent avoir lieu selon différentes voies comme l'exemple présenté dans la Figure 9 : communications directes ou interactions véhiculées par l'environnement. Dans ce dernier cas, les actions de certains agents sur l'environnement sont perçues par d'autres, d'où l'interaction.

aux interactions, aux communications, l'important n'étant pas nécessairement la portée de celles-ci mais l'endroit où elles tombent.

Le mode d'interaction ou de communication *via* l'environnement est utilisé dans de nombreux SMA, en particulier quand l'accès à des ressources est en jeu tel que dans la simulation de processus de structuration sociale dans des sociétés humaines du Paléolithique (Doran et al., 1994). Ce mode d'interaction, *via* l'environnement partagé par les agents du système, s'appuie sur "l'impossibilité de ne pas communiquer" pour des acteurs qui évoluent dans le même milieu (Watzlawick et al., 1972). Les interactions *via* des communications directes donnent lieu à la mise en place de protocoles logiques précis (Haddadi, 1996). Dans certaines expériences les SMA sont utilisés pour modéliser des négociations, dans ce cas deux niveaux de protocoles sont utilisés : l'un pour les communications et un autre pour la négociation en tant que succession organisée de communications⁴⁶, un exemple d'une telle modélisation a été appliqué à un processus de négociation au sein d'une assemblée communautaire dans les Andes (Franchesquin, 1995). En IAD enfin, pour la résolution distribuée de problèmes, chaque agent procède à des tâches individuelles et peut choisir de communiquer puis éventuellement de coopérer avec d'autres agents selon des plans individuels et / ou collectifs (Haddadi, 1995). Ces communications peuvent avoir lieu entre deux agents, d'un agent à un groupe d'agents (tel qu'une liste de diffusion) ou passer par une structure intermédiaire *a priori* distincte de l'environnement dénommée tableau noir (Haton, 1989) sur laquelle un agent inscrit son message, lu ensuite par les autres agents ayant accès à cette structure.

Ces structures intermédiaires à accès partagé, l'environnement partagé, les éventuels objectifs ou plans collectifs en œuvre en résolution de problèmes distribuée, les phénomènes d'émergence peuvent constituer des "objets médiateurs" autour desquels les agents vont se coordonner (Bousquet, 1994). Ceci incite à s'intéresser aux liens entre les individus et d'éventuelles structures collectives en présence dans un système irrigué et donc à la manière de représenter le collectif. L'existence d'au moins un niveau d'organisation supra-individuel est rendue nécessaire par la seule hypothèse de l'existence d'un environnement partagé à la base des SMA. Elle est renforcée par les conventions autour de la compréhension d'un langage commun dans le cas de communications directes si le SMA en met en œuvre (Rouchier et al., 1998). En IAD, le problème à résoudre constitue à lui seul un cadre collectif orientant les comportements de l'ensemble des agents (Conte et Castelfranchi, 1994). Certaines expériences de mise en œuvre de cette méthode font appel

⁴⁶ Le contenu des communications représentées fait lui même l'objet d'un débat en particulier sur la richesse de la syntaxe opposée à la vitesse d'interprétation des messages (Demazeau, 1995). Ces communications font souvent appel à la théorie des actes de langage en divisant la communication en couches qui séparent la syntaxe du contenu (Müller, 1996).

aux notions de plans ou d'objectifs communs intégrés au niveau des agents (Rao et al., 1992) ou sous forme d'une norme sociale propre au système (Conte et Castelfranchi, 1995). La manière de représenter les aspects collectifs et leurs interactions avec les agents individuels autonomes est actuellement l'objet d'un débat dans la communauté des SMA (Jean, 1997), des méthodes variées ont pour le moment été développées : existence d'agents collectifs autonomes, appartenance à un groupe comme attribut des agents individuels, émergence à partir d'interactions entre comportements individuels.

Cette thèse constitue une expérience particulière où, à travers la représentation et la simulation de systèmes irrigués, un exemple de prise en compte de cette question est proposé.

Dans le domaine de l'agriculture et de l'irrigation en particulier, quelques expériences de modélisations utilisant des SMA ont eu lieu. De nombreux cas sont en fait des systèmes multi-experts. Les agents du SMA représentent les experts sous forme de sources de connaissance. Ces experts communiquent *via* un tableau noir à propos du système étudié selon le schéma de la Figure 10. Le tableau noir comporte une base de données lue et éventuellement modifiée par les différents agents source de connaissance.

Une expérience de ce type a porté sur un outil d'aide à la décision pour la coordination de l'irrigation et des traitements phytosanitaires (Batchelor et McClendon, 1992) : les deux sources de connaissance correspondantes sont interrogées et en cas de conflit, une méthode d'arbitrage des conflits sur critère économique est mise en œuvre afin de fournir une aide à la décision prenant en compte les deux sources de connaissance. Une autre expérience, X-Breed, représente un plus grand nombre de sources de connaissance avec chacune un grand nombre de règles (Hochman et al., 1995). A cela s'ajoute un module de contrôle qui coordonne les agents sources de connaissance et les active quand c'est nécessaire.

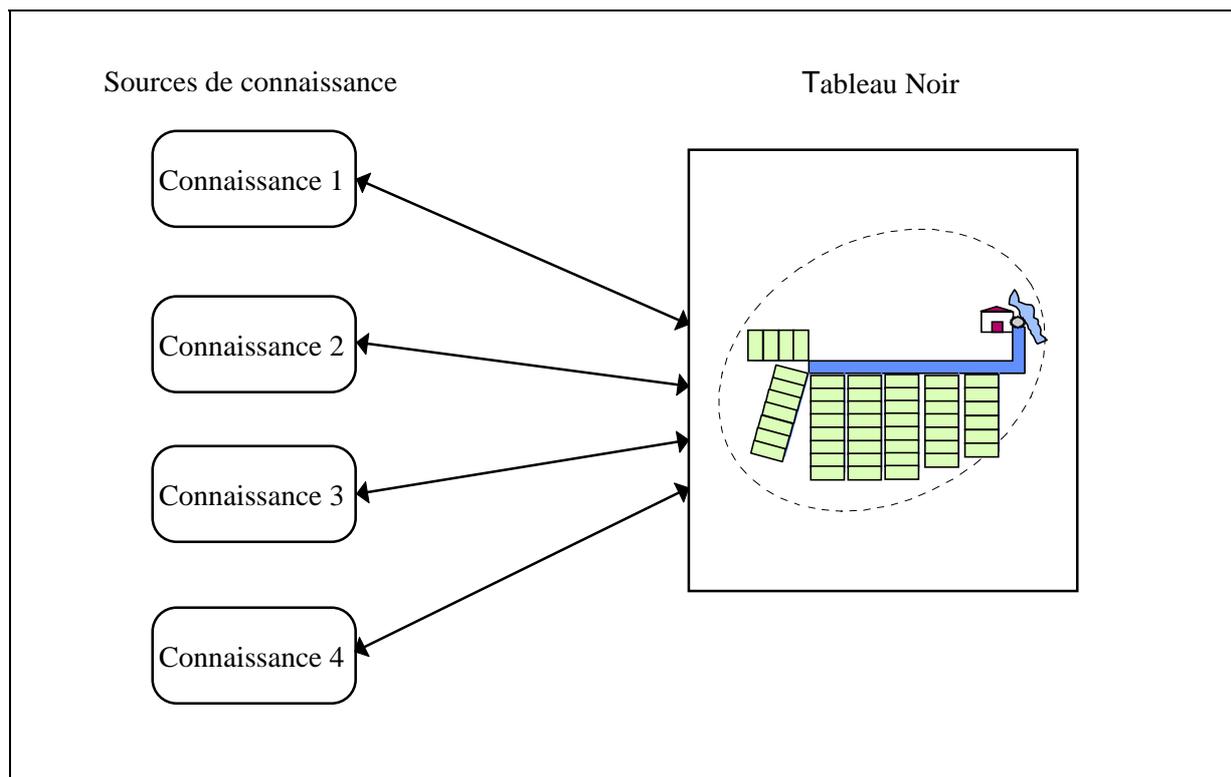


Figure 10 : communication d'agents via un tableau noir.

En fait, cette utilisation des SMA peut être rapprochée de la présentation du couplage de modèles du § 2.2.1, chaque source de connaissance faisant le plus souvent appel à un modèle sous-jacent. Elle apporte cependant un éclairage intéressant supplémentaire en mettant en œuvre explicitement une méthode d'arbitrage des conflits qui oblige à se poser la question des interactions entre les différentes disciplines. Ceci n'est pas nécessaire dans le cas de couplages de modèles classiques pour lesquels de tels problèmes de conflits ne se posent pas : le cas échéant ils sont traités au moment de l'écriture du modèle. Elle pose aussi l'objet d'étude au centre de la discussion entre les sources de connaissance ce qui oblige celles-ci à partager la même représentation du système étudié et répond ainsi à certains problèmes relevés dans le cadre des approches par couplage de modèles. Modèle pluridisciplinaire par excellence, il a souvent lieu en phase terminale de projets de recherche comportant plusieurs composantes pour rassembler les connaissances acquises par les différents chercheurs. Est-ce inhérent à ce type d'utilisation des SMA ? A priori pas nécessairement, mais l'accentuation sur les sources de connaissance pourrait bien être à l'origine de cette orientation.

A côté de ces systèmes multi-experts se sont développés récemment des SMA dont le but est d'explorer des scénarios de développement agricole à l'échelle régionale. Une de ces

expériences utilise un automate cellulaire⁴⁷ pour simuler la dynamique d'exploitations agricoles individuelles en compétition pour l'accès à la terre et à des marchés d'écoulement des produits (Balmann, 1997). Ce cas particulier s'intéresse à la dynamique d'un système d'agents individuels spatialisés en interaction *via* l'espace et un marché. Chaque agent exploitation agricole met en œuvre ses règles individuelles de comportement en fonction de sa fonction objectif, de son état financier et de ses actifs. Il n'y a ni comportements collectifs ni comportements relatifs à des interactions représentés.

D'autres travaux s'intéressent à des dynamiques spatiales mais plus spécifiquement au travers d'interactions et de négociations entre agriculteurs. Ainsi le SMA SimAndes représente des négociations pour des échanges de terres dans le cadre d'un système de rotation de jachères décidée collectivement. Sur un modèle s'intéressant de près aux protocoles de communication et de négociation, quelques scénarios représentant, soit un changement du contexte socio-économique, ou bien l'arrivée d'une innovation ou encore un changement dans les hypothèses de comportement des agents dans la négociation, donnent lieu à des simulations résultant sur des indicateurs relatifs au taux d'utilisation de la terre, à l'occupation de la main d'œuvre, au nombre d'accords et à la satisfaction des réseaux (Paz Bétancourt, 1997).

Cette expérience intéressante d'utilisation de simulations multi-agents pour représenter un système agricole amène à se poser la place de la négociation vis-à-vis du modèle, ou du modèle relativement à la négociation, et *in fine* du public visé par le modèle : la négociation est-elle représentée dans le modèle ou fournit-elle potentiellement les scénarios à simuler ? Dans le premier cas, comme dans l'exemple proposé, deux niveaux de modélisation sont en fait à considérer : d'un côté la modélisation du système réel, ici les terres et les activités des paysans, d'un autre côté une discussion entre les agents représentant les acteurs du système réel à propos du système réel. C'est en quelque sorte une expérience du type Tableau Noir dont les sources de connaissance seraient les acteurs et où l'accent est mis sur la coordination entre celles-ci. De telles simulations sont *a priori* à destination d'utilisateurs extérieurs du système pouvant faire varier le contexte dans lequel évolue le système réel. Dans le deuxième cas, seul le premier niveau est représenté et peut être utilisé dans des négociations qui elles seraient réelles, d'où un public potentiellement concerné au niveau des acteurs du système représenté.

⁴⁷ Un automate cellulaire est un ensemble de cellules contiguës évaluant selon des fonctions de transition qui déterminent l'état à venir de chaque cellule en fonction de son état actuel et de celui des cellules voisines (Wolfram, 1984).

Il reste enfin quelques autres expériences s'intéressant aux modes de coordination entre agents dans un SMA appliqué au milieu agricole comme le précédent avec en plus une représentation de processus d'apprentissage. Ainsi une expérience de modélisation de négociations autour de l'accès d'exploitations agricoles à des parcs de matériel collectif, est partie du principe que le comportement des agriculteurs est le produit d'une évolution historique et ne peut donc être représenté par des règles simples du type de celles rencontrées classiquement en théorie des jeux. Les règles de négociation mises en œuvre par les paysans ont alors été supposées évoluer au gré des interactions en fonction d'une fonction d'utilité propre à chaque paysan que chacun cherche à augmenter (Petit-Singeot et Fuhs, 1994). De même, l'exemple de modélisation de terrasses irriguées à Bali présenté précédemment a donné lieu à un développement complémentaire prenant en compte ces questions d'évolution des règles individuelles et d'un apprentissage collectif en résultant, comme fruit des interactions entre les différentes terrasses (Lansing et Kremer, 1994). Ces deux exemples ont en commun de s'inspirer de la théorie de l'évolution en biologie en considérant des génomes dont les codons seraient des règles et un processus de sélection *via* une imitation des comportements des voisins, dans la mouvance d'une branche particulière de l'Intelligence Artificielle, la Vie Artificielle (Langton, 1988), Petit-Singeot et Fuhs y ajoutent des possibilités de réplication et de mutation des stratégies. Dans le cas des terrasses irriguées à Bali, les applications ont permis de montrer que la structure de coordination en réseaux de terrasses autour de temples permet une meilleure capacité de réaction aux accidents climatiques. Du point de vue d'une étude de la viabilité de ces systèmes, la prise en compte de l'évolution des règles et donc des questions d'apprentissage paraît ainsi très intéressante.

Les SMA constituent donc ainsi une technique de modélisation permettant de bien prendre en compte et de représenter les interactions entre les acteurs d'un système et les conséquences de ces interactions pour la dynamique du système ainsi que de se placer dans une démarche centrée sur l'objet d'études. Même en se limitant au domaine agricole, les usages présentés montrent que la gamme d'usages de ce type d'outils est assez large, aussi bien en terme de démarche que de public concerné, et ne répond donc pas nécessairement au type de question que l'on se pose. Il reste à voir si une utilisation associée à la démarche d'analyse décrite auparavant basée sur les modes d'appropriation et les processus de décision est possible et si elle amène à un outil pertinent pour traiter des liens entre modes de coordination et viabilité des systèmes irrigués.

2.3.3 Pourquoi cette approche ?

Le modèle préalable de la dynamique du système que constitue la démarche d'analyse modes d'appropriation et processus de décision est cohérent avec une modélisation *via* un SMA. Entre les deux les parallèles sont en effet nombreux. L'une comme l'autre mettent au centre de leur démarche les interactions entre les différents éléments du système, actifs ou passifs. Ces interactions sont vues dans les deux cas aussi bien de manière statique que dynamique. Ainsi aux interrogations de la démarche d'analyse retenue relatives aux modes d'appropriation, répondent celles du processus de modélisation par les SMA sur la représentation de ces interactions. Et il s'agit bien de toutes les interactions en présence dans un mode d'appropriation dont il s'agit, celles qui concernent les relations des acteurs avec leur environnement comme celles qui concernent les acteurs entre eux à propos de leur environnement. La notion de représentation est incluse dans ces interactions et est explicitement prévue par cette démarche de modélisation.

Au delà de cet aspect compréhension de la structure des interactions, la démarche d'analyse comme l'outil de modélisation proposé s'intéressent à la dynamique de ces interactions. D'un côté les processus de décision conduisent à observer les changements de modes d'appropriation éminemment évolutifs, d'un autre côté, les comportements des agents en interaction peuvent évoluer au fil de ces interactions. Dans les deux cas il n'y a pas d'hypothèse préalable relative à la nécessité de l'existence d'un équilibre pour la cohérence de la démarche.

Les parallèles ne s'arrêtent pas à ces deux composantes fondamentales : des rapprochements peuvent être faits entre certains concepts mis en avant de part et d'autre et également entre des débats qui y ont cours. Ainsi, à la notion d'institution, centrale dans les approches relatives à la gestion des ressources en propriété commune, fait pendant le concept d'émergence mis en avant dans la communauté des SMA. Telles que les définit Ostrom, les institutions peuvent en effet être vues comme un ensemble de règles émergentes d'individus en interaction. Dans ces deux cas se pose la question de la représentation de ces structures supra-individuelles. Il s'agit de prendre en compte à la fois le cadre collectif d'interactions que constituent les institutions et leur constitution comme produit d'interactions. Il s'agit de simuler à la fois des structures collectives émergeant de comportements individuels et l'effet de ces structures sur ces comportements. Pour cela différentes approches existent et sont le sujet de débats intenses dans les deux communautés (Layder, 1994 ; Lenay, 1996).

En plus de ces parallèles entre les débats ainsi qu'entre les concepts, rappelons que ces deux méthodes prennent toutes deux en compte les exigences d'interdisciplinarité et de

représentation des règles et des interactions spécifiques au traitement de la question relative à la viabilité des systèmes irrigués. Tous ces centres d'intérêt partagés font penser que l'usage de la démarche d'analyse issue des travaux sur la gestion des ressources en propriété commune avec une modélisation utilisant un SMA peut être intéressant, même si cela implique la modélisation de comportements humains, ce qui peut poser problème. Les SMA peuvent ainsi apporter un prolongement intéressant aux travaux sur la gestion de ressources en propriété commune et constituer un complément intéressant à la théorie des jeux déjà utilisée par quelques auteurs dans une optique de théorisation (Sengupta, 1991). Les jeux peuvent en effet être représentés par un SMA ce qui permet d'étudier la cohérence entre les deux méthodes de modélisation, et si les SMA ne permettent pas d'obtenir un ensemble de solution complet, ils permettent d'explorer plus largement les solutions issues d'une étude de jeux. Ils permettent par exemple d'étudier l'effet d'une spatialisation des joueurs (Nowak et May, 1993) ou d'une prise en compte d'une réponse de l'environnement aux comportements de ceux-ci (Bousquet et al., 1996). Ils permettent aussi de simuler une évolution des stratégies de comportement par des techniques issues des algorithmes génétiques (Lomborg, 1994). Des travaux en cours utilisent un simulateur multi-agent pour discuter les principes économiques de la gestion des ressources renouvelables (Antona et al., 1998).

Des exemples d'association de cette démarche d'analyse avec cette méthode de modélisation ont déjà été utilisés ou sont en cours d'utilisation sur d'autres exemples de ressources renouvelables. Une des premières expériences a concerné la pêche dans le Delta Central du Niger (Bousquet, 1994 ; Cambier, 1994). Celle-ci, centrée initialement sur l'intégration de connaissances d'origine diverse pour l'étude d'un objet complexe au moyen d'un SMA, a fait le choix de représenter ce dernier par les interactions dont il est le lieu et les processus de décision. Elle a en particulier mis en avant l'intérêt de la modélisation des représentations, un des éléments des modes d'appropriation, pour l'étude des interactions homme-ressource (Bousquet, 1994).

Dans le cas de la gestion locale de la faune sauvage par des communautés villageoises de l'Est du Cameroun, un travail récent a mis en évidence un écosystème complexe avec de multiples interactions avec les groupes humains locaux selon des règles particulières (Lescuyer, 1998 ; Takforyan, 1996). Parmi ces interactions les pratiques de la chasse suivent un système de règles représentées dans un SMA pour étudier leur rôle dans le fonctionnement de l'écosystème et la capacité de résistance du système de gestion qui en découle à d'éventuelles modifications du contexte (Bakam et al., 1997).

Un troisième exemple s'intéresse à la gestion locale des terres de parcours dans le Nord-Cameroun à travers les agréments entre transhumants et sédentaires. Une modélisation par un SMA des transactions observées sur le terrain et de leur dynamique (Requier-Desjardins, 1997) est en cours de réalisation pour simuler l'émergence des différents réseaux sociaux qui peuvent en résulter (Rouchier, comm. pers.).

Nous avons ainsi une démarche d'analyse et un outil d'exploration permettant de bien prendre en compte, comme hypothèses de travail et non comme paramètres du système, les différentes règles en œuvre dans un système irrigué, individuelles, collectives et relatives aux interactions. Elle permet également d'explorer les effets de ces règles sur la viabilité de ces systèmes irrigués et répond bien aux besoins identifiés auparavant pour travailler sur la question des liens entre modes d'organisation et viabilité des systèmes irrigués.

Cette méthode repose conjointement, d'une part sur l'analyse de cas de terrain à partir des modes d'appropriation et des processus de décision et d'autre part sur leur modélisation et leur simulation au moyen de Systèmes Multi-Agents. La complémentarité entre ces deux éléments de la méthode et la symétrie de plusieurs questions qui se posent à eux permettent d'espérer un enrichissement mutuel de leur interaction dont le produit permettra de progresser sur la viabilité des systèmes irrigués. Il reste à mettre cette interaction en œuvre dans le cas de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal.

DEUXIEME PARTIE : DU TERRAIN AUX SIMULATIONS

L'explicitation de la démarche proposée à la fin du chapitre précédent dans le cas de sa mise en œuvre pour les systèmes irrigués de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal repose sur les trois éléments qui la constituent : un terrain, une représentation de ce terrain dans un SMA, un plan d'expériences sur cette représentation. Il s'agit dans cette partie de décliner modes d'appropriation, processus de décision et simulations dans le contexte particulier de la question de la viabilité des systèmes irrigués.

Pour chacun des trois éléments de la démarche, nous nous attacherons à décrire dans le premier chapitre de cette deuxième partie la méthode utilisée et l'élément de la démarche qui en résulte : protocole d'enquêtes et terrain, hypothèses de modélisation et SMA, questions sous-jacentes et plan d'expérience. Le chapitre suivant est consacré aux résultats des simulations réalisées dans le cadre du plan d'expérience proposé.

3. Du terrain au modèle, une modélisation d'accompagnement de la recherche

Le double ancrage sur une démarche d'analyse et une méthode de représentation a conduit à une approche impliquant de manière conjointe un travail de modélisation et un travail de terrain. Des enquêtes et des observations sur le terrain, à partir de travaux déjà existant et selon la démarche d'analyse présentée plus haut, ont alterné avec un travail de modélisation, chacun interrogeant l'autre au moyen d'expériences de simulation et d'enquêtes sur le terrain.

Les phases sur le terrain conduisent aux hypothèses de modélisation et aux scénarios de simulation, les phases consacrées au modèle à des expériences de simulation et elles-mêmes à de nouveaux angles d'approche sur le terrain. Il s'est agi d'une démarche de construction des thèmes d'enquêtes et du modèle en parallèle, selon une modélisation d'accompagnement de la recherche (Bousquet et al., 1997). Le principe de cette modélisation d'accompagnement est représenté par la figure 11.

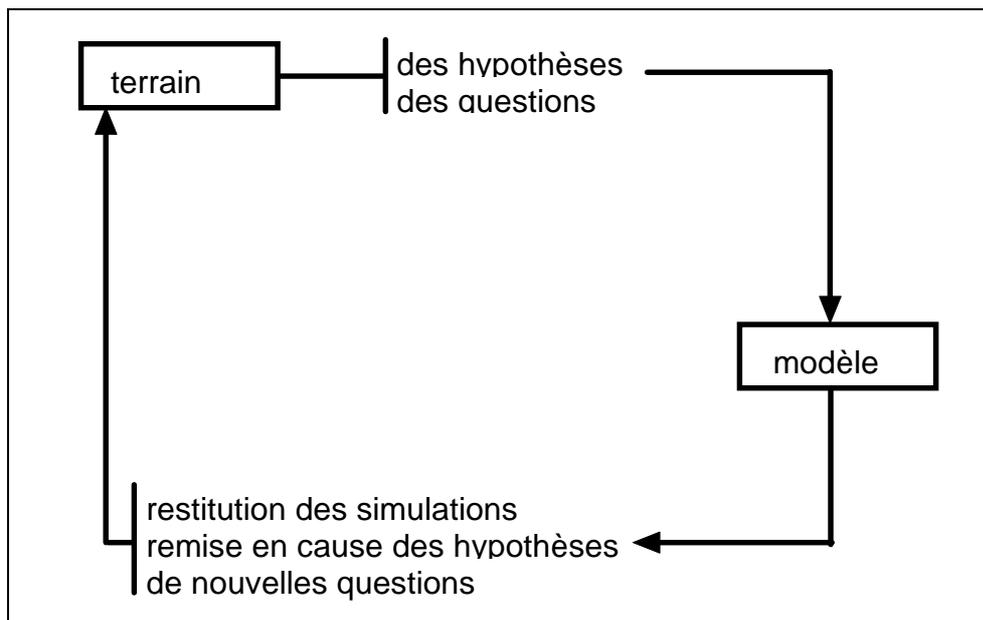


Figure 11 : représentation de la modélisation d'accompagnement

Cette alternance amène à une double représentation du terrain, une première sous la forme d'une description des règles et comportements observés, proche du terrain, et une seconde sous la forme d'un système irrigué virtuel, construite à partir de la première, en se donnant des hypothèses orientées par la question traitée et par les terrains représentés. Pour plus de clarté, les deux faces de cette représentation sont présentées séparément. Le lien entre ces

deux faces passe en particulier par un plan d'expériences sur le modèle pour des questions relatives au terrain, c'est l'objet de la troisième partie de ce chapitre.

3.1 Le terrain

3.1.1 Choix des sites et construction des thèmes d'enquêtes

choix des sites

Nous avons vu au premier chapitre que la moyenne vallée du Sénégal est le lieu de différents types de systèmes irrigués. Leur variabilité a plusieurs explications, structurelles et historiques. On peut citer en particulier :

ancienneté de l'histoire du système irrigué.

modèle auquel se rattachaient les personnes en charge de leur conception.

spécificités propres aux groupes sociaux à qui ils ont été attribués.

Les variations entre les systèmes irrigués de cette région portent à la fois sur les conditions initiales de mise en place des systèmes⁴⁸ et sur leurs voies d'évolution ultérieure. Une telle diversité locale de systèmes irrigués est *a priori* un facteur propice à l'observation de différents modes d'appropriation et processus de décision permettant ainsi de limiter la spécificité de la représentation obtenue à des sites particuliers⁴⁹. Par contre la question de la viabilité de ces systèmes irrigués se pose, à des degrés divers, pour chacun d'entre eux.

Dans la moyenne vallée, la zone de Podor a l'avantage d'être maintenant relativement connue. Elle est le terrain de nombreux travaux dans différents domaines, en particulier de l'ISRA⁵⁰ et de l'ORSTOM⁵¹, qui ont donné lieu à une riche mise en commun de points de vue variés sur un même objet, le système irrigué (Boivin et al., 1995a). Ces travaux constituent une bonne base pour démarrer un travail sur une question interdisciplinaire en guidant dans le choix des hypothèses initiales et donc des premiers thèmes d'enquêtes. Ils constituent aussi, et leurs auteurs encore plus, une référence pour confronter les modèles et les scénarios construits.

⁴⁸ Aussi bien au niveau des caractéristiques physiques de l'aménagement que sur des règles de mise en œuvre.

⁴⁹ Même si la question du caractère générique du modèle obtenu reste à discuter, ce qui sera fait au § 6.1.2.

⁵⁰ Institut Sénégalais de Recherche Agronomique

⁵¹ Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement et la Coopération.

La zone de Podor étant retenue, il se pose la question du choix des sites d'étude particuliers au sein de cette zone, en tenant compte de cette variabilité existante *a priori*. Dans la suite de la définition proposée d'un système irrigué, les échelles de choix des sites ont été celles des systèmes irrigués : périmètre et parcelles, campagne agricole et jour, GIE et paysans. La variabilité entre les systèmes irrigués de la moyenne vallée est surtout intéressante pour couvrir la diversité des modes d'appropriation en œuvre au sein de ces différents systèmes : il ne s'agit pas d'établir une typologie décrivant les modes d'appropriation en œuvre autour de Podor, mais d'en observer un échantillon important pour ensuite travailler sur les différentes interactions possibles. C'est pourquoi nous avons retenu les systèmes pouvant mener à la plus grande diversité de règles collectives et de comportements individuels en œuvre, sans souci de représentativité. Ce qui nous intéresse ici, c'est l'existence de comportements particuliers. C'est pourquoi les cinq sites suivants ont été retenus chacun en tant que représentant d'un ensemble de conditions initiales données. En ce qui concerne les PIV, deux cas ont été retenus, connus pour avoir eu des évolutions très différentes. Ces sites sont présentés dans le Tableau 1.

Nom du périmètre	Modèle
Nianga	Grand périmètre SAED
N'Dioum	Périmètre intermédiaire FED
IT2 Donaye	PIV Italpanti
Guia 4	PIV SAED / FED
N'Diawar	PIV SAED

Tableau 1 : sites étudiés dans le protocole de travail sur le terrain.

L'annexe 2 présente les grandes caractéristiques de ces différents sites. Retenons surtout qu'il y a là un grand périmètre initialement dépendant de la SAED, un périmètre de taille un peu plus petite de construction récente, trois PIV, l'un selon un modèle de la coopération italienne et deux autres plus classiques mais ayant eu des évolutions différentes. Au sein de la diversité locale des aménagements il manque un aménagement de type "privé" mais leur mise en culture est plus rare et rend difficile un suivi sur plusieurs campagnes. Par ailleurs, plusieurs paysans suivis avaient aussi des parcelles sur de tels aménagements et il en a parfois été question dans les entretiens.

participation des étapes intermédiaires de la modélisation d'accompagnement à la constitution des thèmes d'enquêtes

Les premiers thèmes d'enquête, et la première version du modèle, étaient centrés sur la question des modes d'allocation de l'eau entre les paysans le long d'un irrigateur⁵² parce que c'est l'un des moments où la coordination entre paysans est nécessaire pour la gestion de l'eau et une des questions posées par les observateurs de ces systèmes est la grande consommation d'eau par rapport aux besoins des plantes. Ainsi une efficacité totale de 45 % a été observée sur le périmètre de Nianga (Séguis et Dubée, 1994). La question des modes de partage de l'eau est fréquemment posée dans la littérature qui montre une grande diversité d'expériences de par le monde. Dans sa thèse, Gilot fait une revue des différents modes de distribution rencontrés (Gilot, 1994) et propose un schéma de classification en fonction des modes de détermination des paramètres de fréquence, de débit et de durée des arrosages. Ce schéma est repris à la Figure 12.

L'eau étant un élément central et partagé du système irrigué, les modes de coordination autour de l'accès à l'eau ont alors été considérés dans un premier temps comme représentatifs des modes de coordination au sein du système.

Un premier modèle a été construit à partir des observations sur l'allocation de l'eau entre les paysans d'une même maille hydraulique. Il comportait en particulier un paramètre de règle collective relatif au mode d'allocation de l'eau, un paramètre relatif aux préférences individuelles des paysans entre leur parcelle et leurs autres activités et la possibilité d'échanges d'information et ou de services entre les paysans en fonction de leur appartenance à des réseaux sociaux (Barreteau et al., 1997).

⁵² Tous les termes propres à la description des périmètres sont explicités en annexe 2

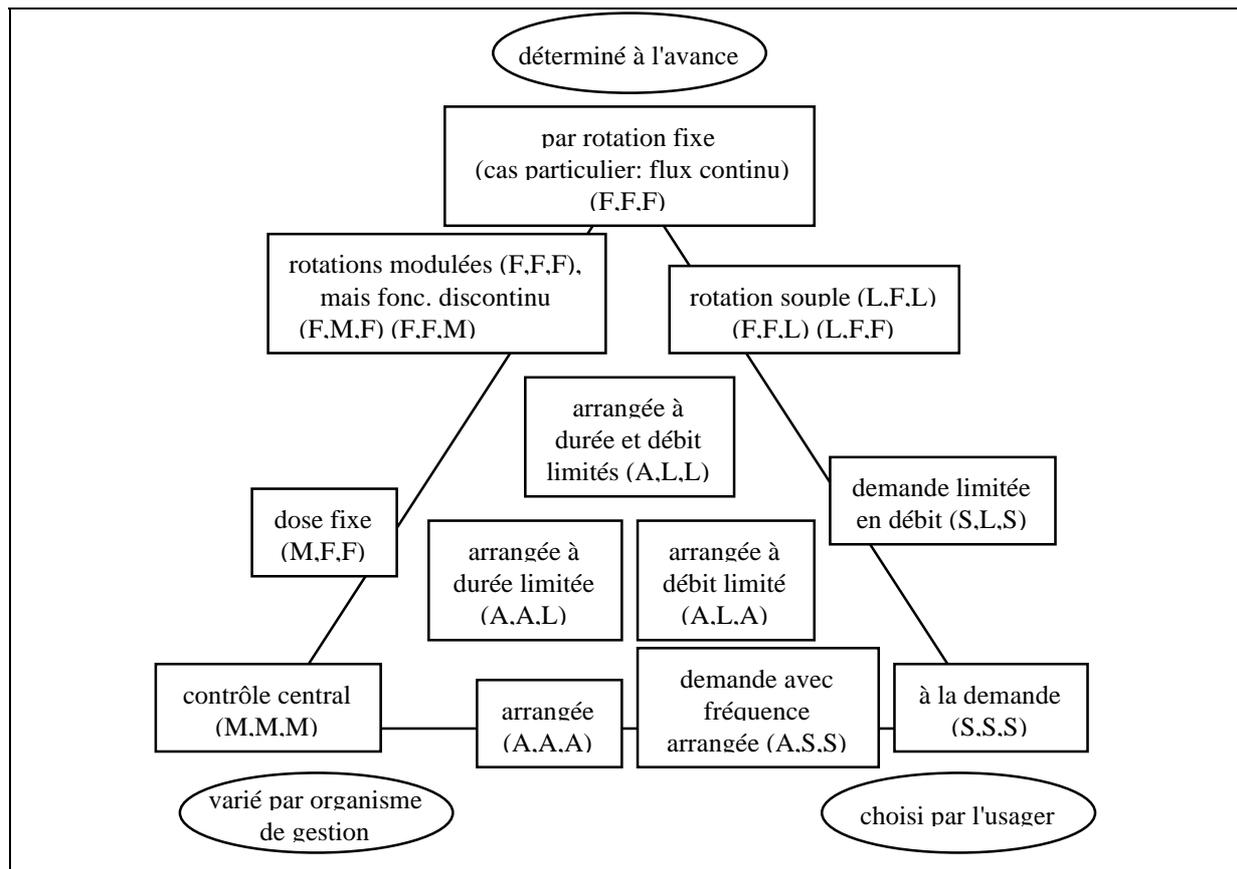


Figure 12 : schéma de classification des modes de distribution (d'après Gilot, 1994). Les paramètres sont dans l'ordre : ordre d'arrosage, débit, durée. Leurs modes de détermination possibles sont : F: fixe, M: modulé par l'organisme de gestion, A: arrangé entre l'utilisateur et le centre de gestion, S: sans limite et L: limité.

Des simulations sur ce premier modèle selon le plan d'expérience du Tableau 2 ont montré que l'existence et la taille des réseaux sociaux au sein desquels avaient lieu les éventuelles coordinations entre les paysans à ce sujet semblaient avoir plus d'influence que la règle collective d'attribution de l'eau sur le nombre et la durée des épisodes d'assèchement inopportun des parcelles (Barreteau et al., 1997). Ce plan d'expérience donne la possibilité de choisir si la règle d'attribution de l'eau est de type libre service ou selon un tour d'eau, si les paysans peuvent venir tous les jours sur leur parcelle ou non, et s'ils procèdent ou non à des échanges de services. Dans le cas où il y a des échanges de services, les réseaux sociaux au sein desquels ils se font sont au nombre de 1, 2 ou 3.

règle collective d'attribution de l'eau	prise en compte des autres activités	prise en compte des échanges
Libre service	Libre service avec contraintes	Libre service avec échange d'informations
Séquentiel	Séquentiel avec contraintes	Séquentiel avec échange de services

Tableau 2 : plan d'expérience des simulations sur la première version du modèle. La troisième colonne se subdivise en trois cas selon le nombre des réseaux sociaux au sein desquels se font les échanges.

Les figures 13 et 14 ci-dessous montrent les résultats des simulations correspondantes. La phase de démarrage de la campagne n'étant pas prise en compte, les simulations débutent avec toutes les parcelles remplies d'eau. Les oscillations observées sont dues à ce démarrage avec toutes les parcelles dans le même état. Le pas de temps de cette première version était l'heure. Chaque scénario a été répété 20 fois.

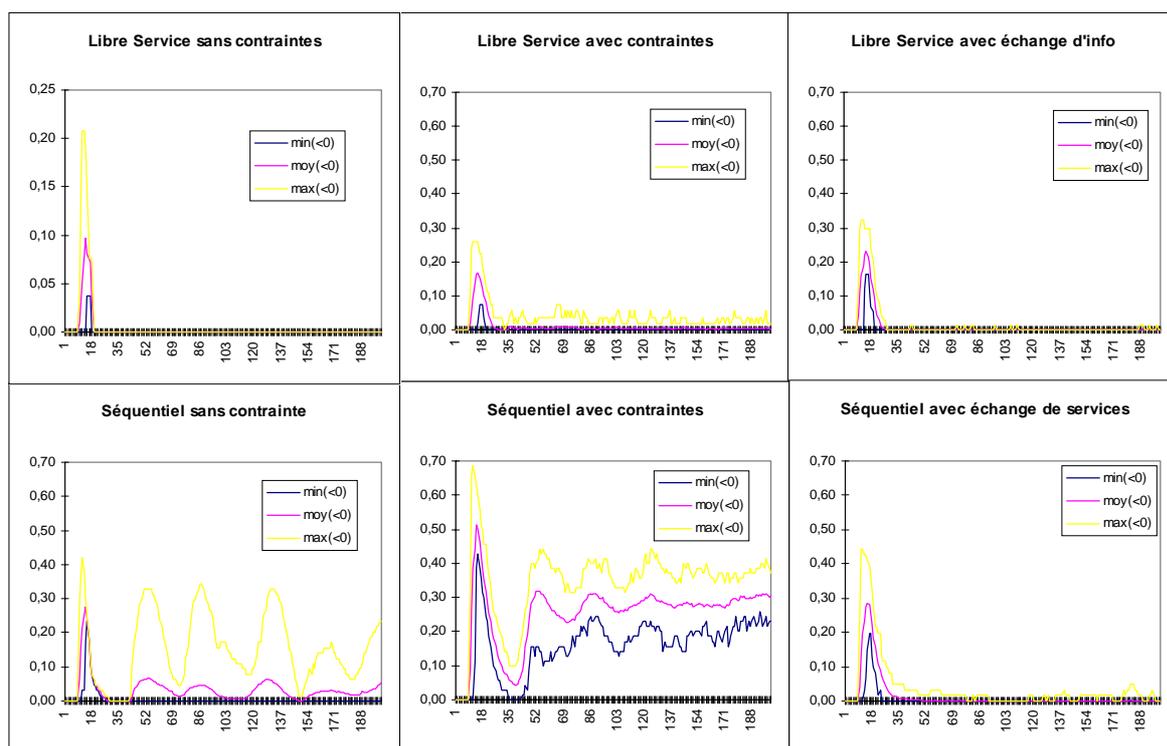


Figure 13 : taux de parcelles à sec en fonction du temps pour les scénarios du Tableau 2.

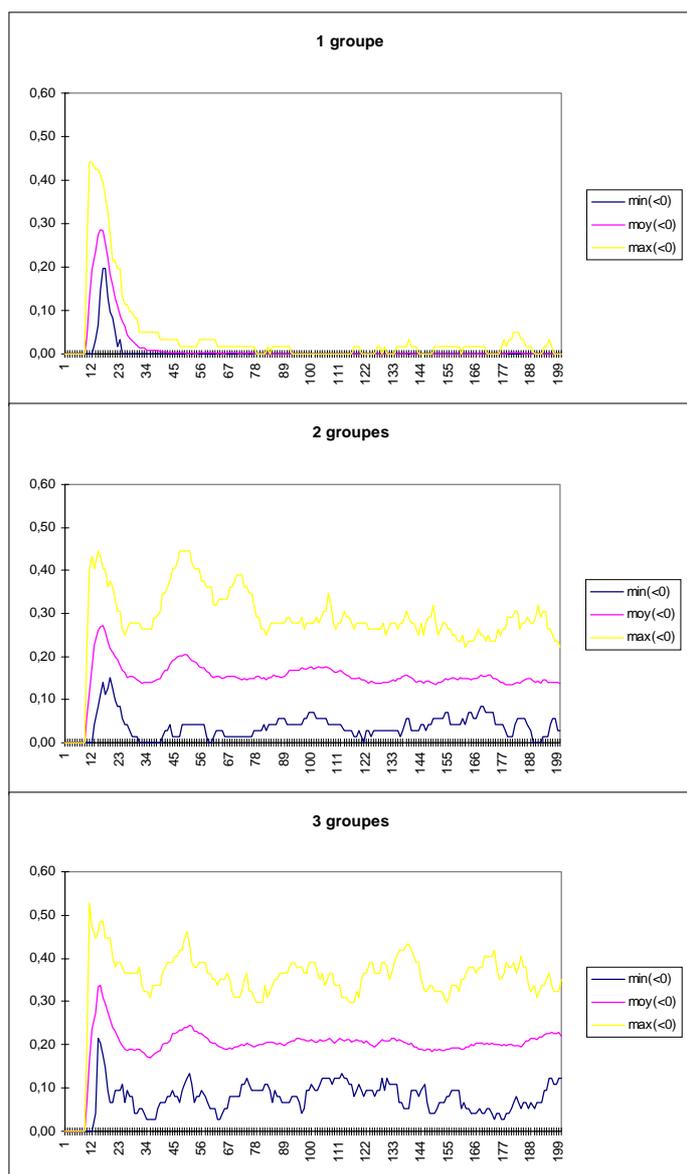


Figure 14 : taux de parcelles à sec en fonction du temps pour les scénarios avec échange de services en fonction du nombre de groupes.

La comparaison de ces différents ensembles de simulations montrent que, outre la prise en compte des autres activités des paysans, le nombre de réseaux d'affinités sociales au sein desquels se font les échanges de services semblent avoir un effet important pour l'indicateur "nombre de parcelles à sec". C'est ce qui va orienter la suite de notre travail.

conséquences pour les enquêtes et l'évolution du modèle

Ces résultats nous ont alors incités à nous intéresser de plus près à la dynamique des différents réseaux sociaux en œuvre dans un système irrigué dans une deuxième phase de terrain. Or ceux-ci sont plus particulièrement activés dans les phases de démarrage des campagnes, à savoir pour les activités concernant la recherche de crédit, le remboursement des arriérés et l'autorisation de participer à la campagne. Les entretiens suivants ont alors

porté sur ces thèmes et sur les interactions perçues par les paysans et les responsables des systèmes irrigués avec les autres acteurs de ces systèmes.

Cette deuxième série d'entretiens a donné lieu à une deuxième version du modèle dans laquelle les différentes phases se déroulant lors d'une campagne étaient explicitement représentées : préparation de la campagne et entretien de l'irrigation en particulier. Dans cette perspective, chaque campagne a son déroulement linéaire propre. Le lien d'une campagne à la suivante passe seulement par l'accumulation des sacs de riz produits et non consommés ou l'accumulation des dettes et arriérés de paiement de chaque paysan. La question de ce qui se passe à la fin de la campagne restait à poser : comment évoluent les règles et les comportements représentés. Ceci a donné lieu à une troisième série d'enquêtes dont les thèmes étaient cette fois relatifs à l'appréciation des résultats d'une campagne et aux processus en œuvre dans la modification des règles et des comportements par chaque acteur et chaque groupement. Le Tableau 3 fait la synthèse des différents thèmes d'enquêtes abordés.

étape 1	présentation générale des aménagements et des pratiques des paysans historique des systèmes irrigués étudiés interactions perçues par les paysans critères d'irrigation
étape 2	préparation de la campagne et choix de mise en culture allocation de l'eau mise en œuvre des règles de pompage circulation du crédit remboursement des dettes
étape 3	évaluation des campagnes évolution des règles collectives et des comportements individuels

Tableau 3 : récapitulatif des thèmes des enquêtes sur le terrain

3.1.2 mise en œuvre de l'approche présentée

Avec ce choix de sites et de thèmes d'enquêtes, le travail a d'abord consisté dans le choix d'interlocuteurs réguliers au sein de chaque système étudié. "Choix" n'est probablement pas le terme exact, ou alors ce fut un choix limité et de diverses origines. Il s'agit plutôt d'un choix mutuel entre les interlocuteurs en question et moi-même, avec l'accord du bureau des groupements dont font partie ces paysans. Ce choix a ainsi été effectué non pas au sein de l'ensemble de la population de chaque système mais parmi les paysans présentés par le

responsable du GIE consulté au préalable et qui répondaient ainsi à la double condition d'être disponibles et d'accord pour des entretiens réguliers d'une part et d'avoir l'accord du responsable du GIE pour répondre à des questions d'autre part. Il y a certes là un biais quant à la représentativité *a priori* des interlocuteurs ainsi retenus au sein de la population des systèmes étudiés. Cependant l'objectif de ces enquêtes n'est pas la représentativité au sens statistique du terme mais ***l'observation et l'identification de la gamme de règles et de comportements existant la plus large possible***. Le respect de cette règle de bonne conduite vis-à-vis des représentants des paysans a également permis le bon déroulement de ces entretiens en explicitant dès le départ la relation du chercheur aux paysans. Il a été ainsi, en partie, compensé par le croisement des réponses, des informations obtenues par d'autres entretiens informels et par une relation de confiance s'étant établie avec certains des interlocuteurs au fur et à mesure des entretiens.

Le choix de ces interlocuteurs s'est fait de même que le choix des sites et des thèmes d'enquête initiaux à partir de la bibliographie existante sur cette région (Lericollais et Sarr, 1995 ; Tarrière-Diop, 1995 ; Poussin, 1995) et de travaux antérieurs sur les liens entre pratiques de gestion de l'eau et consommation d'eau dans l'un des sites étudiés : le périmètre de Nianga (Barreteau, 1994). La nature de la problématique sur la viabilité des systèmes irrigués qui met en avant la notion de mode d'organisation, ainsi que l'expérience des travaux antérieurs, nous ont conduit à choisir une structure d'observations commune à tous les systèmes étudiés constituée de la manière suivante :

des responsables de chaque GIE, président et autres membres du bureau éventuellement chargés d'une activité particulière telle que la gestion du pompage ou la trésorerie quand cette activité était concernée par un des thèmes d'enquête.

deux paysans pour chaque GIE.

pour les deux périmètres de plus grande taille où un niveau d'organisation supplémentaire existe (cf. annexe 2), ce dispositif a été modifié ainsi :

Pour le périmètre de Nianga : prise en compte de deux GIE intermédiaires de la même manière que pour les PIV plus les responsables de l'aménagement.

Le périmètre de N'Dioum a la particularité d'avoir une structure croisée. Suite à l'évolution du système, les paysans d'une UAI⁵³ ne sont pas tous nécessairement du même GIE et tous les membres d'un GIE n'ont pas tous leur parcelle dans la même UAI. Nous avons alors choisi trois UAI, une dont tous les paysans font partie du même GIE, une dont les paysans font partie de GIE différents réputés en conflits et une dont les paysans sont réputés être toujours absents. Pour cette dernière, certains thèmes

⁵³ Unité Autonome d'Irrigation. Appellation des mailles hydrauliques sur le périmètre de N'Dioum.

d'entretiens n'ont pas pu être abordés pour cause de difficultés à rencontrer les interlocuteurs retenus. Les entretiens se sont faits avec les responsables des GIE concernés par ces UAI et quelques paysans de chaque UAI, ainsi que des responsables de l'Union des GIE.

Cette structure d'observation constitue certes un filtre dans l'accès aux connaissances, mais elle est étayée par les travaux antérieurs, cette démarche ayant déjà fait ses preuves dans d'autres travaux (Laloë et Weber, 1987). Ce choix initial a été utilisé pour toutes les observations qui suivent.

Le travail sur les différents thèmes exposés précédemment sur chacun des sites choisis s'est fait selon diverses méthodes :

entretiens⁵⁴, à chaque fois sur un thème défini, avec les interlocuteurs choisis au départ.

tour des aménagements des systèmes étudiés :

observation des pratiques d'allocation de l'eau : qui prend l'eau quand ?

observation de qui travaille sur quelle parcelle.

discussions "impromptues" avec des paysans rencontrés sur le périmètre.

relevé des comptes pour les GIE qui en tiennent.

relevé des fonctionnements des stations pompages.

En ce qui concerne les entretiens, élément le plus important de ces observations, il s'est agi d'enquêtes auprès des interlocuteurs sur leurs comportements individuels et sur les règles collectives qu'ils mettent en œuvre ou qu'ils perçoivent, que l'interlocuteur ait été choisi comme paysan ou comme responsable. Cette technique d'entretiens auprès d'individus sur des points concernant une collectivité⁵⁵ a déjà été expérimentée pour des systèmes irrigués en utilisant un questionnaire (Young, 1985). Or "n'importe qui est prêt à répondre sur n'importe quel sujet à un enquêteur adroit, et sans contrepartie" (Poirier et al., 1993)⁵⁶. A ce risque de réponses à des questions non pertinentes pour l'interlocuteur, s'ajoute le risque de laisser de côté des questions qui paraissent pertinentes à l'interlocuteur pour le thème de l'entretien mais ne se trouveraient pas dans le questionnaire, quel que soit le sérieux avec lequel celui-ci a été constitué. Enfin, un entretien sous forme de véritable discussion est

⁵⁴ Tous les entretiens et discussion ont eu lieu avec un interprète, toujours le même.

⁵⁵ par opposition à la constitution de connaissances sur cette collectivité par agrégation de connaissances sur les individus, les deux méthodes n'étant cependant pas totalement substituables.

⁵⁶ Certes l'enquêteur peut ne pas être "adroit"... mais le risque d'avoir des réponses "pour faire plaisir" demeure non négligeable.

quand même plus agréable pour les deux protagonistes qu'une suite de questions, ce qui n'est pas à négliger dans un travail comme celui-ci où l'acquisition des connaissances se fait *via* une série d'entretiens.

C'est pourquoi nous avons choisi de faire les enquêtes sous la forme d'entretiens-discussion. Les thèmes servent d'introduction et de guide aux discussions. Cette méthode comporte alors un risque de non homogénéité des informations ainsi recueillies. Mais il s'agit de séries d'entretiens, tous les interlocuteurs ont été rencontrés plusieurs fois : il a ainsi toujours été possible de revenir sur une question en rappelant un entretien précédent lors d'une nouvelle rencontre. Les canevas d'entretien ont constitué un autre garde-fou à ce risque. Même si nous n'avons pas utilisé de questionnaires, à chaque thème était associé un canevas d'entretien organisé en sous-thèmes, permettant éventuellement de relancer la discussion et de faire un rapide bilan en fin d'entretien. Par ailleurs, le fait qu'une question ne soit pertinente que pour une catégorie d'acteurs est en soi une information intéressante. C'est pourquoi la méthode des entretiens a été conservée comme la principale des méthodes d'observation utilisées sur le terrain. Quelques exemples de notes d'entretiens sont donnés en annexe 3.

3.1.3 un cadre de représentation des systèmes irrigués dans la moyenne vallée du Sénégal

Ce travail d'enquêtes en complément des connaissances existant auparavant sur les terrains étudiés a conduit à un cadre de représentation des systèmes irrigués rencontrés sous forme de modes d'appropriation et de processus de décision.

Une première étape, issue des connaissances antérieures et de la première série d'enquêtes, fournit une représentation des systèmes irrigués sous la forme du schéma de la Figure 15 représentant les différents types de composants du système ainsi que les différents types d'interactions existant entre eux. Il s'agit non seulement des interactions entre composantes de l'aménagement, le circuit de l'eau, mais aussi entre paysans ou groupes de paysans et entre composantes de l'aménagement et paysans ou groupes de paysans. Ces dernières interactions sont des formes de modes d'appropriation. Enfin il s'agit aussi des interactions entre les composants du système et l'extérieur.

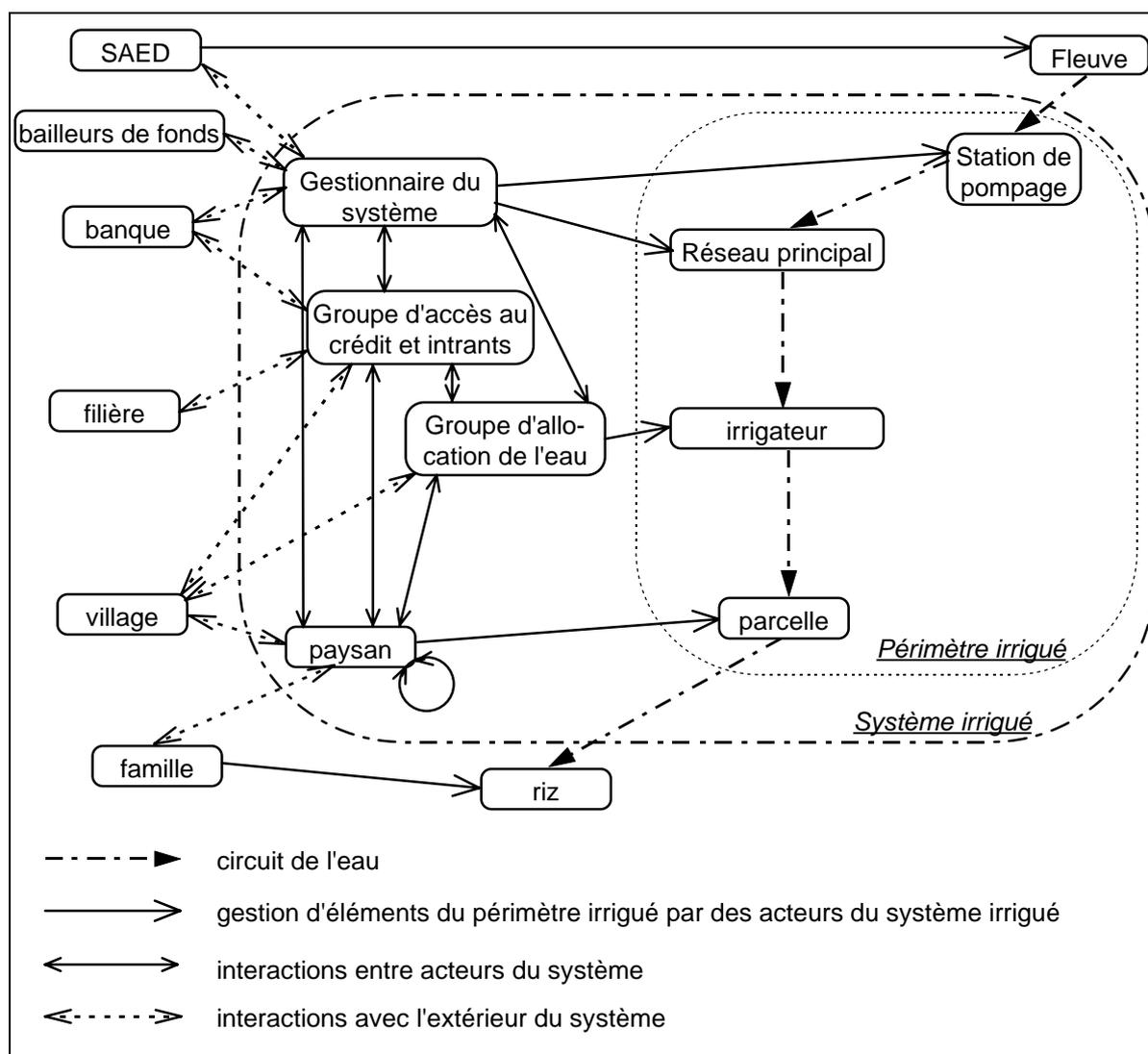


Figure 15 : représentation d'un système irrigué dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Les différents types de flèches correspondent aux différents types d'interactions.

Dans cette représentation, une station de pompage ou un GMP puise 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. Toutes les parcelles sont ici supposées avoir un accès direct à un irrigateur, ce qui était le cas à la conception de ces aménagements. Or, dans certains cas observés, suite aux différentes évolutions de ces systèmes, ce n'est plus toujours vrai : certaines parcelles ont été subdivisées en deux parties. Ceci induit de nouvelles interactions qui ne sont pas prises en compte dans la suite. A l'aval certains aménagements sont équipés d'un réseau de drainage non représenté sur la figure. Les particularités propres à chaque aménagement dans ce cadre général sont décrites en annexe 2. 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. Ces groupes peuvent être différents

ou regroupés en un seul et même groupe. Entre ces groupes et ces paysans ont lieu des échanges de biens, riz, intrants ou argent, d'informations ou encore de services. Enfin tous ces acteurs du système sont en relation avec d'autres acteurs extérieurs au système. Dans la figure une partie de ceux-ci sont regroupés dans le terme "filiale" qui regroupe à la fois les prestataires de services, les fournisseurs d'intrants, les commerçants et les industriels du riz qui achètent et transforment la production.

Il s'agit ci-dessus d'une première étape dans la description des interactions observables dans les systèmes irrigués en spécifiant les différents types d'entités du système impliquées. Il ne s'agit cependant que des extrémités des flèches de la figure 11, leur contenu, c'est-à-dire la nature du lien qu'elles représentent, n'est pas pris en compte. Il s'agit maintenant de compléter cette étape en s'intéressant aux flèches elles-mêmes et ce qu'elles représentent, afin de comprendre comment se passent les interactions : quels sont les comportements et les règles en usage à leur réalisation.

On commencera par s'intéresser aux interactions entre des acteurs et des composantes physiques du système : les paysans et leurs parcelles dans un premier temps, les groupements et les équipements collectifs dans un deuxième temps. On s'intéressera ensuite aux interactions entre acteurs du système : les paysans et les groupements dont ils font partie d'une part, les paysans entre eux d'autre part, directement ou *via* des réseaux sociaux extérieurs au système irrigué. Ceci nous amènera à expliciter quelques interactions d'acteurs du système avec des acteurs extérieurs au système. Enfin pour terminer cette description des systèmes étudiés, on présentera quelques éléments de la dynamique de ces interactions.

des paysans aux parcelles : différents objectifs de mise en œuvre.

La mise en œuvre des parcelles par les paysans repose tout d'abord sur un objectif attribué par le paysan à l'exploitation de sa parcelle. Chaque objectif correspond à une représentation différente de l'intérêt de l'exploitation de la parcelle. Le point de départ de la discussion avec les paysans ayant mené à cette classification a été le dialogue suivant répété avec de nombreux paysans.

un paysan : "le périmètre avant c'était bon, ça rapportait. Mais maintenant il y a trop de frais. Et les rendements ne sont plus aussi bons, autant dire qu'aujourd'hui ça ne rapporte rien, même des fois ça fait des dettes"

l'auteur : "mais alors pourquoi continuer à se fatiguer à cultiver ? Quitte à ne rien gagner, autant ne rien faire !"

Les réponses obtenues ont varié d'un élément à un autre. Quatre types d'objectifs ont ainsi pu être identifiés :

"production"

"nourriture"

"foncier"

"en attendant mieux"

Pour les premiers, la parcelle doit rapporter un revenu financier, et en rapporte déjà un, même si leur première réaction est de dire que la riziculture coûte plus qu'elle ne rapporte. La question du mode de commercialisation de la récolte se pose alors.

"Aussitôt après avoir récolté, il y a beaucoup de riz et le prix est bas. Il vaut mieux peser et donner ça à l'IT⁵⁷ qui vend plus tard quand le prix est plus élevé. [...]. Chez nous les charges équivalent environ à 16 sacs, normalement tu as plus que ça par campagne, donc ça va." (P1, 17/08/96)⁵⁸.

Ce sont des paysans qui ont soit une superficie relativement grande soit plusieurs parcelles dans un périmètre ou des parcelles dans différents périmètres. Pour ceux là si des paysans n'arrivent pas à gagner quelque chose, c'est qu'ils ne travaillent pas correctement.

La majorité des paysans suivis se rattache plutôt au deuxième type. Il s'agit d'une production de riz pour une consommation familiale. D'autres activités⁵⁹ sont chargées d'amener les ressources nécessaires pour les achats des autres biens : sucre, huile et aussi parfois intrants pour la campagne suivante, même si l'objectif de ces paysans est de cultiver pour obtenir un surplus correspondant à leur participation à l'alimentation de la famille.

"La parcelle sur Nianga sert à la consommation familiale. Je crois que cultiver la terre, c'est plus facile que d'acheter constamment du riz" (P2, 20/06/96)

Ce sont souvent des paysans qui n'ont qu'une seule parcelle.

D'autres paysans encore ne perçoivent pas d'intérêt à la mise en culture de leur parcelle pour une production agricole, ni pour le revenu d'une vente, ni pour la consommation. Le

⁵⁷ IT est l'appellation commune des PIV installés par la société Italpanti, dont fait partie un des PIV étudiés dans ces enquêtes.

⁵⁸ Pour chaque extrait d'entretien repris dans ce chapitre, on a précisé la date et un code remplaçant le nom du paysan par souci de discrétion.

⁵⁹ commerce, taxi, artisanat, d'autres types de culture comme la tomate ou les oignons ou encore des voyages dans la famille à Dakar.

contexte de la loi foncière actuelle⁶⁰ les incite cependant à la mettre en valeur pour la conserver. Un premier argument de ce type consiste à dire "c'est la terre de mes parents, si je ne la mets pas en valeur, on va me la retirer et je ne veux pas perdre la terre de mes parents". Un corollaire de cet argument est l'explication donnée par un ancien *jom leydi* de la dégradation des périmètres par le fait que des parcelles ont été attribuées à des paysans qui n'étaient pas *jom leydi* et n'ont donc pas entretenu des aménagements qui ne leur appartenaient pas.

"Les paysans qui n'étaient pas *jom leydi* n'entretiennent pas bien leur parcelle et les canaux puisque la terre n'est pas à eux" (P3, 06/07/96)

Un autre argument toujours de ce type, mais remettant en cause le précédent, consiste à dire : "c'est vrai que c'est la terre de mes parents, mais si il n'y avait aucun espoir qu'elle rapporte, je ne chercherais pas à la garder, seulement je cherche à la conserver parce que je pense qu'un de ces jours ce sera rentable". Les espoirs d'amélioration se situent en particulier au niveau des conditions amont et aval de la filière : baisse des taxes sur les intrants, hausse du prix du paddy. Pour ces deux derniers arguments, la parcelle a peu d'importance, il lui est seulement demandé de ne rien coûter, dans les choix d'activité, elle passe pratiquement toujours au second plan.

Enfin un quatrième groupe de paysans est constitué de jeunes au chômage à qui la parcelle est confiée. Différentes modalités existent derrière ce terme "confiée", depuis l'exploitation d'une parcelle familiale dans le cas où l'attributaire, père ou mère le plus souvent dans ce cas, n'est pas en mesure de mener à bien cette mise en valeur, jusqu'au *rem peccem*, genre de métayage, en passant par le prêt. Ces jeunes attendent un hypothétique chantier dans la région les employant et sont prêts à laisser la parcelle et la campagne agricole dans cette éventualité.

"Si actuellement je trouve un autre boulot, j'appelle mon grand frère et je lui confie la parcelle" (P4, 04/08/96)

Même si la probabilité d'arrivée d'un tel chantier est faible et leur capacité à abandonner la campagne en cours le cas échéant peut-être encore plus faible, cet objectif de mise en culture conduit à un investissement en travail irrégulier dans le temps, ainsi qu'à une déconnexion des choix d'itinéraire technique et d'investissements financiers. En effet, ce n'est pas la même personne qui met en œuvre l'itinéraire technique et qui fait les choix d'investissement.

⁶⁰ Comme il a été mentionné au premier chapitre, les parcelles aménagées appartiennent à l'Etat et sont attribuées aux paysans pour être mises en valeur, ce qui veut dire que l'Etat peut retirer cette attribution et la concéder à un autre paysan, si la parcelle n'est pas exploitée.

Cet objectif propre au paysan qui met en valeur la parcelle constitue en fait un cadre pour les relations du paysan à sa parcelle, en particulier pour son itinéraire technique dont il pourra faire varier le niveau d'investissement ou encore la précision et la ponctualité avec lesquelles il est suivi : tous les paysans utilisent des engrais et des produits phytosanitaires, mais dans des quantités variables et avec une rigueur variable dans l'application du calendrier qu'ils souhaitent suivre. Il n'y a pas détermination de l'itinéraire technique par l'objectif, à chaque objectif correspondent différents itinéraires techniques dépendant notamment du type d'aménagement, de la disponibilité de certains intrants et de l'histoire de l'irrigation propre à chaque paysan. Il y a néanmoins un cadre commun à tous les itinéraires techniques observés pouvant se diviser en quatre phases successives comme indiqué dans le Tableau 4.

phase	actions conduites sur la parcelle
préparation, mise en eau	travail du sol, remplissage de la parcelle, parfois un premier traitement à spectre large suivi d'un drainage et nouveau remplissage, puis semis.
traitements, amendements	drainage, 2 ^{ème} irrigation, lame d'eau peu élevée, 1 ^{er} apport d'engrais, traitement chimique, désherbage manuel
entretien des irrigations	assurer une lame d'eau en permanence, apports d'engrais complémentaires, désherbage manuel
maturité	drainage si nécessaire et si possible, assèchement selon le type récolte manuelle ou mécanique, récolte, battage.

Tableau 4 : cadre général des itinéraires techniques

Ce cadre d'itinéraire technique type est parfois précédé d'une "pré-irrigation" pour un meilleur contrôle de l'enherbement. Les entretiens de lame d'eau se font tous de la même manière par comparaison du niveau d'eau à un niveau de référence soit pris sur la tige des plants de riz en un point particulier de la parcelle, soit en un point particulier d'une diguette, aussi bien pour ouvrir que pour fermer la buse. Les variations d'un paysan à l'autre portent sur ces niveaux en fonction des contraintes de chacun : les fréquences de passage ne peuvent en effet pas être les mêmes, en particulier pour les pluri-actifs qui sont les plus nombreux. Ainsi certains paysans quittent pendant deux semaines leur parcelle sans que personne ne s'en occupe alors que d'autres préfèrent passer un petit peu chaque jour. Les variations portent aussi sur la variété choisie, la pratique du drainage, les choix de produits phytosanitaires et la technique d'épandage de l'engrais, dans l'eau ou non.

des groupements au périmètre : différents types de règles collectives pour l'accès à l'eau

Ainsi décrites, les interactions entre paysans et parcelles ne correspondent pas toujours exactement à la réalité : les interactions entre les différents groupements et le périmètre influent sur la mise en œuvre de ces itinéraires techniques projetés en modifiant les conditions de leur réalisation. Ces interactions portent en particulier sur l'allocation de l'eau entre les parcelles dépendant d'une même maille hydraulique. Cette règle dépend de groupements spécifiques, de l'ensemble des paysans ou d'aucune organisation particulière. Elle peut prendre différentes formes et parfois varier d'une phase à une autre de la campagne de culture :

libre service : chacun ouvre sa parcelle quand il en a envie sans s'occuper des autres.

tour d'eau à durée fixe : les paysans ouvrent leur parcelle selon un tour défini au préalable dans la fréquence et dans la durée. Par exemple tous les mardis.

tour d'eau séquentiel : le tour se limite à un ordre entre les paysans. Un paysan ayant accès à l'eau quand le précédent a fini. Dans certains cas il y a alternance de l'ordre.

tour d'eau à durée limitée : variante des deux précédents, le tour est un ordre entre les paysans, une limite supérieure peu contraignante de la durée d'irrigation est fixée pour éviter des tours trop longs.

tour d'eau arrangé : c'est un tour d'eau comme ceux exposés ci-dessus, avec des échanges de tour entre paysans, ou des irrigations complémentaires quand personne d'autre n'irrigue.

Ce dernier type résulte en fait, volontairement ou non, d'une application souple d'une des règles précédentes tant qu'il n'y a pas de conflits. Les tours d'eau peuvent concerner les parcelles une par une ou par paquets de 2 à 5 parcelles. La mise en œuvre de cette règle d'allocation de l'eau se fait soit par un chef de groupement, soit par un paysan du système dédié à cette tâche au sein du groupement, soit par aucune personne en particulier, avec une intervention des responsables du groupement si nécessaire. C'est ce dernier cas qui est le plus fréquent. Outre l'allocation de l'eau entre les parcelles c'est aussi à ce niveau que se règle l'entretien de l'irrigateur sur ordre du même responsable qui organise des "alertes", "investissements humains" ou autres "travaux collectifs" : désherbage, prévention ou correction de la formation de brèches dans la diguette.

Les interactions entre le groupe des acteurs à qui est attribué un périmètre et ce périmètre portent aussi sur la gestion de la station de pompage ou du GMP. Ces interactions passent d'une part par un responsable du GIE ou de l'Union des GIE regroupant l'ensemble des paysans du système irrigué, d'autre part par des pompistes. Le premier donne les ordres aux seconds et parfois aux responsables des mailles hydrauliques en charge de l'allocation de l'eau entre les parcelles. Selon les systèmes irrigués, il peut s'agir directement du

président ou, le plus souvent, d'un responsable spécifique. C'est toujours un personnage influent du système irrigué. Les pompistes sont salariés dans les grands aménagements, ce sont des paysans ou fils de paysans sur les autres, ils mettent en œuvre les pompes selon les ordres des premiers et s'occupent de l'entretien courant. L'objectif à la base de la gestion de la station de pompage est d'abord d'éviter toute pénurie d'eau pour les paysans, même si les responsables veillent à ce qu'il n'y ait pas de gaspillage.

"Il faut que les paysans aient l'eau comme il faut. Nous on ne calcule pas la consommation avant la fin de la campagne. Au début de la campagne on avait 630 ha mis en culture, la SAED avait dit qu'il ne faudrait pas dépasser 70 000 litres. On en est déjà à 80 000 et on va encore en commander. Ils se sont trompés dans leurs calculs." (P5, 12/11/96)

Cet objectif sert de cadre pour différents niveaux de règles de pompage imbriqués les uns dans les autres, du plus global au plus fin : démarrage et arrêt de la campagne, horaires de pompage quotidiens, débit des pompes. Ces choix sont faits par le bureau du GIE ou de l'Union du GIE, prenant éventuellement en compte des conseils de la SAED. Sauf mention du contraire par les responsables, les pompistes règlent le débit des pompes dans le cas d'une station de pompage en fonction du niveau d'eau dans le bassin de dissipation immédiatement à l'aval de la station. Dans le cas du GMP, c'est l'arrêt de celui-ci qui dépend du niveau d'eau dans le canal principal et du nombre de paysans en train d'irriguer. Dans tous les cas, la priorité est donnée aux besoins en eau des parcelles.

"Avant d'arrêter le GMP à la fin de la campagne, le président et le technicien villageois font le tour du périmètre pour voir si plus personne n'a besoin d'irriguer" (P6, 09/07/96)

Ces règles de pompage correspondent à un fonctionnement sans incident. En particulier il y a parfois des pannes pouvant être dues à une rupture d'approvisionnement en gasoil, à une panne mécanique ou encore à une brèche le long du réseau principal. Les ruptures d'approvisionnement peuvent elles-mêmes être dues à une rupture des fonds disponibles, à une commande trop tardive ou encore à une impossibilité d'accès aux cuves de stockage.

"Le gasoil a souvent manqué, notamment à cause de l'enclavement de la cuvette. Quand les eaux sont hautes, on ne peut pas amener les camions." (P7, 10/07/96)

Ce cas est le plus souvent prévu, et est pris en compte en particulier dans le cas d'un tour d'eau de deux manières différentes : reprise comme si rien ne s'était passé ou bien reprise là où avait eu lieu l'arrêt. Parfois un jour est prévu entre deux tours pour récupérer les retards dus notamment à ce genre d'incidents.

"Si il y a un arrêt du GMP, on arrête le tour et on reprend là où on l'avait arrêté. Si c'est sérieux on fait une alerte. On ne veut pas d'arrêt de pompage au cours d'une campagne. S'il y a une grosse panne on trouve un autre GMP, mais c'est rare que cela arrive." (P8, 19/07/96)

Il est vrai que de telles pannes arrivent assez rarement de manière prolongée. L'entretien courant est assuré par les pompistes eux-mêmes. Pour les interventions plus importantes, toujours ponctuelles, il est fait appel à un mécanicien extérieur. Dans ce cas les réseaux de relation des membres du bureau hors du système irrigué sont importants pour l'accès aux pièces, aux personnes compétentes, voire au prêt d'un GMP de rechange ou à des financements. Quant aux pannes dues à une dégradation d'un canal du réseau principal, elles donnent lieu selon l'ampleur de la dégradation à la convocation des paysans pour un travail collectif ou à l'intervention de prestataires rémunérés, ou encore de manière intermédiaire à l'appel à des paysans volontaires pour ce travail et rémunérés. Il en est de même des travaux d'entretien préventif sur le réseau principal.

Ces règles ne sont par ailleurs pas toujours suivies : non participation à des travaux d'entretien, irrigation sans autorisation, ce qui donne lieu parfois à des amendes.

"Si quelqu'un ne suit pas son irrigation : 1500 F d'amende. S'il ne respecte pas mes ordres, pareil. Même pour les travaux sur le canal si tu es absent, tu as une amende. Et tu ne peux pas irriguer avant qu'on ne t'y autorise. Idem si tu as commis un vol d'eau ou si tu as vu un canal se casser et tu n'as rien fait." (P8, 19/07/96)

Sur les grands aménagements, la police de l'eau a donné lieu à des investissements pour surveiller les canaux et les paysans.

"Quand nous sommes arrivés, il y a eu un autre changement. On a acheté 3 mobylettes pour 3 paysans pour veiller à la police de l'eau ainsi qu'une voiture pour un vieux qui ne pouvait pas se déplacer." (P5, 09/07/96)

Mais ces investissements n'ont pas toujours été suivis d'effet, les moyens de fonctionnement et la reconnaissance de la légitimité des paysans ayant cette fonction en charge n'ayant pas accompagné ces premiers investissements.

interactions entre paysans et groupes : des règlements intérieurs vivants.

Ceci amène à compléter la description des systèmes irrigués observés avec les interactions entre les différents acteurs qu'ils soient individuels ou qu'ils représentent des groupes. Le suivi des règles collectives et les sanctions prévues en cas de non respect sont déjà une forme de ces interactions. Nous avons aussi déjà vu comment les réseaux sociaux des responsables paysans pour l'accès à des ressources pour la collectivité sont mis en mouvement.

Ces interactions entre les différents acteurs des systèmes irrigués passent en partie par des règles collectives dont on a déjà vu quelques exemples à propos de l'accès à l'eau et de son allocation entre les parcelles. L'ensemble des règles collectives constitue un règlement intérieur toujours mis en avant dans les discussions, souvent écrit, parfois suivi, toujours adapté et en fait vivant.

"Quand les Italiens étaient là il y avait un règlement intérieur qu'ils respectaient à la lettre. Quand ils sont partis on a fait le nôtre." (P6, 09/07/96)

En plus des règles déjà mentionnées, les règles collectives mises en œuvre dans les systèmes irrigués observés peuvent concerner le choix de la variété de riz cultivé, le mode de semis⁶¹, le montant de la redevance hydraulique, l'autorisation de cultiver une parcelle donnée pour faire une campagne, la distribution de crédits et/ou d'intrants. Ces règles collectives peuvent prendre plusieurs formes :

obligation

expression de préférences

incitations par exemple via la fourniture à crédit d'une semence d'une variété particulière
seulement

Le montant de la redevance hydraulique est toujours un forfait dépendant de la superficie cultivée une campagne donnée : un paysan ne cultivant pas sa parcelle une campagne donnée ne paye rien. Le montant de ce forfait peut être déterminé *a priori* en fonction de ce que les paysans estiment être capables de payer ou bien *a posteriori* en fonction des coûts calculés de la campagne. Ainsi sur l'un des systèmes étudiés, le montant de la redevance a été porté en 1994, suite à la dévaluation, à 55000 FCFA / ha cultivé suite à une longue négociation entre des représentants de la SAED estimant le montant nécessaire dans un objectif d'équilibre budgétaire et les représentants des différents groupements de paysans estimant ce qu'ils étaient capables de payer. Depuis il n'a pas été modifié. Dans un autre des systèmes étudiés, le montant de ce que doit payer chacun est recalculé en fin de campagne à partir des dépenses collectives effectivement faites, de la superficie cultivée... et des arriérés de paiement des campagnes précédentes. La question de ce que paye celui qui démarre la campagne mais ne la finit pas n'est pas toujours traitée de la même manière. Elle est plus l'objet d'une négociation que de l'application d'une règle, quelle que soit la raison pour laquelle la campagne est abandonnée : enherbement excessif, défaut dans l'arrivée d'eau ou encore dégât dû à des oiseaux ou à des criquets. Il se pose ensuite la question de ce qui se passe pour ceux qui ne paient pas complètement cette redevance : entre la rigueur annoncée de la règle et la pratique observée et reconnue, la marge est

⁶¹ semis direct ou repiquage

importante ! Cette question se pose de la même manière pour le remboursement des crédits de campagne obtenus *via* le GIE sous forme d'intrants ou de prestations de services. Les deux sommes sont parfois assemblées quand le même groupement gère la station de pompage et s'occupe de fournir les intrants à crédit. Le paiement de la redevance peut être considéré comme le remboursement d'un accès à l'eau d'irrigation à crédit. Toutes les règles annoncent que seuls les paysans à jour de leurs dettes peuvent avoir de nouveaux crédits.

"Après on a laissé s'accumuler les dettes. Ce qui n'est pas permis si on appliquait strictement le règlement intérieur. Mais nous avons privilégié nos liens d'affinités et nous n'avons pas appliqué ce règlement" (P9, 13/06/96)

Mais la pratique n'y correspond pas toujours pour respecter des liens sociaux antérieurs ou dans un souci d'application souple de cette règle.

"Si tu fais des avances importantes, on sait que tu fais des efforts et on te laisse faire la campagne" (P10, 20/06/96)

L'histoire des systèmes irrigués, et en particulier l'époque de la gestion par la SAED connu de tous les paysans de la zone, a aussi donné des habitudes aux paysans pour les remboursements des crédits.

"La SAED est là depuis 1975. La SAED prêtait et épongeait si les paysans ne pouvaient pas payer. Maintenant ceux qui n'ont pas payé n'ont plus les moyens" (P11, 17/10/96)

Or quand il y a eu le désengagement de la SAED les structures mises en place ont souvent été assimilées à la SAED. Si bien que le paiement de la redevance et le remboursement des crédits au GIE est loin d'être prioritaire pour les paysans qui ne croient pas que les règles strictes vont être appliquées et cherchent donc à se placer dans les conditions où elles n'y seraient pas.

"En fait la campagne de riz a été plutôt bonne mais les paysans ont d'abord remboursé leurs dettes aux autres crédateurs et ont gardé un peu d'argent avec eux pour acheter des intrants au cas où la campagne démarrerait" (P12, 11/06/96)

Mais cela finit par poser problème quand il n'y a plus les moyens d'acheter du gasoil pour démarrer la campagne ou quand la CNCA ferme le robinet du crédit : à ce moment là, l'application de la règle devient extrêmement stricte, ce qui est arrivé sur le périmètre de Nianga en 1996.

"Les paysans à qui il manque même 1000 F n'ont pas le droit de cultiver" (P12, 16/07/96)

Ceci peut alors mener au blocage complet de certains systèmes quand y est associée une règle exigeant la mise en culture d'une proportion minimale du périmètre.

La mise en œuvre de ces règles collectives ne sont qu'un aspect des relations entre les groupements et les paysans. Ces interactions concernent aussi la diffusion de l'information

entre les différents niveaux hiérarchiques. Celle-ci est généralement loin d'être parfaite et passe le plus souvent par des intermédiaires qui peuvent transmettre cette information de manière sélective en fonction de l'information ou du destinataire.

"Je n'ai pas affaire directement aux paysans. Ils parlent avec ceux qui s'occupent de la surveillance de l'eau. Ceux-là amènent les requêtes des paysans" (P5, 09/07/96)

Ainsi des paysans ne savent pas à l'avance quand une campagne va commencer, s'ils sont sûrs d'avoir de l'eau jusqu'à la fin de la campagne quelle que soit la durée du cycle de la variété qu'ils choisissent, ou encore le degré de flexibilité accordé dans le paiement de la redevance.

interactions entre paysans sans passer par les groupements

A ces interactions entre paysans et groupes de paysans, ou représentants de ces groupes, s'ajoutent des interactions directes entre les paysans des systèmes irrigués, en ajustement des règles collectives ou non. Ces interactions individuelles portent sur l'accès à l'eau, sur l'accès au crédit et aux intrants, sur la mise en œuvre de l'itinéraire technique, sur la diffusion d'information⁶² et sur la prise en compte d'externalités potentielles. En fait ces interactions interindividuelles peuvent être rangées en deux grandes catégories : gestion des externalités et échanges de services. Même si les paysans se disent parfois indépendants⁶³ et ne se déplacent sur le périmètre que pour aller sur leur propre parcelle, l'existence du système irrigué induit des externalités, sans lesquelles il ne pourrait ni exister ni être mis en valeur.

"Un seul paysan n'aurait pas pu aménager la terre des ancêtres. [...]. Comme j'étais le seul à faire campagne, ça a posé problème à moi et aux autres paysans, car le GMP devait marcher 30' pour moi seul et les bêtes venaient attaquer ma parcelle. Depuis lors on s'est dit qu'un seul paysan ne peut pas faire campagne sans les autres" (P13, 31/07/95)

Ces externalités nécessitent une coordination, d'autant plus qu'elles ne sont pas toutes positives : épandage d'engrais, mise en eau ou débordements peuvent avoir des conséquences d'une parcelle sur une autre. Elles engendrent alors des interactions entre les paysans pour éviter que de tels désagréments arrivent.

⁶² relatives à l'état de la parcelle d'un paysan ami ou à des nouvelles concernant l'ensemble du système irrigué.

⁶³ "Chacun balaye devant sa parcelle" (P12, 01/08/95)

"Si tu mets l'eau avant que ton voisin ait passé l'offset⁶⁴, ça pose des problèmes" (P12, 01/08/95)

A ces coordinations s'ajoutent des échanges de services venant en complément des travaux collectifs organisés par les groupements. Ces échanges de service portent en particulier sur l'accès à l'eau et au crédit. En ce qui concerne les échanges de services portant sur l'eau, il s'agit en particulier d'échanges de tours d'eau ou d'accords pour laisser un autre paysan irriguer en même temps.

"Pour les tours d'eau il n'y a pas de problème, facilement le gars qui a le tour t'arrange" (P1, 19/07/95)

Ces accords peuvent avoir lieu de façon explicite comme les exemples qui précèdent ou de manière plus implicite.

"CAJ et MT prennent l'eau plus souvent parce que les autres n'en ont pas besoin" (P11, 16/11/96)

Mais la réalité n'est pas toujours aussi idyllique : des fermetures de parcelles de paysans absents peuvent être observées et des récits concernant le passé ou d'autres groupements relatent des relations plus tendues.

"Depuis que l'on a créé Madiw 3, aucun paysan ne s'est battu avec un autre pour avoir de l'eau. Alors que ça arrive dans d'autres groupements" (P12, 11/08/95)

Quant aux échanges concernant des prêts monétaires ou d'intrants, ils ne sont pas spécifiques aux relations internes au système irrigué même si les deux partenaires de l'échange en font partie. Ils se situent dans des flux d'échanges recouvrant partiellement le système et le dépassant et font appel à d'autres réseaux sociaux et à d'autres pratiques d'échanges antérieurs à l'arrivée de l'irrigation dans la région. Nous y reviendrons plus loin. Enfin ces interactions individuelles peuvent aussi prendre la forme d'échanges selon les spécialités et talents de chacun.

"Pour les parcelles, il y a de l'entraide, par exemple je fais une opération sur ta parcelle et tu la fais sur la mienne. [...]. Ca se voit essentiellement pour les opérations de semis, traitement, récolte. La réciprocité n'est pas obligatoire aussitôt. Mais ici par orgueil, si on te rend un service, tu veux rendre la monnaie et rendre ce service même sans prévenir. C'est une question d'honneur. Ces échanges de services ne sont pas limités aux activités agricoles. Je fais un peu de mécanique, je peux dépanner quelqu'un qui ensuite ira travailler sur ma parcelle." (P12, 01/08/95).

Dans ce cas, les deux protagonistes de l'échange sont dans le système irrigué, mais un des deux termes de l'échange peut ne pas le concerner. Là encore les interactions internes au système irrigué sont prises dans des échanges plus larges qui le dépassent. Il convient

⁶⁴ outil de travail mécanique superficiel du sol nécessitant le passage d'un tracteur dans la parcelle, d'où les problèmes posés en cas d'humidification préalable de la parcelle.

maintenant de s'intéresser de plus près à ces réseaux sociaux extérieurs déjà plusieurs fois mentionnés et à leur projection sur les systèmes irrigués observés.

implication de réseaux sociaux extérieurs au système irrigué

Ces réseaux sociaux extérieurs sont de différentes natures. Tous préexistaient à l'arrivée de l'irrigation dans la région. En premier lieu, chaque paysan se situe dans un réseau familial. L'entité correspondant à ce "réseau familial" est variable selon les paysans, selon la nature de ce qui est partagé ainsi que dans le temps. Il peut s'agir du *foyre*, unité de consommation, sur la base desquels a été faite l'attribution des parcelles irriguées (Guilmoto et Diouf, 1995) ou du *galle*, unité de résidence, ou encore d'une partie du *leñol*. Ainsi on pourra faire appel à un parent de Dakar pour obtenir une aide financière, partager les sacs d'engrais avec un frère qui y a un accès facile par son groupement et envoyé un fils travailler sur la parcelle. Ce réseau familial constitue un lieu de partage de ressources en travail et en intrants, de la production de riz et des choix concernant la parcelle irriguée.

"Sur la parcelle, c'est encore moi qui vais faire la campagne pour la famille. Dans la famille, tout le monde est pour faire cette campagne" (P1, 12/06/96)

Les choix sont en effet familiaux et non individuels, ils résultent ainsi de processus de décision eux-mêmes complexes, car produit de discussions entre les différents membres de la famille, de poids et d'intérêts différents dans la discussion et la mise en œuvre du choix retenu. Il y a ensuite délégation à un membre de la famille pour mener à bien la conduite de la parcelle. Ce qui ne veut pas dire qu'il s'en occupe tout seul mais que c'est lui qui en est responsable et fait appel aux autres membres de sa famille le cas échéant pour travailler sur la parcelle. Ce n'est pas nécessairement la même personne tous les ans. Ce n'est pas non plus la même personne qui participe aux réunions des groupements liés au périmètre. L'accès à ce réseau permet de résoudre un certain nombre de problèmes notamment financiers.

"Dans chaque famille, il y a quelqu'un un peu plus riche qui prête le prix de quelques sacs d'engrais et on discute le remboursement au cours ou à la fin de la campagne." (P14, 09/08/96)

Il est important de retenir de cette intégration de chaque paysan dans un réseau familial que l'attributaire de la parcelle n'est pas en fait un individu mais plutôt un groupe d'individus, où les différentes tâches et prérogatives sont distribuées, même si parfois cette distribution est fortement centrée sur l'un des membres du groupe pour une tâche ou une prérogative donnée. Cette distribution des tâches vient de la multiplicité des parcelles cultivées et plus généralement de la pluri-activité des membres d'un tel réseau familial. Ainsi les intrants obtenus pour une parcelle et une campagne données peuvent être utilisés sur différentes

parcelles ou encore les revenus d'une campagne peuvent être utilisés pour investir hors du système irrigué tel HBJ qui prélève 200000 FCFA sur sa récolte pour finir de payer une pirogue.

"Au début les paysans passaient les journées là-bas, c'était à qui aurait le meilleur rendement. [...].

Quand on te donne l'engrais pour le riz, tu en mets la moitié pour les oignons." (P12, 11/08/95)

"Pour mettre l'engrais, j'ai partagé avec la parcelle de Nianga" (P15, 05/09/95)

Chacun de ces réseaux familiaux est pris dans différentes associations locales au travers de certains de ses membres. Les *fedde* regroupent tous les individus de même âge et de même sexe d'un village qui constituent un pôle de solidarité et deviennent, grâce à leur fonction de lieu de rencontres et aux relations privilégiées instituées entre les individus (Tarrière-Diop, 1995), un lieu important de résolution de problèmes et de conflits pouvant survenir au sein du système irrigué.

D'autres dynamiques collectives impliquant des membres des systèmes irrigués ont plutôt un effet centrifuge sur ceux-ci, il s'agit notamment des tendances politiques en période d'élection ou d'interventions d'ONG se disputant le monopole de l'aide aux paysans afin de capter le plus de financements possibles. Il s'ensuit des disputes au sein des villages et souvent au sein de la population d'un même groupement voire d'une même maille. Ainsi un paysan a prétendu ne pas connaître l'attributaire d'une parcelle presque voisine de la sienne alors qu'ils habitent le même village. Ces forces centrifuges induisent des difficultés quand il s'agit de coopérer pour des travaux collectifs d'entretien d'un canal ou pour d'éventuels échanges de services.

"Je peux aussi prêter aux autres. Mais pas à quelqu'un que je ne connais pas. Par contre si tu le connais, même si tu penses qu'il ne va pas rembourser, tu vas lui prêter" (P11, 17/10/96)

influence des statuts sociaux

La hiérarchisation de la société en castes déjà mentionnée est toujours bien vivante. Ainsi lors de l'assemblée générale d'une AVD⁶⁵, un membre d'une grande famille du village a dit parlant d'un autre membre de l'AVD de statut social inférieur :

"Mais quand je vois des gens comme XX, avec qui je ne suis ni de la même classe ni du même niveau de maturité...".

Cette hiérarchisation codifie les relations sociales et a ainsi une influence au sein des systèmes irrigués, en particulier pour ce qui concerne les échanges de service sous forme de prêts ou de travail.

⁶⁵ Association Villageoise de Développement

"Le cas de dettes suite à la différence de statut social (*macudo* et noble) existe encore aussi bien hors que sur le périmètre mais a tendance à disparaître. La poursuite de ces coutumes est essentiellement due à des *macuBe* conservateurs qui vont venir travailler sur ma parcelle." (P12, 15/10/96)

Ainsi les *tooroBe* se retrouvent à devoir faire face à des obligations dues à leur rang que l'apparition de l'irrigation ne leur laisse plus vraiment les moyens de remplir... sauf à utiliser des moyens propres aux nouvelles fonctions induites par les systèmes irrigués.

"Des fois tu n'as pas le moral un griot vient et te chante tes louanges et te rappelle ta généalogie. Quand il part tu lui laisses de l'argent. D'autres fois un cordonnier t'amène des belles chaussures qu'il a mis du temps à faire. Alors tu lui donnes un boubou d'une valeur supérieure. [...]. Avant c'était bon d'être *toorodo* maintenant c'est devenu difficile, les rôles se sont renversés, il est préférable d'être griot que *toorodo*." (P12, 03/12/96)

Il ne s'agit plus là d'échanges à proprement parler mais de l'application de rôles sociaux codifiés impliquant pour d'autres l'application d'autres rôles.

Outre cette codification des rôles sociaux locaux, le statut social permet d'accéder aux postes de commande des groupements assurant la gestion des systèmes irrigués (Tarrière-Diop, 1995) et à des ressources pas nécessairement financières mais souvent sous la forme d'appuis permettant d'obtenir des subventions ou du matériel par exemple pour un GMP, ce qui signifie en interne au système un accroissement de poids politique. L'important est de pouvoir accéder à des réseaux sociaux, que l'on réactive en cas de besoin, que cela soit pour le groupe ou pour soi-même.

"Ce sont les Italiens qui s'apprêtaient à partir qui nous ont cédé les GMP à bas prix ainsi qu'à l'IT1." (P6, 09/07/96)

"Quand j'ai besoin d'emprunter, je vais d'abord voir ceux à qui j'ai déjà prêté, même s'ils ont déjà remboursé." (P11, 17/10/96)

En fait tous ces réseaux sociaux préexistaient à l'arrivée de l'irrigation. Ils s'y sont adaptés et ont constitué un cadre aux coordinations que celle-ci engendre. Aucune nouvelle forme de coordination n'est en fait apparue. Des besoins de coordination nouveaux se font pourtant sentir : externalités entre systèmes irrigués, relations avec les autres acteurs de la filière. De la même manière qu'au sein d'un système irrigué, il existe des externalités à plus petite échelle : si un seul périmètre est mis en culture à une campagne donnée il aura plus d'attaques d'oiseaux et verra ainsi sa production diminuée. Les industriels du riz sont peu nombreux et ont actuellement tendance à imposer leurs prix aux paysans.

dynamique des interactions.

Cette description des interactions pose tous les éléments pour leur dynamique. Ces liens évoluent sur les pas de temps supérieurs à la campagne et constituent la trame des processus de décision aux pas de temps plus courts. A chaque interaction est associée deux informations : l'existence d'un lien entre deux acteurs et une ou plusieurs règles qui régissent cette interaction. Les externalités dues en particulier au partage du réseau mais aussi à l'accès collectif au crédit participent également au moteur des processus de décision. Ainsi l'observation que les autres paysans ne participent pas à l'entretien du système irrigué peut inciter des paysans à ne plus participer eux-mêmes. De même si un groupement n'a plus accès au crédit par la CNCA les membres de ce groupement sont alors obligés de se retourner vers d'autres solutions.

Aux pas de temps plus longs, les deux informations associées à ces liens évoluent, qu'ils concernent des comportements individuels ou des règles collectives. Pour cela différents critères d'évaluation des résultats d'une campagne sont activés aussi bien par les responsables de groupements que par les paysans. Pour certains l'important est le nombre de sacs pouvant être tirés de la parcelle, quel que soit le coût que cela implique.

"Cette campagne ça a été bon, parce que j'ai eu quelque chose sur ma parcelle. C'est pour ça que je dis que c'est bon." (P1, 14/12/96)

Le comportement correspondant n'est pas nécessairement une maximisation de la production, mais il peut aussi s'agir de niveaux minimums de satisfaction ou de progrès d'une campagne sur l'autre.

"C'est une bonne campagne. J'ai eu plus que sur les campagnes précédentes. [...]. J'ai été le premier à récolter. J'ai pu régler les problèmes de mes parents qui cherchaient de quoi consommer, ou qui ne pouvaient pas payer des crédits." (P16, 14/12/96)

Cet exemple montre un deuxième critère d'évaluation : la date de récolte afin de pouvoir limiter la période de soudure pour soi et pour sa famille. Le revenu net est aussi un élément pris en compte par certains paysans.

"Ce qui m'a poussé à changer, c'est que j'ai fait une campagne, dont il n'est rien resté. Je n'avais travaillé que pour le GIE. Voilà pourquoi j'ai changé, si j'ai un plus je continue, sinon j'arrête." (P17, 24/04/97)

Mais ce n'est pas tout, d'autres paysans ou d'autres responsables de groupement s'intéressent plus à la date de démarrage ou au respect d'autres éléments de l'itinéraire technique ou encore à la faiblesse du nombre de difficultés rencontrées durant la campagne.

Ces évaluations donnent parfois lieu à des changements des règles et comportements associés aux diverses interactions, même si certains ne veulent rien changer *a priori* de

leurs pratiques. Ces changements peuvent se faire de diverses manières : idées personnelles, expériences, imitation d'autres paysans

"D'habitude, je faisais la germination, mais je pense que maintenant je vais payer des gens pour repiquer, car avec le repiquage, il y a beaucoup de tiges et un meilleur rendement que le semis à la volée. J'avais repiqué une seule plante sur ma parcelle, j'ai surveillé, ça a fait 63 graines, mon neveu qui l'a fait en Mauritanie me l'a confirmé. Cette campagne, les gens qui ont repiqué ont eu un meilleur rendement." (P18, 14/12/96)

Le processus d'imitation d'autres paysans est le plus fréquent et utilisé par des programmes de développement visant à introduire de nouvelles techniques. Ainsi un programme en cours conjoint à la FAO et à une fédération d'AVD de la région, l'UJAK⁶⁶, a consisté dans le choix de paysans au sein de plusieurs GIE pour introduire une nouvelle variété de riz de cycle plus court. La greffe semble prendre puisque plusieurs paysans et même certains GIE dans leur ensemble avaient dans leurs intentions de prendre cette variété à la campagne suivante.

"Les prochaines campagnes, peut-être que je vais changer de variétés et de dose d'engrais. Je vais mettre une autre semence, la SAHEL, car j'ai vu qu'il y a beaucoup de rendement. Je veux aussi augmenter l'engrais. Je mettais 300 kg, je veux augmenter de 1 ou 2 sacs encore. Car j'ai vu que plus tu augmentes l'engrais, meilleur est le rendement. C'est plus cher mais le rendement est encore mieux." (P1, 14/12/96)

Il pose cependant la question du champ d'observation des paysans, au sein de ce champ des paysans susceptibles d'être imités et parmi ces derniers du choix d'un paysan à imiter. L'exemple ci-dessus montre que ces processus d'imitation sont loin de se cantonner aux frontières d'un système irrigué et que les réseaux sociaux extérieurs au système décrit plus haut sont, là encore, actifs.

De tels changements peuvent aussi avoir lieu sur contraintes rendant impossible la poursuite des pratiques habituelles. Ces contraintes peuvent être internes au système ou non.

"Il y aura des changements à partir de cette année pour prêter aux paysans : on ne sera plus tolérant car cela paralyse les choses." (P19, 26/04/97)

Il s'agit sur cet exemple de l'évaluation faite par un groupe : la dynamique des interactions concerne aussi bien les groupements que les individus.

Le non paiement fréquent de la redevance hydraulique est un autre exemple de changement uniquement en condition de blocage. Les paysans passent à un paiement partiel de la redevance hydraulique suite à des rendements médiocres, ce qui devient une règle tant que cela n'empêche pas d'avoir accès à l'eau.

⁶⁶ Union des Jeunes Agriculteurs de Koyli Wirnde

Dans tous les cas ils ont lieu dans un cadre d'éléments fondamentaux à respecter tels que évitement des conflits et obligation de solidarité sociale.

"La parcelle m'est attribuée, mais le travail est collectif et c'est le président qui décide. Même si tous les paysans veulent une chose, si le président ne veut pas, ça ne se fait pas, car c'est le doyen et le chef du village." (P13, 25/04/97)

L'éventail des nouvelles règles possibles est ainsi limité aux règles acceptables par le chef du groupement ou aux règles n'impliquant que l'acteur qui les choisit. Quant à la règle de solidarité sociale, elle impose un contexte qui fait que dans le cas de l'exemple ci-dessous donné par un président de GIE, la règle officielle d'obligation de remboursement ne peut pas être mise en œuvre par ce dernier. Il préfère faire partager à tout le GIE le coût des dettes de son parent que de devoir assumer tout seul le riz nécessaire à la famille de celui-ci.

"Par exemple, le papa de mon épouse ne peut pas payer, je paye pour lui, sinon il va être obligé de manger sur ma récolte." (P19, 26/04/97)

La dynamique des interactions selon les réseaux extérieurs qui traversent les systèmes irrigués a un pas de temps long devant la durée des observations. Cette dynamique se fait par étapes. Dans un premier temps, un changement du contexte qui peut être brusque a lieu et entraîne ensuite des conséquences sur le système irrigué pouvant apparaître lentement. Ainsi toutes les personnes interrogées n'ont pas encore complètement réagi à la dévaluation du Franc CFA début 1994.

"En ce qui concerne la dévaluation, pour moi, je n'en ai pas encore senti les effets. A la première campagne, les Italiens avaient fourni tout. Les paysans donnent entre 130 000 et 150 000. Jusqu'à présent on n'a pas dépassé ça. Si tu dépases cette somme c'est que tu as augmenté tes frais." (P9, 23/04/97)

De plus les effets de l'évolution du contexte sur l'activité riziculture irriguée est difficile à appréhender car cette pratique est bien souvent considérée comme un pis aller, quel que soit l'objectif de mise en culture du paysan.

"Les gens se replient sur le riz s'il n'y a pas de Waalo. Comme dit un proverbe haalpulaar, «à défaut de téter sa mère, on tête sa grand mère». Quand c'était le Waalo, il y avait plus de repos, moins de frais, on était mieux portant et moins fatigués." (P13, 25/04/97)

Ces interactions peuvent donc être considérées comme fixes dans une première approximation au pas de temps de quelques campagnes.

Tous ces éléments de la dynamique des interactions et des règles décrivent en fait une perception du moteur des processus de décision en œuvre dans les systèmes irrigués. Mais la complexité des réseaux activés fait qu'il est difficile de suivre les chemins de ces

processus. La modélisation de ces interactions pour fournir un outil permettant de simuler ces processus est la voie d'exploration que nous allons suivre dans la suite.

3.2 La modélisation

La démarche proposée à la fin du deuxième chapitre repose sur trois éléments : observations sur le terrain, modélisation et simulation qui s'enchaînent dans un processus que nous avons appelé modélisation d'accompagnement. Après avoir présenté les connaissances acquises sur le terrain au cours des différentes phases d'observation et d'enquêtes, nous présentons maintenant le modèle qui en résulte et sa construction. Comme pour les connaissances de terrain, il faut voir dans ce modèle un produit issu de plusieurs étapes de modélisation entrecoupées de simulations et d'observations sur le terrain.

3.2.1 Hypothèses de construction du modèle

Cette description de toutes les interactions observées dans des systèmes irrigués de la moyenne vallée du Sénégal, en tant qu'objet artificiel représentant des structures et des processus sociaux, constitue déjà un modèle (Hanneman et Patrick, 1997). Elle est vue à travers le prisme d'un cadre d'analyse particulier et est le résultat d'enquêtes conduites à partir d'hypothèses de fonctionnement du système. Apportant des informations sur la structure et sur le moteur de la dynamique, faisant le lien entre des données de terrain et un cadre théorique, ce modèle pourrait être utilisé en simulation (Hanneman, 1995)... s'il ne constituait pas un modèle trop complexe étant donné la multiplicité des choix possibles et des niveaux d'organisation intervenant.

Or la question de la viabilité demande des simulations de la dynamique de tels systèmes irrigués. Il faut donc passer à la deuxième étape de la méthode proposée au chapitre 2, c'est-à-dire la proposition d'un modèle pouvant être l'objet de simulations d'évolutions de systèmes irrigués. Ceci nécessite de faire des hypothèses de simplification qu'il s'agit maintenant d'explicitier.

Restriction du système irrigué à un lieu de maîtrise et de répartition de l'eau et du crédit.

La problématique posée au §1.3.1 concerne les liens entre modes de coordination entre les paysans et viabilité des systèmes irrigués. Or, la description précédente de quelques systèmes irrigués montre que ces processus de coordination peuvent apparaître lors de la répartition de l'eau, des chantiers de travail du sol et de récolte, de l'achat des intrants, des

travaux d'entretien, du pompage de l'eau mais aussi pour des questions ne concernant pas uniquement le système irrigué. L'eau étant une ressource centrale au sein du système irrigué et étant l'objet de nombreuses externalités entre les différents acteurs, nous avons commencé par représenter sa dynamique : allocation de l'eau entre les parcelles, écoulement dans les canaux et pompage. Puis, pour prendre en compte les interactions *via* les différents réseaux sociaux suite aux résultats des simulations sur la première version du modèle, nous avons ajouté la représentation des processus relatifs à l'accès au crédit ou à son remboursement ou à des prêts ou dons d'intrants. ***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.***

hypothèses sur la représentation du temps.

Ce premier choix limite le champ des hypothèses possibles pour réduire les autres composantes observées de la complexité du système irrigué. En ce qui concerne le temps, nous faisons l'hypothèse qu'un acteur donné ne s'occupe que de la recherche d'une seule ressource à la fois : le crédit puis l'eau.

Cette hypothèse donne une première échelle de temps, locale à chaque acteur, c'est le temps de la recherche d'une ressource, que nous appellerons phase. La succession des deux phases constitue un autre pas de temps : la campagne. Celui-ci est propre au système. Plus fin que la phase, il faut aussi choisir un autre pas de temps qui sera celui de la dynamique du système : pas de temps sur lequel sont simulés les choix d'action des paysans et groupements aussi bien que l'évolution des canaux et parcelles. Or l'étude de terrain montre que bien souvent les paysans ont au plus un seul type d'activité relative au système irrigué par jour. Nous faisons donc l'hypothèse d'un pas de temps de base quotidien : à chaque jour son choix unique. Il s'agit du pas de temps le plus fin. Il a une durée constante sur une horloge extérieure au système. Tous les autres pas de temps peuvent être mesurés en un nombre entier de celui-ci mais leur durée est variable, leur fin étant liée à l'occurrence d'un événement particulier. Enfin la deuxième partie de la problématique de la thèse concerne la viabilité des systèmes irrigués. Or celle-ci ne peut s'évaluer sur une seule campagne. Il faut donc ajouter une quatrième échelle de temps : la durée de vie du système irrigué dans certaines limites que nous verrons plus loin. Cette quatrième échelle de temps constitue en fait une suite de campagnes qu'il faut enchaîner, ce qui correspond à une phase particulière où l'objectif n'est plus l'accès à une ressource mais le bilan de la campagne. Ces différentes hypothèses sur le choix des échelles de temps sont résumées dans le tableau ci-dessous.

nature du temps	pas de temps	temps propre à...
temps de l'action	jour	horloge exogène
temps de l'objectif	phase	chaque acteur
temps du résultat	campagne	système irrigué
temps de la viabilité	ensemble de campagnes	système irrigué

Tableau 5 : les différents pas de temps du modèle

hypothèses sur la représentation des niveaux d'organisation

La structuration en niveaux d'organisation au sein du modèle est aussi guidée par ce choix de se concentrer sur l'accès au crédit et l'accès à l'eau. D'après le terrain trois types de groupements existent pour l'accès à ces deux ressources :

des groupements d'accès au crédit

des groupements de répartition de l'eau au sein d'une maille

des Unions de groupements ayant en charge la gestion de la station de pompage et du réseau principal.

Selon les cas observés, il ne s'agit pas toujours de trois groupements distincts, ils peuvent parfois être regroupés au sein d'une ou de deux entités distinctes, certains paysans peuvent faire partie de plusieurs groupements de même objectif. Pour la modélisation, nous ferons néanmoins l'hypothèse que ce sont les seuls groupements, qu'ils sont *a priori* distincts et que chacun constitue une partition de la population du système irrigué : à chaque groupement sa raison sociale et à chaque paysan son groupement d'accès au crédit, son groupement d'attribution de l'eau et son groupement de gestion du pompage.

Il s'agit là de la structuration en niveaux d'organisation induite par le système irrigué. Nous avons vu que de nombreuses partitions différentes et indépendantes, extérieures à celui-ci existent et traversent sa population. Ces partitions ou réseaux sociaux sont importants en tant que lieu d'échange d'informations, de services ou de biens, et de résolution de problèmes. Cette structuration sociale est complexe et tous les réseaux n'agissent pas dans le même sens, certains peuvent se compenser l'un l'autre, d'autres amplifier mutuellement leurs effets. Nous ferons ici l'hypothèse qu'il existe une partition en réseaux d'affinité sociale, sans en préciser la source, au sein desquels les échanges se font préférentiellement. Ces réseaux sont par défaut indépendants de la structure du système irrigué, cependant l'utilisateur du modèle peut choisir de les corrélérer aux groupes d'accès au crédit et à l'eau. La partition en catégories sociales est conservée à part car les études de terrain ont montré qu'elle joue un rôle important dans la circulation de l'argent.

hypothèses sur les échanges

Les relations avec l'environnement du système dans le modèle ne concernent pas seulement l'existence de réseaux sociaux. Etant donné les hypothèses faites sur les ressources recherchées au sein du système, on fera l'hypothèse que les flux d'entrée et de sorties de biens du système ne concernent aussi que l'eau et l'argent (ou le riz). Ces échanges sont résumés dans la Figure 16.

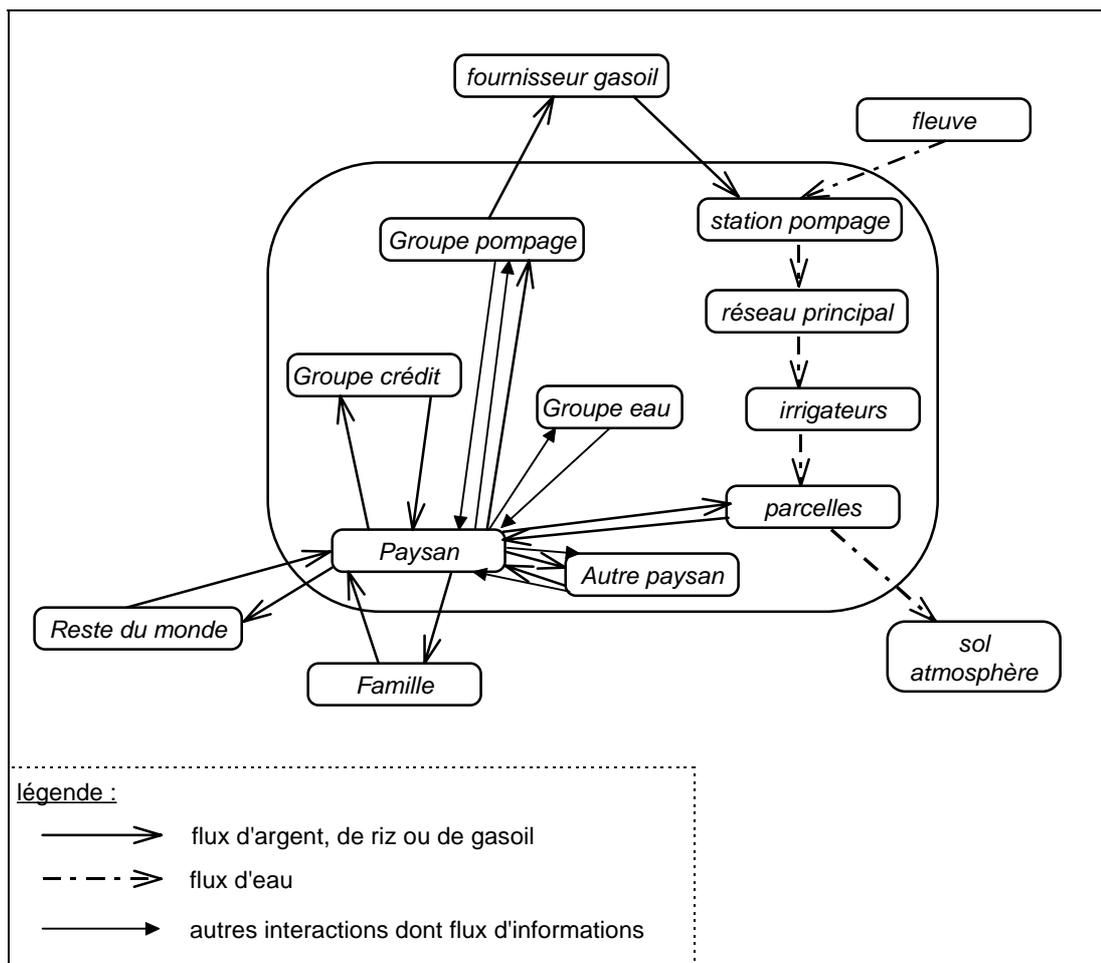


Figure 16 : carte des flux représentés dans le modèle

Cette figure est à comparer à la figure 15 du § 3.1 : elle représente ce qui a été conservé dans le modèle des différents éléments et des différentes interactions observées dans un système irrigué.

conséquences de ces hypothèses

Avant de décrire le modèle construit à partir de ces hypothèses constitutives, il convient d'aller un peu plus loin dans l'exploration des conséquences de celles-ci, en particulier des

conséquences implicites induites. Le choix de la concentration du modèle sur les modes de coordination autour de l'accès à l'eau et au crédit, et même plus précisément au crédit de campagne, implique d'une part la non représentation des questions relatives à l'allocation de la ressource en travail ainsi que de la dynamique du système aux pas de temps plus longs que la campagne. Ceci exclut notamment les questions d'entretien de l'aménagement et des infrastructures qui du coup sont considérés dans le modèle comme ne se dégradant pas. En effet les processus en œuvre sont perceptibles sur des pas de temps de quelques campagnes, processus d'évolution des canaux ou approvisionnement de comptes bancaires bloqués spécifiques, et sont souvent compensés par des travaux collectifs des paysans sur les canaux. Il s'agit là d'une hypothèse assez forte pouvant être levée dans des étapes de modélisation ultérieure si des questions le nécessitant apparaissent en ajoutant la représentation de règles correspondantes. Ceci signifie que les dernières campagnes d'un enchaînement assez long sont peu significatives pour traiter d'une question relative à la viabilité des systèmes irrigués. Il faudra donc, dans les simulations, limiter le nombre de campagnes pouvant se succéder.

L'exclusivité donnée au crédit parmi les flux autres que l'eau concernant le système irrigué nous amène à regrouper sous ce terme tous les intrants ainsi que le riz produit. Cette assimilation du riz et des intrants au crédit revient à supposer qu'il n'y a pas de blocage sur l'accès aux intrants ni sur le marché du riz pour que la disponibilité d'une somme d'argent, d'un stock de riz ou d'intrants soient équivalentes. Ce n'est plus le cas actuellement, en particulier en ce qui concerne le marché du riz.

"Sinon je pouvais vendre, le prix était bon, mais l'argent liquide n'aurait pas réglé les problèmes de ma famille. Les problèmes que je peux régler avec le riz, je ne peux pas les régler avec de l'argent."
(P16, 14/12/96)

Cependant les remboursements de crédit en riz continuent à être majoritaires même s'ils ne sont plus aussi répandus qu'auparavant. A un moment donné, la valeur des intrants est peu variable. En fait le crédit peut être considéré comme représentatif de tous les intrants, on fait l'hypothèse que le même type de coordination est mis en œuvre pour l'accès au crédit ou à des engrais. Les problèmes rencontrés sur le marché du riz concernent plus les groupements qui doivent transformer le stock de riz, reçu en remboursement des crédits ou en paiement de la redevance, en argent, puis cet argent en intrants ou en gasoil pour la campagne suivante. Ceci ne se fait plus aussi facilement depuis une campagne ou deux mais l'évolution des comportements y afférents n'a pas encore été observée : les groupes continuent à accepter d'être remboursés en riz. C'est pourquoi nous avons représenté tous les flux non hydriques par la même unité : le sac de paddy.

Au niveau hydraulique, le choix d'un pas de temps de base quotidien implique un modèle d'écoulement assez simple, de type bilan volume : le volume d'eau qui entre dans le système au niveau de la pompe ressort soit par évapotranspiration ou infiltration soit par débordement des parcelles ou des canaux⁶⁷. La concentration de la modélisation sur les tâches relatives à l'eau et au crédit conduit dans un premier temps à faire l'hypothèse que l'on peut s'abstenir de représenter l'itinéraire technique de chaque paysan pour ne s'intéresser qu'à son activité d'irrigation. Cela revient à faire l'hypothèse que la compétence des paysans et le respect de leur itinéraire technique est homogène sur toutes les composantes de celui-ci : si un paysan se donne, ou arrive à trouver, les moyens pour gérer sa lame d'eau comme il pense qu'il faut, il fera de même pour le reste de son itinéraire technique. En conséquence **le paramètre d'assèchement sera supposé constant durant la campagne**. Il est supposé dépendre seulement de la présence d'eau sur la parcelle ou dans le sol : on ne prend pas en compte le coefficient cultural du riz dans le calcul d'une évapotranspiration réelle.

La prise en compte de durées supérieures ou égales à la campagne et des flux d'argent, avec une équivalence riz, implique de simuler une production agricole. Or les travaux d'agronomes, en particulier les modèles physiologiques de simulation de rendement du riz, montrent que l'élaboration du rendement dépend de nombreux facteurs que l'on connaît mal actuellement (Plant, 1997) et est sujette à une variabilité importante (Poussin, 1995). Les modèles habituels utilisent des paramètres locaux à la région ou au site représenté et soit impliquent de détailler les différentes étapes du développement de la plante, soit n'ont d'intérêt qu'en valeur moyenne (Horie et al., 1992). Or les hypothèses faites précédemment ne permettent pas de représentation détaillée de l'évolution de la plante. Des modèles plus récents, issus des systèmes experts, simulent également le rendement en prenant en compte les différents stades culturaux mais avec des règles qualitatives (Plant, 1997). Ce type de simulation pourrait convenir dans le cadre de représentation choisie à base de règles mais ne serait pas cohérent avec les hypothèses faites sur les phases représentées et demanderait une approche plus fine : différents stades culturaux ne peuvent pas être pris en compte avec les échelles de temps retenues. On ne retiendra donc pas cette méthode

⁶⁷ la représentation du drainage n'est pas prise en compte dans cette version du modèle, même si deux des 5 sites étudiés comportaient un réseau de drainage. Cependant dans les entretiens les rares moments ou des questions de coordination relativement au drainage sont apparues c'était à propos d'étapes de l'itinéraire technique non prises en compte ici. Un autre intérêt d'une représentation du drainage pourrait tenir dans la modélisation de l'évolution des sols qui n'est pas prise en compte non plus.

non plus. Etant donné les hypothèses faites auparavant, de même que dans le jeu de Burton (Burton, 1989b), seules les chutes de rendement potentiel induites par les facteurs simulés, l'eau et l'investissement en intrants, peuvent être prises en compte. Tous les autres facteurs sont alors représentés par un coefficient aléatoire affecté au rendement potentiel en fin de campagne.

Toutes ces hypothèses, et en particulier celles sur la simulation de la production de riz, ont une implication pour l'usage ultérieur des simulations : les résultats des simulations ne peuvent pas être fiables dans l'absolu. Ils ne pourront être significatifs que par comparaison les uns aux autres : évolution de l'état du système avec l'enchaînement des campagnes et surtout comparaison de ces évolutions d'une simulation à une autre.

3.2.2 une deuxième représentation des systèmes irrigués dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal

Ce lot d'hypothèses mène à une modélisation des systèmes irrigués se traduisant dans la conception d'un Simulateur Hydro-Agricole Décivant les modes d'Organisation et de Coordination (SHADOC). Ce modèle comporte deux parties : un modèle du périmètre d'une part avec sa structure et sa dynamique propre, un modèle d'organisation sociale d'autre part avec de même sa structure et sa dynamique propre. Les interactions entre ces deux composantes constituent une représentation des modes d'appropriation du périmètre par la société représentée. Nous allons maintenant en présenter la structure et la dynamique. Même si ce n'est pas toujours exprimé comme tel pour la fluidité du texte, dans toute cette partie 3.2.2, *il n'est question que du modèle et donc d'agents informatiques, objets, attributs et méthodes plutôt que de paysans, parcelles, critères ou règles.*

description du modèle du périmètre

Le périmètre représenté est constitué d'une station de pompage, d'un canal principal, appelé Bief, emblématique du réseau principal réel, sur lequel sont branchés 5 irrigateurs alimentés par des vannes de taille variable, fonction du nombre de parcelles, mais ne pouvant être modifiée au cours de la simulation, le long desquels se situent un nombre variable de parcelles. La Figure 17 décrit la structure de la représentation du périmètre en utilisant la méthode OMT⁶⁸ (Rumbaugh et al., 1995). La méthode de représentation et les différents symboles utilisés dans cette figure et la suivante sont explicités dans l'annexe 4 ainsi que les différents termes et concepts propres aux SMA.

⁶⁸ Technique de Modélisation par Objets

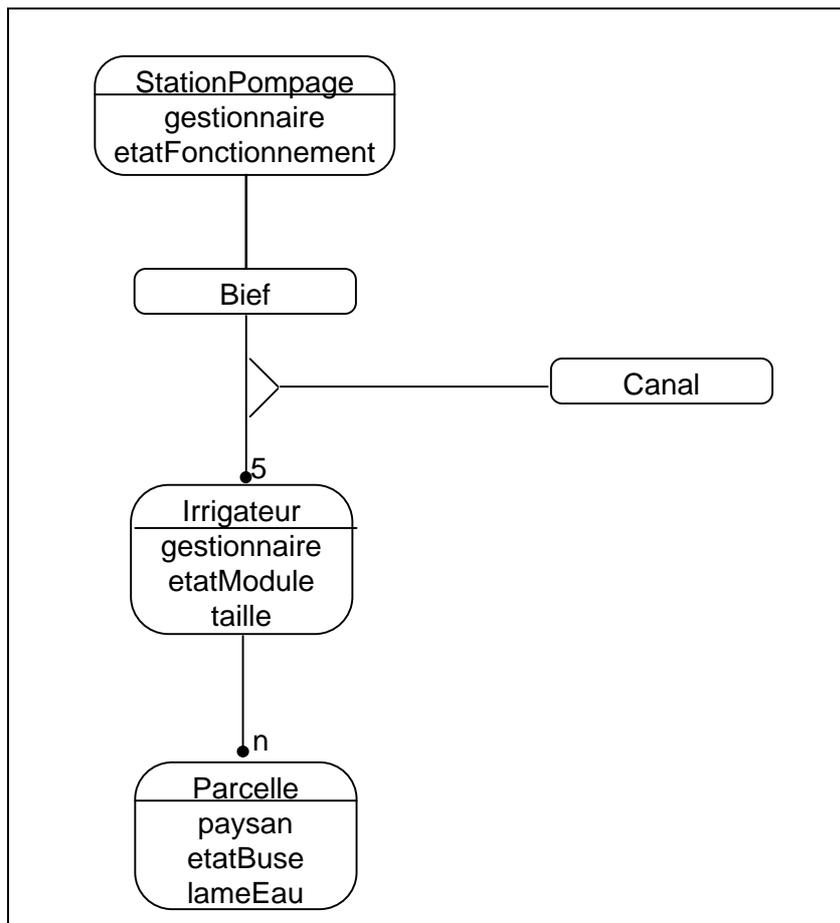


Figure 17 : structure de la représentation du milieu

Les classes Bief et Irrigateur héritent toutes deux d'une classe Canal. Chaque instance de la classe StationPompage est connectée à seulement une instance de la classe Bief. Chaque instance de la classe Bief est connectée à exactement 5 instances de la classe Irrigateur, chacune en relation avec exactement une instance de la classe Bief. Chaque instance de la classe Irrigateur est en relation avec plusieurs instances de Parcelle, chacune en relation avec exactement une instance de la classe Irrigateur. Quelques attributs de chacune de ces classes sont précisés à titre d'exemple.

La station de pompage pompe une quantité d'eau fonction de son attribut #etatFonctionnement et de la règle de mise en œuvre du gestionnaire. L'eau pompée s'écoule dans le bief dans la limite de sa capacité : ce qui déborde est considéré comme perdu. Celui-ci distribue ensuite l'eau aux irrigateurs dont l'attribut #etatModule a la valeur #ouvert, dans l'ordre de l'amont vers l'aval, en fonction de leur attribut #taille et de l'eau disponible. Chaque irrigateur répartit ensuite l'eau qu'il a éventuellement reçue aux parcelles qui lui sont connectées dont la buse est ouverte. Cette répartition se fait de manière à reproduire un avantage pour les parcelles situées à l'amont de l'irrigateur, de la manière suivante : la parcelle de rang r au sein de la liste des parcelles dont la buse est ouverte le long d'un irrigateur reçoit la quantité $V_r = T_r * (1/2^r) / (1/\sum_k(1/2^k))$. T_r est la taille de l'irrigateur

et la somme se fait sur l'ensemble des parcelles ouvertes le long de l'irrigateur. Chaque pas de temps les parcelles s'assèchent d'une hauteur d'eau identique durant toute la campagne et pour toutes les parcelles. Cet assèchement est diminué de moitié quand la hauteur de lame d'eau est négative, c'est-à-dire quand il n'y a plus d'eau en surface. La réserve utile est supposée de 15 cm. Lors du semis de la parcelle un rendement potentiel est initialisé en fonction de la variété de riz choisie par l'agent paysan auquel fait référence l'attribut #paysan de la parcelle et du niveau d'investissement en intrants, ce rendement potentiel décroît durant la phase "entretien de la lame d'eau" à chaque événement de stress hydrique selon la relation proposée par la FAO (Doorenbos et Kassam, 1979) : soit θ la teneur en eau minimale de la parcelle lors d'un événement de stress hydrique. Si $\theta \geq 0.75$, le rendement potentiel est inchangé. Si $0.33 < \theta < 0.75$, le rendement potentiel est multiplié par $0.8 * (3\theta - 1)$. Si $\theta \leq 0.33$, le rendement potentiel devient nul. En fin de campagne la résultante est multipliée par un coefficient aléatoire représentant les autres sources de chute de rendement possibles⁶⁹. La Figure 18 ci-dessous illustre l'aménagement virtuel qui découle de cette représentation.

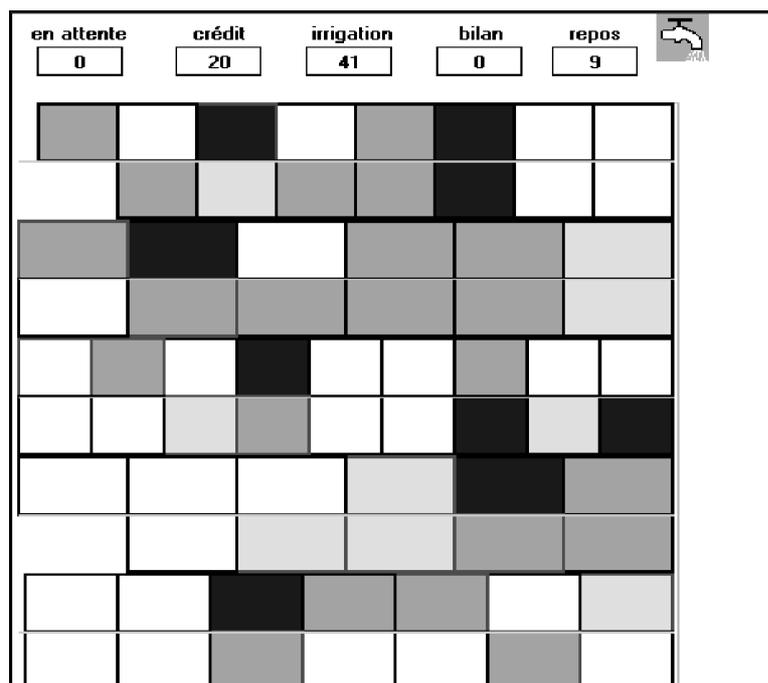


Figure 18 : extrait de l'interface, visualisation de l'aménagement virtuel

⁶⁹ ce coefficient aléatoire est issu d'une distribution uniforme dans [0.2 ; 1].

description du modèle de société

La représentation de la population à qui est affecté l'aménagement représenté ci-dessus met en scène des agents paysan selon un modèle à plusieurs niveaux : des agents en interaction, des agents s'échangeant du crédit, des paysans exploitant un périmètre irrigué. Les deux premiers niveaux ne sont pas spécifiques à la modélisation des systèmes irrigués et se retrouvent, pour le premier niveau en particulier, dans une forme proche dans d'autres expériences de modélisations multi-agents de gestion de ressources renouvelables. Ainsi l'environnement de simulation Cormas⁷⁰ propose des classes "d'agents situés" dans leur environnement et "d'agents communicants" incluant des attributs et des méthodes relatifs à leur déplacement dans un environnement commun pour les premiers et aux communications entre agent pour les seconds (Bousquet et al., 1998).

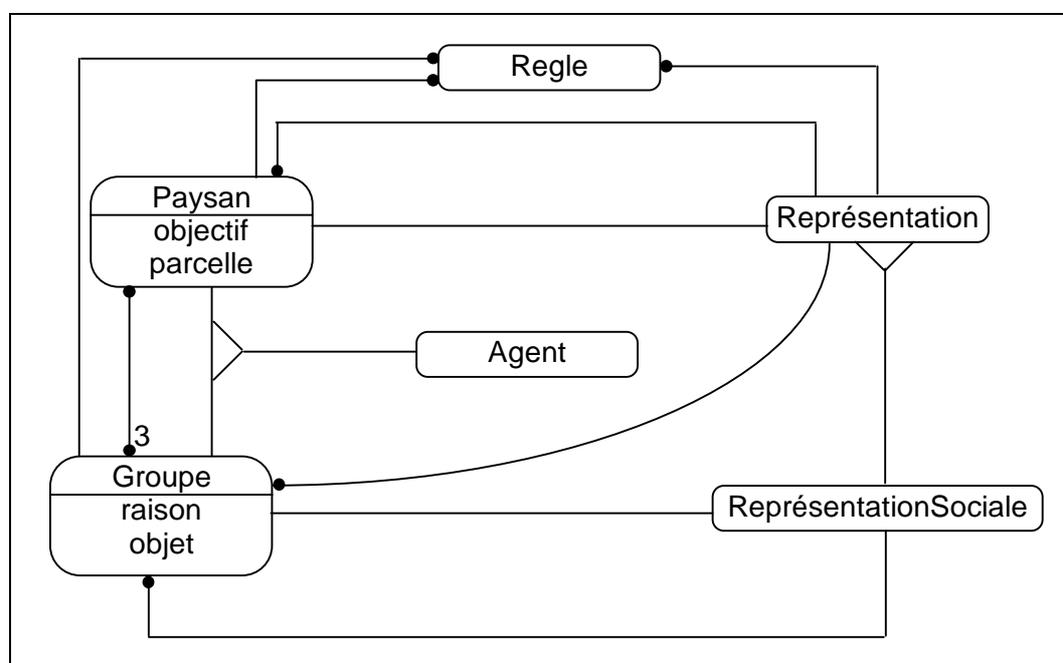


Figure 19 : structure de la représentation de la société

Les classes Paysan et Groupe héritent toutes deux de la classe Agent. Chaque instance de la classe Paysan est connectée à exactement 3 instances de la classe Groupe, plusieurs instances de la classe Règle et exactement une instance de la classe Représentation, qui hérite elle-même de la classe ReprésentationSociale. Chaque instance de la classe Groupe est connectée à plusieurs instances de la classe Paysan, plusieurs instances de la classe Règle et exactement une instance de la classe ReprésentationSociale. Chaque instance de la classe Représentation est en relation avec plusieurs instances des classes Paysan et Groupe.

⁷⁰ Common Pool Resources and Multi-Agent Systems

La Figure 19 décrit, en utilisant également la méthode de notation OMT, la structure de base de la représentation de la population qui utilise le périmètre. 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.

Chaque agent agit selon une base de règles qui lui est propre et dont la forme dépend de sa classe, Paysan ou Groupe, et dans ce dernier cas de son attribut #raison. Chaque paysan agit aussi en fonction d'un objectif qui lui est propre pris parmi l'ensemble {#production, #nourriture, #fauteDeMieux, #foncier} qui reprend les différents types d'objectifs observés sur le terrain et décrits au § 3.1.3. 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 social constitué de références à d'autres agents paysan avec lesquels il va volontiers coopérer : échanges d'informations, de services, d'expériences... Ce réseau d'affinité sociale est par défaut indépendant des autres groupes, mais une option permet à l'utilisateur du modèle de choisir des compositions semblables pour ces réseaux d'affinité sociale et les groupes d'accès au crédit et les groupes d'attribution de l'eau. 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. 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 qu'il estime être les leurs.

Le Tableau 6 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 vis-à-vis de la complexité des systèmes observés sur le terrain et présentés au § 3.1.3.

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 6 : effectif d'agents et d'objets présents dans SHADOC

Représentation de la dynamique du modèle

Pour représenter en partie la dynamique du système multi-agent nous utilisons le formalisme des réseaux de Pétri (Jensen, 1992 ; Vidal-Naquet et Choquet-Geniet, 1992). En effet cette méthode est particulièrement bien adaptée aux systèmes parallèles (Vidal-Naquet et Choquet-Geniet, 1992), or pour décrire de manière structurale et comportementale des SMA, des outils rendant compte de processus pouvant s'effectuer en parallèle sont nécessaires (Ferber et Magnin, 1994). C'est pourquoi ce formalisme est intéressant et en particulier celui des réseaux de Pétri colorés hiérarchiques (Jensen, 1992) permettant de rendre les formalisations plus compactes en spécifiant des attributs aux marques déplacées au travers du réseau et surtout de représenter les SMA à différents niveaux de détail. Ici on s'intéresse essentiellement aux réseaux de Pétri en tant qu'outil de représentation, les éléments correspondants sont repris en annexe 5. Même à ce niveau de base, ils sont intéressants relativement à la question des modes de coordination au sein des systèmes irrigués car ils permettent de bien voir où se situent les communications, les besoins de coordination et les situations d'externalités entre les agents du système. Intéressons nous tout d'abord à la dynamique de la campagne dans son ensemble avec l'enchaînement des phases puis détaillons chacune des phases.

En début de campagne, tous les paysans sont en attente et passent un à un en phase #crédit selon un tirage aléatoire. Pour un paysan donné, la réussite de cette phase, détaillée dans la Figure 21, concrétisée par l'obtention du crédit pour les intrants et l'autorisation de faire la campagne, le fait passer en phase #irrigation. Un échec le conduit à abandonner la

campagne et à passer en phase #repos. Ceux qui sont passés en phase #irrigation, détaillée dans la Figure 25, tentent de démarrer la campagne, c'est-à-dire de semer, puis de la mener à bien en fonction de leur objectif. S'ils y arrivent ils passent en phase #bilan sinon ils passent en phase #repos. 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, détaillée dans la Figure 28, et finissent tous en phase #repos en attendant une nouvelle campagne éventuelle. La Figure 20 donne une représentation de l'enchaînement de ces différentes phases⁷¹.

Pour plus de détails, suivons maintenant l'un des paysans du système irrigué, que nous appellerons Aamadu, au travers de chacune de ces phases.

Une phase de recherche du crédit

La phase crédit se divise en trois étapes : évaluation du besoin pour être autorisé à faire la campagne et pouvoir la mettre en œuvre, recherche du crédit correspondant à ce besoin, demande d'autorisation pour faire la campagne. L'enchaînement de ces trois étapes est représenté sur la Figure 21.

⁷¹ Le formalisme des réseaux de Pétri a été retenu pour cette figure, alors que celui des automates à états finis serait suffisant, dans un but d'homogénéité avec les figures suivantes qu'il assemble.

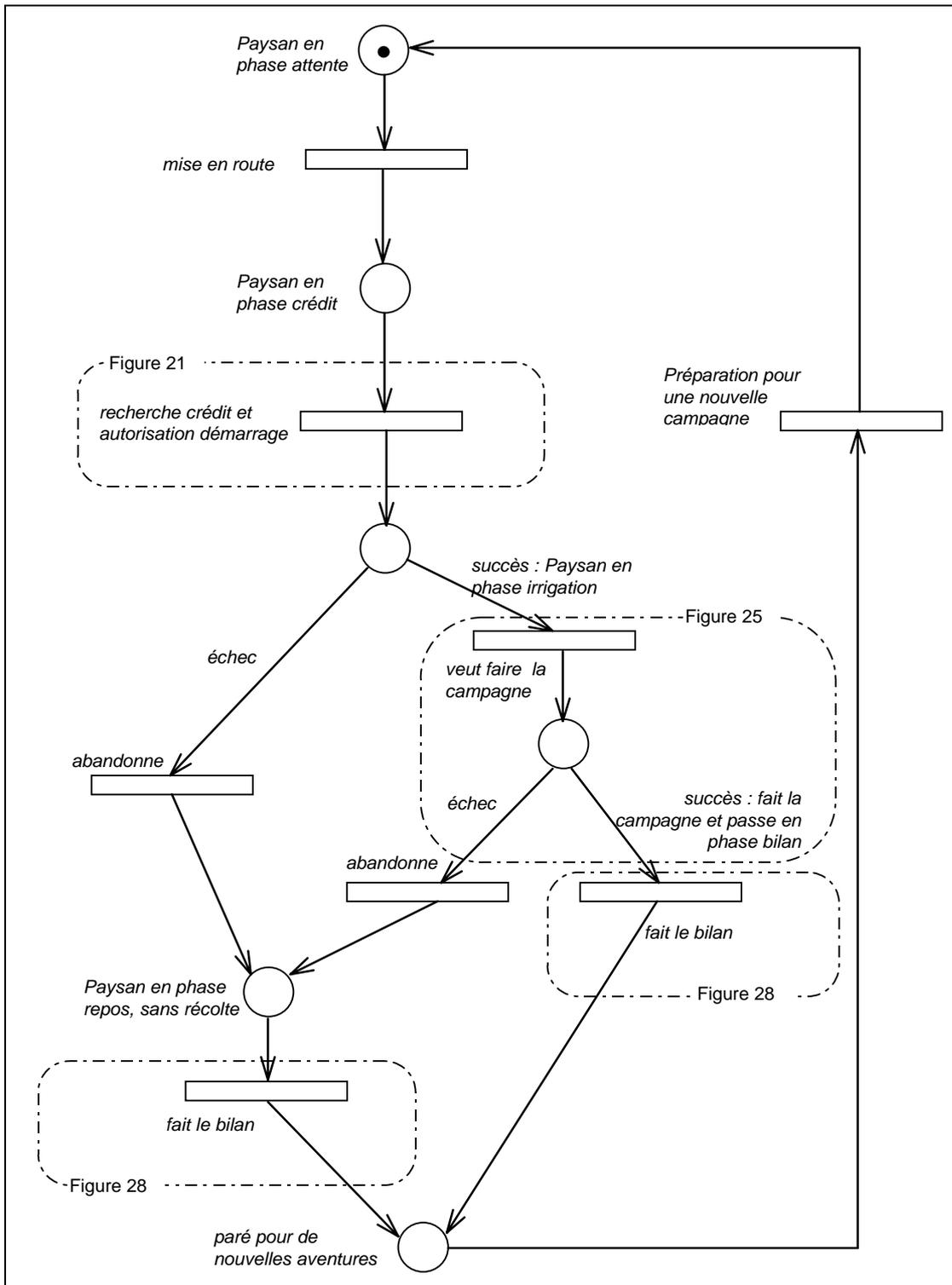


Figure 20 : représentation du déroulement d'une campagne

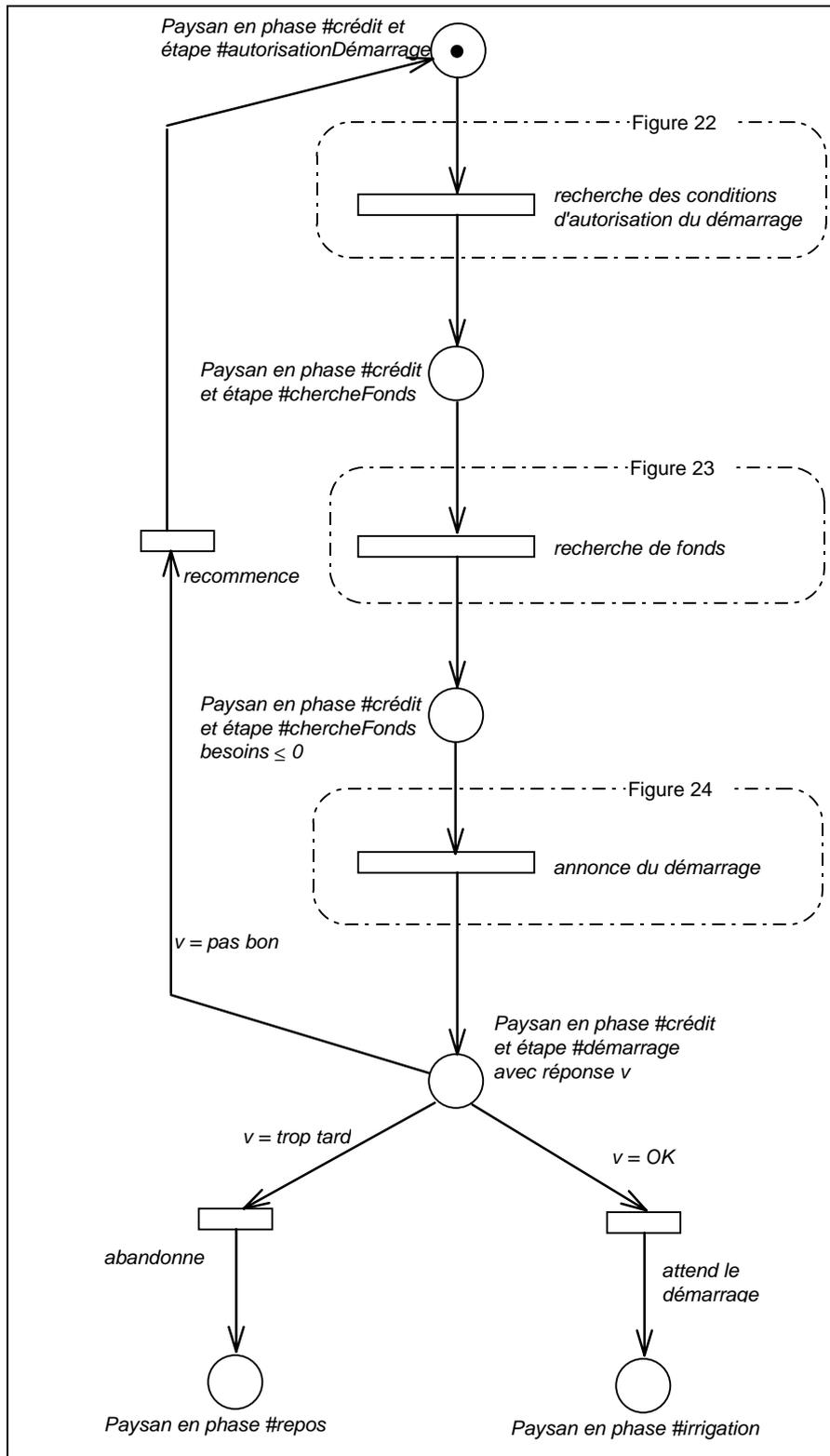


Figure 21 : représentation de la phase "recherche crédit et autorisation démarrage"

La première de ces trois étapes peut se faire de deux manières selon la nature des interactions entre le paysan et le groupe de raison #pompage :

Aamadu a accès à l'information du groupe, il demande à celui-ci combien il doit rembourser pour être autorisé à faire la campagne, celui-ci lui retourne alors le montant de ses impayés à son égard.

si Aamadu n'a pas accès à cette information, il estime à quelle condition il serait autorisé à faire la campagne à partir de la représentation qu'il a de la règle d'autorisation de démarrage mise en œuvre par le groupe.

Cette étape est représentée par la Figure 22 ci-dessous.

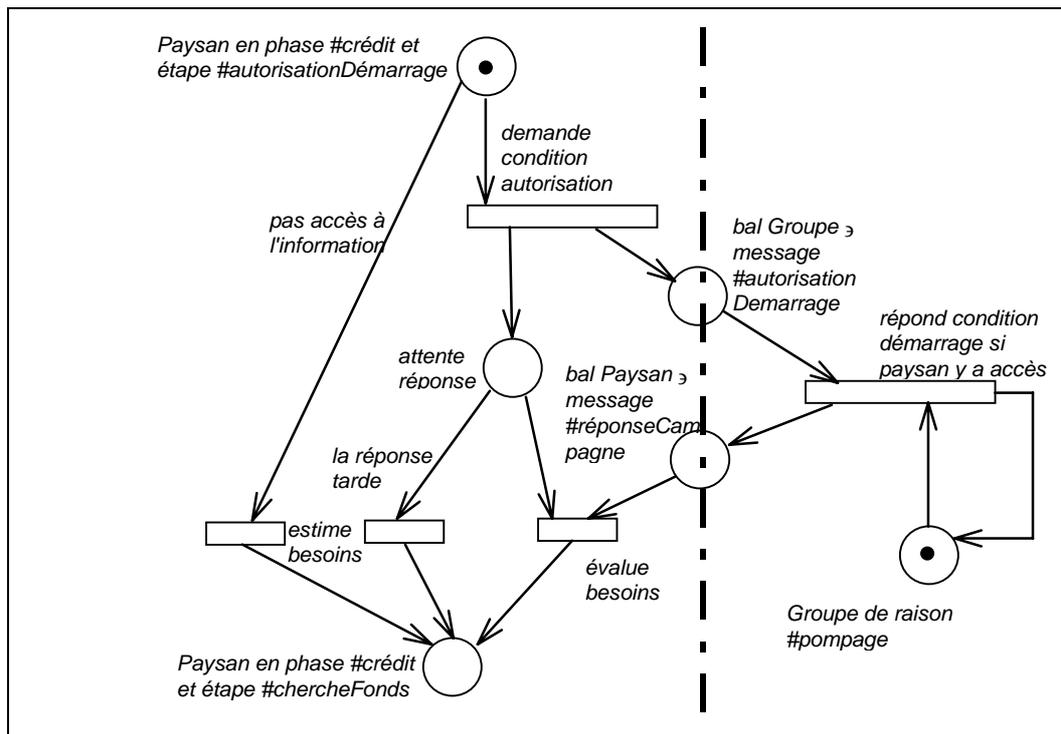


Figure 22 : étape de recherche des conditions d'autorisation du démarrage. La présence d'un jeton dans la place groupe de raison #pompage est conditionnelle.

Dans la deuxième étape de cette phase, Aamadu demande des crédits aux agents qu'il se représente être des prêteurs potentiels. Il commence par ceux qu'il se représente être les plus généreux étant donné l'état de la relation qu'il a avec eux : il préférera demander à un groupe ou à un paysan dont il se représente la modalité de la règle de #prêt valant #complet à condition qu'il ne soit pas endetté à son égard. Il procède au plus à une demande par jour tant que le besoin estimé n'est pas satisfait. La fréquence des jours où Aamadu fait une

demande dépend de son objectif⁷². La réalisation et le montant éventuel du prêt dépendent de la règle #crédit si le prêteur potentiel est un groupe ou de sa règle #prêt s'il s'agit d'un paysan. La Figure 23 donne une représentation de cette étape.

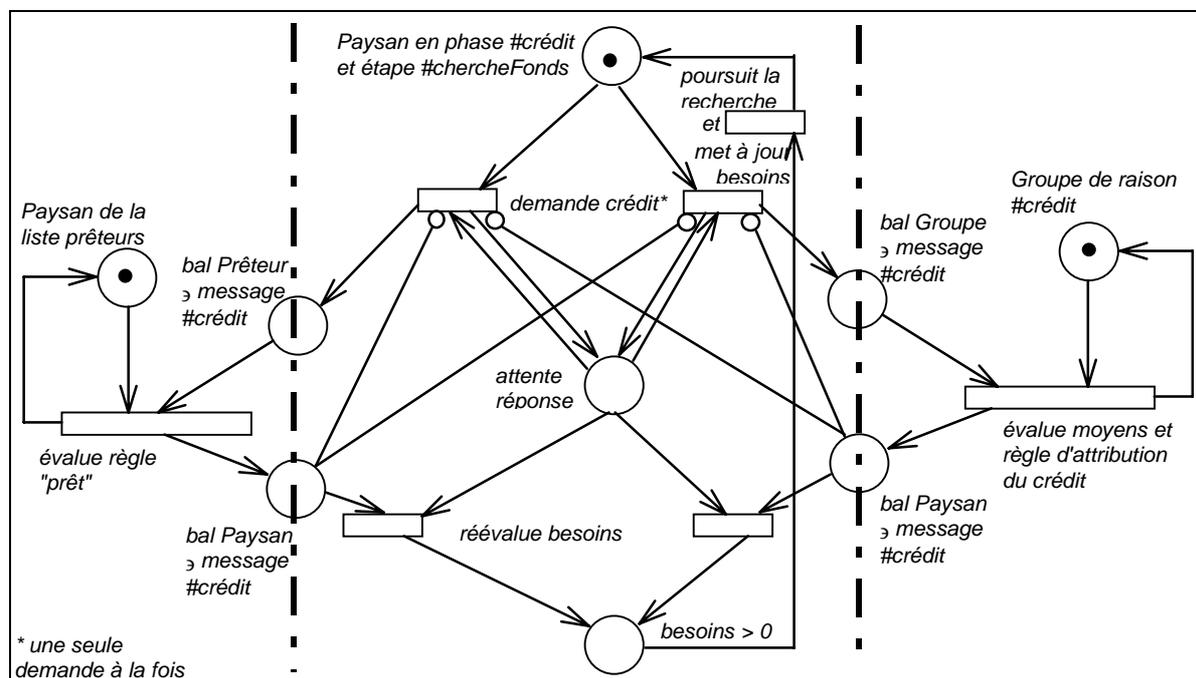


Figure 23 : étape de recherche des fonds. La présence d'un jeton dans les places "Paysan de la liste prêteurs" et "Groupe de raison #crédit" est conditionnelle.

Au cours de la troisième étape enfin, Aamadu prévient le groupe de raison #pompage qu'il est prêt à démarrer et attend sa réaction. Celui-ci peut alors soit l'autoriser à faire la campagne s'il satisfait à la règle collective de participation à la campagne, soit le lui refuser, auquel cas Aamadu doit recommencer la procédure à partir de son évaluation des besoins, soit lui dire que c'est trop tard auquel cas Aamadu abandonne la campagne. Supposons que Aamadu a reçu l'autorisation de faire la campagne. La Figure 24 représente cette troisième étape.

⁷² Aller demander du crédit est supposé ici être l'activité principale d'une journée étant donné notamment les temps de déplacement. C'est pourquoi il ne peut y avoir au plus qu'une seule demande par jour et pas chaque jour.

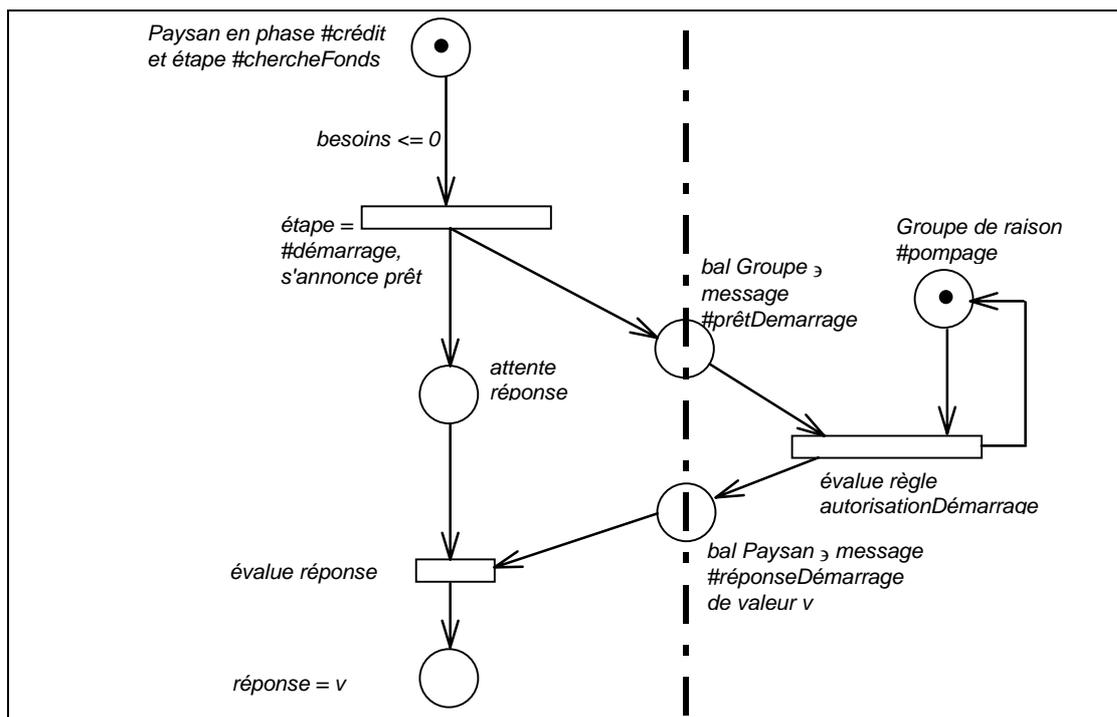


Figure 24 : étape d'annonce du démarrage. La présence d'un jeton dans la place groupe de raison #pompage est conditionnelle.

Une phase d'entretien de l'irrigation

La phase irrigation est subdivisée en deux étapes, propres à chaque paysan, séparées par l'événement du semis de la parcelle. La Figure 25 représente l'enchaînement de ces deux étapes.

Il s'agit tout d'abord pour Aamadou d'avoir l'information du démarrage de la campagne soit *via* le groupe de raison #pompage, soit par un paysan de son réseau d'affinité sociale qui l'informe de la mise en marche de la station de pompage. Cette première étape est représentée sur la Figure 26 ci-dessous. Quand il a cette information, il met à jour sa représentation de l'état de fonctionnement de la station de pompage et, comme il est autorisé à faire la campagne, il cherche à pouvoir démarrer. Le démarrage se concrétise quand il sème sa parcelle. Au semis, il choisit, en fonction de sa représentation de la règle collective d'arrêt de la campagne, la variété de cycle le plus long possible parmi trois alternatives : court, moyen ou long.

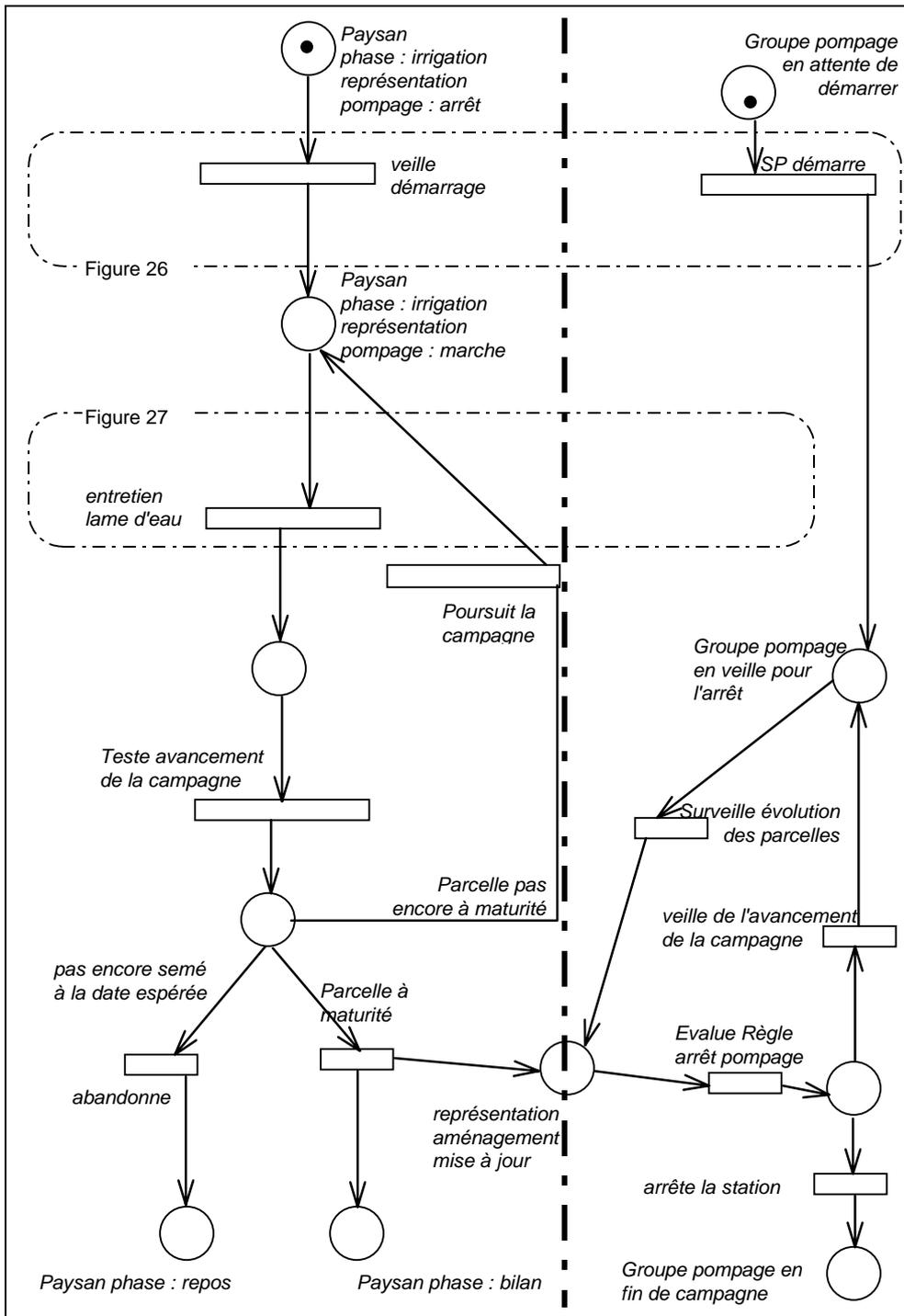


Figure 25 : représentation de la phase "irrigation"

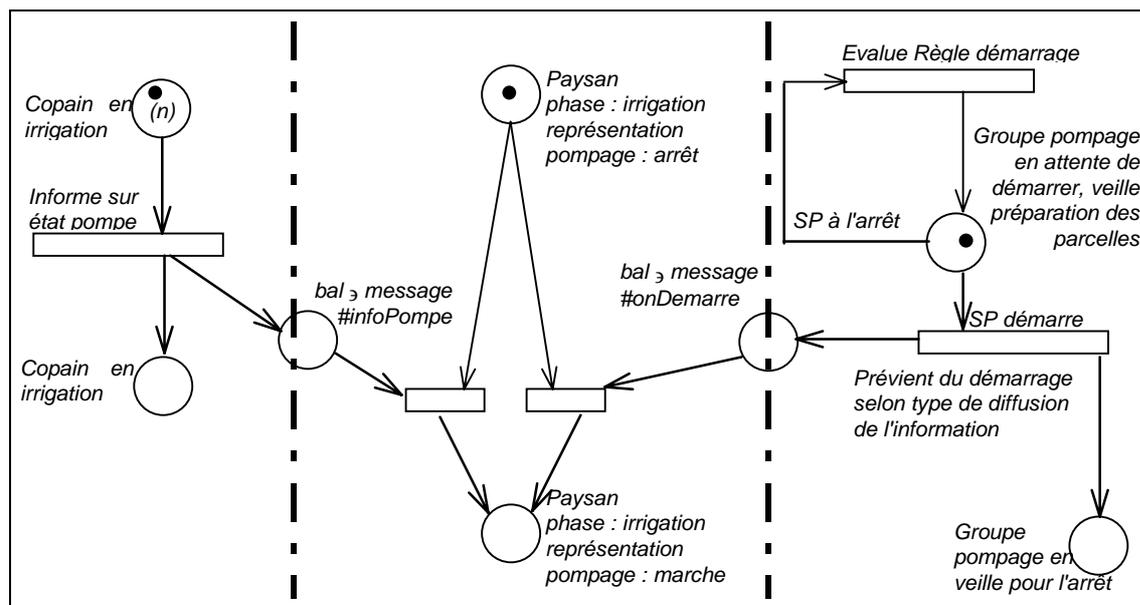


Figure 26 : étape attente du démarrage effectif de la station de pompe

Durant la deuxième étape, à chaque pas de temps, Aamadu choisit d'aller ou non sur sa parcelle en fonction de son objectif, de sa représentation de l'état de sa parcelle et de sa représentation de sa possibilité de pouvoir irriguer si nécessaire. L'objectif de Aamadu détermine la précision avec laquelle il met en œuvre sa campagne, ce qui se traduit dans le modèle par des seuils de probabilité particuliers à chaque objectif de déplacement sur la parcelle. Quel que soit son objectif, Aamadu n'a pas toujours la même probabilité d'aller sur sa parcelle : s'il pense que sa parcelle est à sec et que la règle du groupement d'attribution de l'eau le laissera irriguer, elle sera plus élevée.

Quand il va sur la parcelle, il en observe alors le niveau d'eau. Si celui-ci est inférieur à sa valeur de référence minimum et que la buse de la parcelle est fermée, il souhaite irriguer la parcelle. Si le niveau est supérieur à sa valeur de référence maximum, il ferme la buse et sème si ce n'est déjà fait. S'il souhaite irriguer, il ouvre sa buse si la règle d'attribution de l'eau du groupe chargé de gérer la maille hydraulique où se trouve sa parcelle l'y autorise, sinon il demande au paysan ayant le tour d'eau l'autorisation d'irriguer en même temps que lui. S'ils sont dans le même réseau d'affinité sociale, et que sa parcelle ne manque pas trop d'eau ce dernier l'y autorise⁷³. En même temps, Aamadu a vu que la parcelle de son ami Baasiru, située dans la même maille, manque d'eau, de retour en fin de journée il va donc le

⁷³ Cette possibilité d'arrangements entre les paysans dans le cadre d'une règle d'attribution de l'eau de modalité #sequentiel n'est pas représentée sur la Figure 27 dans un souci d'allègement de celle-ci. Elle est par contre bien présente dans le modèle.

mettre au courant de la situation pour qu'il actualise sa représentation de l'état de sa parcelle.

Quand il ne va pas sur sa parcelle, il fait évoluer sa représentation de ce qui se passe sur le périmètre à partir d'informations qu'il reçoit de paysans de son réseau d'affinités sociales ayant leur parcelle dans la même maille ou, à défaut, à partir de son expérience de l'évolution du périmètre en son absence : hauteur de la lame d'eau sur sa parcelle mais aussi tour d'eau et fonctionnement de la station de pompage.

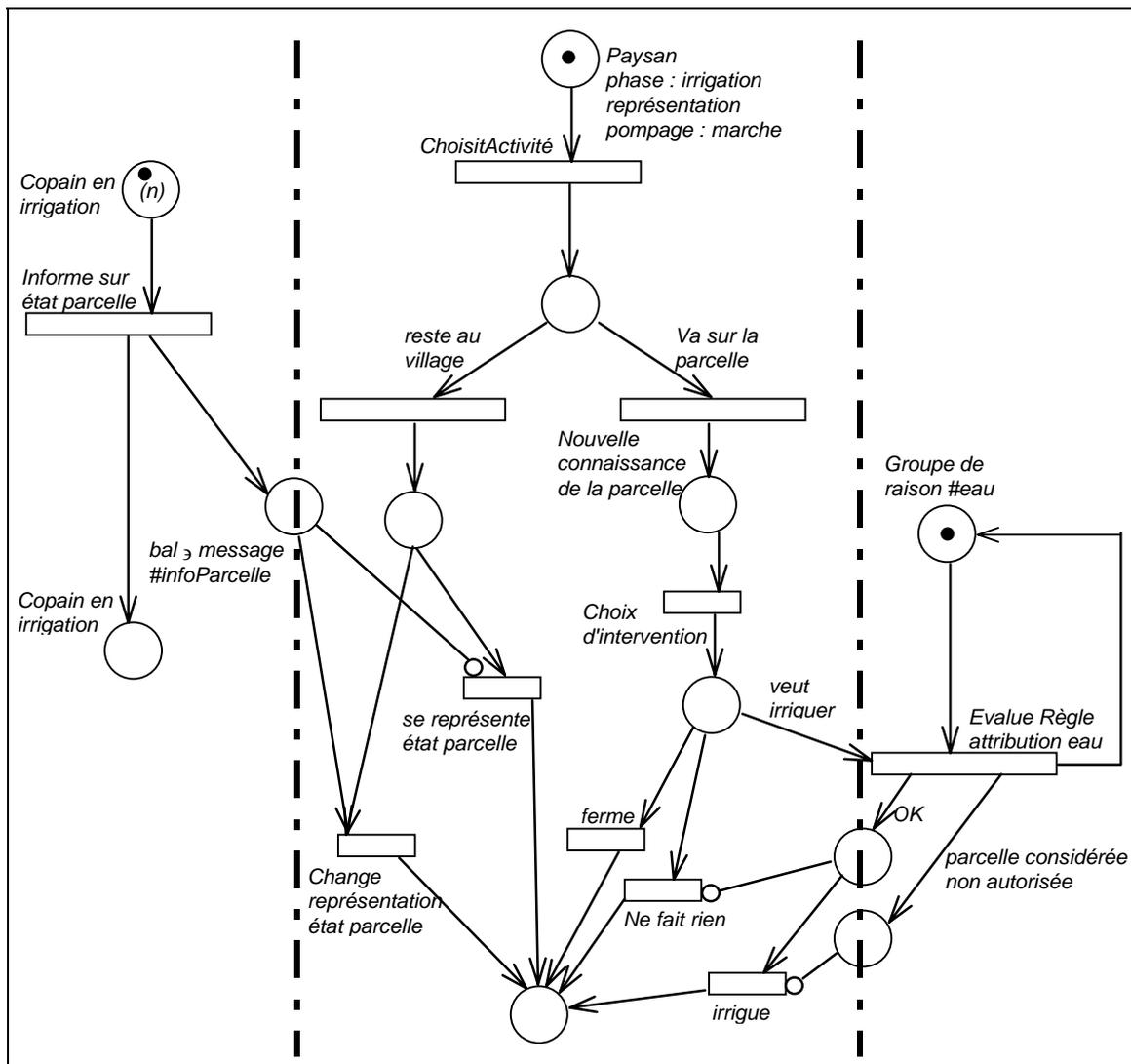


Figure 27 : étape d'entretien de la lame d'eau

Enfin le bas de la Figure 25 représente l'évaluation de l'avancement de la campagne par chaque paysan et par le groupe de raison #pompage. D'une part Aamadou évalue où il en est dans la campagne. S'il commence à se faire tard dans la saison et qu'il n'a pas encore eu assez d'eau pour semer, il abandonne la campagne et passe en phase #repos. Sinon, il continue ainsi jusqu'à la maturité de la parcelle ou l'arrêt de la station de pompage qui le fait passer en phase #bilan. D'autre part le groupe de raison #pompage observe l'évolution du

nombre de parcelles arrivant à maturité et fait évoluer sa représentation de l'état du système en conséquence. Selon sa règle d'arrêt de la station de pompage il utilise cette représentation, la date ou la durée écoulée depuis le début de la campagne pour mettre la station de pompage à l'état #arrêt.

Une phase de bilan du déroulement de la campagne

Quand la fin de la campagne approche, qu'il ait mis sa parcelle en culture ou non, Aamadu évalue ce qui s'est passé afin d'en tirer les conséquences pour les campagnes suivantes. Il commence par évaluer son critère de satisfaction, par exemple sa date de récolte, en comparant son résultat à son seuil de satisfaction : la date à laquelle il a récolté à celle avant laquelle il souhaite récolter. Si son critère est satisfait, il ne change rien à sa manière de faire pour la campagne suivante. Si son critère n'est pas satisfait, il entame une procédure de transformation de son jeu de règles selon une métarègle ayant une modalité parmi les quatre suivantes :

ne change rien.

imite le paysan de son ensemble d'imitation⁷⁴ qui a fait le meilleur score pour son propre critère si ce score est satisfaisant. En poursuivant avec l'exemple de la date récolte, Aamadu va imiter le paysan de son ensemble d'imitation dont la date de récolte est la plus précoce à condition que cette dernière soit antérieure à sa propre date objectif.

sélectionne les paysans de son ensemble d'imitation qui ont fait un score qui aurait satisfait son critère et imite parmi ceux-ci celui qui a le comportement le plus proche du sien. C'est-à-dire dans le cas d'un critère de satisfaction #dateRecolte, parmi les paysans de l'ensemble d'imitation dont la date de récolte est antérieure à la date objectif de Aamadu, celui qui a le comportement le plus proche du sien.

la première fois imite le paysan de son ensemble d'imitation qui a fait le meilleur score pour son propre critère si ce score avait satisfait son critère puis, s'il est de nouveau insatisfait reprend son comportement antérieur.

Une imitation de comportement consiste à reprendre l'ensemble des règles de l'agent imité. Remarquons que ce processus d'imitation implique qu'Aamadu obtienne des réponses des paysans de son ensemble d'imitation ce qui arrive seulement si Aamadu fait partie du

⁷⁴ L'ensemble d'imitation est l'ensemble des paysans pour lesquels il peut avoir des informations sur les résultats, c'est-à-dire, pour SHADOC, son réseau d'affinité sociale ou bien l'intersection de ce réseau avec l'un des groupes dont il fait partie, accès à l'eau de l'irrigateur ou accès au crédit, ou encore l'intersection de ce réseau avec l'intersection de tous les groupes dont il fait partie.

réseau d'affinité sociale de ces paysans et si l'indicateur de Aamadou a un sens en fin de campagne pour ceux-ci.

Chaque groupe fait de même avec comme ensemble d'imitation l'ensemble des autres groupes ayant la même raison. La Figure 28 ci-dessous représente cette phase de bilan pour un paysan.

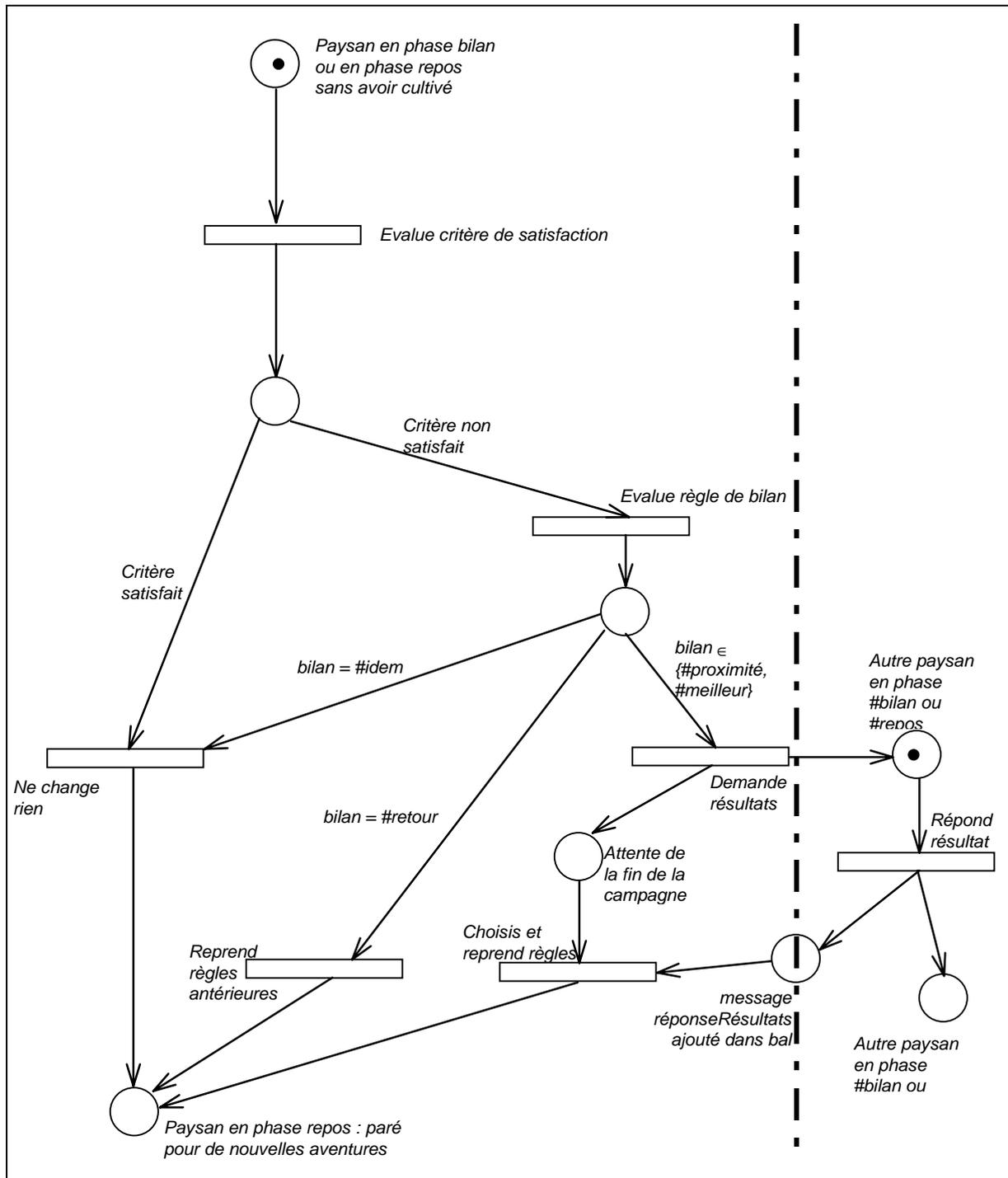


Figure 28 : représentation du bilan de campagne. La présence d'un jeton dans la place Autre paysan en phase #bilan ou #repos est conditionnelle.

3.2.3 Un système irrigué virtuel

Le modèle ainsi décrit constitue un système irrigué virtuel, archétype des systèmes irrigués existant dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Il permet d'expérimenter divers scénarios dans le cadre défini, et cela sans engendrer d'externalités négatives pour les paysans, et d'observer les indicateurs qu'il prévoit : on limite l'expérimentation sur des cas réels dont la mise en œuvre est lourde, difficile à répéter et dont les conséquences négatives doivent bien souvent être supportées par les paysans.

Archétype de systèmes irrigués de la moyenne vallée du Sénégal, ce modèle ne représente pas, ni ne cherche à représenter, un aménagement donné de la vallée, même en tant que version simplifiée. L'utilisateur du modèle possède peu de marge de manœuvre en ce qui concerne la structure de l'aménagement : il ne peut jouer que sur le nombre de parcelles le long de chaque irrigateur et dans une moindre mesure sur le type de sol *via* le coefficient d'assèchement qui inclut la percolation. Ce dernier coefficient est *a priori* homogène sur l'ensemble de l'aménagement. L'utilisateur a par contre plus de marge de manœuvre sur l'organisation en groupements de la population du système ainsi que sur les règles collectives et individuelles mises en œuvre, dans un ensemble de choix cependant fini. Un échantillon des choix possibles est présenté dans le tableau ci-dessous, l'ensemble de ces choix est en annexe 7.

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	$x \in \{0.8 ; 0.9 ; 1.0 ; 1.1 ; 1.2\}$
homogénéité ⁷⁵	x	$x \in \{true, false\}$
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	$(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5)$	$r_i \in \{\text{séquentiel, libreService}\}$; une règle par groupement associé à une maille
règles d'accès au crédit	$(r_i)_{1 \leq i \leq N_c}$	$r_i \in \{\text{individuel, collectif, fondsDisponibles, selonBesoins}\}$; une règle par groupement d'accès au crédit.
règle d'arrêt de la station de pompage	r	$r \in \{\text{date fixe, durée fixe, surface minimum à maturité}\}$
règle de bilan des groupes	$(r_i)_{1 \leq i \leq (N_c + 5 + 1)}$	$r_i \in \{\text{idem, meilleur, proximité, retour}\}$; 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 {production, nourriture, foncier, 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 {production, date de démarrage, date de récolte, endettement, cagnotte}
revenu extérieur	x	$x \in \{\text{aucun, aléatoire, selon objectif, selon campagne}\}$

Tableau 7 : échantillon de choix possibles pour la définition de scénarios

⁷⁵ L'homogénéité est une option permettant de superposer 3 partitions de la population du système : tous les groupements et le réseau d'affinité sociale ont alors la même composition, c'est-à-dire les paysans ayant leur parcelle le long du même irrigateur. Dans ce cas les deux paramètres suivants sont inopérants et valent 5.

Un scénario est alors un ensemble de valeurs affecté à cet ensemble de paramètres. Ces paramètres peuvent être fixés et modifiés *via* l'interface selon les divers éléments présentés à la Figure 29. Ils peuvent aussi être écrits dans des fichiers pour être répétés.

The screenshot displays a software interface for scenario creation, organized into several panels:

- Creation:** A top button for starting the process.
- Hydrologie:** A section with a vertical slider for 'Assèchement' (drying) set to 1.00.
- Règles collectives (Collective Rules):** A detailed panel with sub-sections:
 - Allotissement de l'eau:** 'LibreService' (dropdown).
 - Pompage:** 'demande' (dropdown).
 - Arrêt campagne:** 'maturite' (dropdown).
 - Démarrage campagne:** 'surfaceMini' (dropdown).
 - Accès crédit:** 'individuel' (dropdown).
 - Redevance:** 'forfaitSurface' (dropdown).
 - Gestion Couloir:** 'volume' (input field).
 - Autorisation campagne:** 'individuel' (dropdown).
 - Bilan de campagne:** 'aleatoire' (dropdown).
 - critère:** 'aleatoire' (dropdown).
 - A 'Quitter' button.
- Règles individuelles (Individual Rules):** A panel with sub-sections:
 - objectif:** 'production' (dropdown).
 - critère:** 'endettement' (dropdown).
 - statut:** 'noble' (dropdown).
 - Remboursement:** 'groupes' (dropdown).
 - Prêts:** 'symbolique' (dropdown).
 - Bilan de campagne:** 'meilleur' (dropdown).
 - A 'Quitter' button.
- Interactions:** A panel with sub-sections:
 - structure des groupes:** 'sansChef' (dropdown).
 - Individuel / Collectif:** 'tous' (dropdown).
 - Revenus extérieurs:** 'aucun' (dropdown).
 - Perception des règles:** 'tous toujours' (dropdown).
 - Revenu maximum:** A slider set to 10.
 - A 'Quitter' button.
- Left Sidebar:**
 - Buttons for 'nouvelle campagne' and 'fin de campagne'.
 - 'Cycle' and 'Pas a Pas' options.
 - Input fields for 'cmp: 1' and 'ir: 1'.
 - 'Résultats' dropdown.
 - 'Affichage' and 'complete' buttons.

Dashed lines indicate that the 'Règles collectives', 'Règles individuelles', and 'Interactions' sections are expanded from the sidebar.

Figure 29 : les différents paramètres des scénarios peuvent être choisis depuis l'interface.

Rappelons que pour tout ce qui concerne les règles, un scénario correspond à un choix de conditions initiales qui peuvent évoluer au cours de la simulation. Ne sont fixés que les paramètres relatifs à la structure (nombre de groupes, assèchement, taille des irrigateurs), les éléments stratégiques du comportement des agents (critère d'évaluation, objectif) ainsi que le statut social, la structure des groupes (avec ou sans chef et éventuellement comment celui-ci est choisi) et la destination de revenus extérieurs ainsi que la limite de leur montant. Le choix de fixer certains paramètres de comportement des paysans et de structure des groupes revient à faire l'hypothèse qu'ils ne sont pas modifiés sous l'effet de la dynamique interne du système. Un paysan ne changera son objectif que si des éléments extérieurs l'y incitent : changement brusque du prix du riz, émigration d'un fils... Faute d'informations sur la réponse à de tels changements extérieurs, il a été préféré de fixer ces paramètres. Par contre il est tout à fait possible à l'utilisateur d'interrompre une simulation, de modifier les objectifs des paysans par exemple et de poursuivre la simulation.

Le scénario choisi, il faut se donner des outils d'observation de la simulation lui correspondant. C'est pourquoi le modèle prévoit plusieurs indicateurs relatifs à la viabilité du système ou supposés avoir un effet sur cette viabilité :

nombre de parcelles en situation de stress hydrique par jour.

nombre de parcelles en cours de culture par jour.

nombre de parcelles cultivées par campagne et par objectif des paysans.

nombre de parcelles cultivées par campagne et par variété.

nombre de paysans satisfaits par campagne.

nombre de paysans à jour du paiement de leurs redevances par campagne.

nombre de communications et thème de ces communications par jour et par campagne.

nombre d'agents effectuant un changement de règles par campagne et évolution des populations de règles individuelles.

consommation d'eau totale et à l'hectare cultivé par campagne.

somme des cagnottes des paysans par campagne et variance des cagnottes au sein de la population par campagne exprimées en sac de riz.

nombre d'événements par campagne où le "principe de solidarité" n'a pas pu être respecté.

La modélisation du "principe de solidarité" mentionné ci-dessus consiste en la règle suivante : si un paysan a sa cagnotte négative ou nulle et s'il n'a pas fait la campagne précédente, sauf à la première campagne, il va demander à un autre paysan de son réseau d'affinité sociale et de statut plus élevé ou égal au sien de prendre en charge sa dépense quotidienne. Celui-ci accepte sauf si sa propre cagnotte est elle-même négative.

Tous ces paramètres ne sont pas directement des indicateurs de la viabilité d'un système irrigué. Etant donnée la définition retenue de la viabilité, seul le nombre de parcelles cultivées en est un direct. Les autres indicateurs permettent de tester des hypothèses de travail sur la viabilité des systèmes irrigués tels que le paiement de la redevance ou le lien individuel / collectif à travers l'évolution des populations de règles et le suivi des communications. Ils permettent également de tester si le comportement simulé du système est compatible avec des informations issues des systèmes observés⁷⁶ comme la consommation d'eau ou encore d'évaluer la valeur de paramètres pour lesquels on peut supposer une influence sur la viabilité mais qui n'est pas prise en compte dans le modèle comme c'est le cas du respect du "principe de solidarité". Dans tous les cas, ces indicateurs

⁷⁶ Ceci ne veut pas dire qu'une simulation dont un des paramètres observés serait apparemment "irréaliste" conduise à rejeter d'emblée le modèle mais pose de nouvelles questions et éventuellement peut conduire à modifier le modèle.

ne peuvent être lus que de manière comparative : évolution dans le temps pour un scénario donné, comparaison de scénarios différents.

Pratiquement SHADOC est écrit en langage *SmallTalk* avec l'environnement de programmation VisualWorks®. A titre d'exemples, le code informatique de quelques méthodes est présenté en annexe 6⁷⁷. Les temps de simulation restent raisonnables : pour un scénario toujours viable au format exposé ci-dessus, une simulation dure moins d'une heure et crée un fichier d'environ 100 Ko avec un processeur Pentium® de première génération avec 24 Mo de RAM.

Tel qu'il est décrit le modèle reste très évolutif, ce qui correspond bien à la démarche de modélisation d'accompagnement exposée au début de ce chapitre. L'évolution la plus simple est une modification de la liste de modalités pour une règle donnée, ajout ou retrait. La modification des types de règles prises en compte tout comme l'ajout d'indicateurs d'observation des simulations sont possibles mais exigent un travail un peu plus important.

⁷⁷ Pour le lecteur intéressé, la totalité du code est également disponible sur demande.

3.3 Vers quelles simulations

La troisième étape de la démarche proposée concerne les simulations. Il s'agit de proposer un plan d'expériences et de le mener à bien afin de renvoyer aux connaissances sur le terrain ou aux hypothèses de modélisation. Un premier aperçu d'un tel plan d'expériences et des simulations qui en découlent ont été présentés au § 3.1.1 pour la première version du modèle. Nous allons maintenant présenter le plan d'expériences mené à bien pour SHADOC, tel qu'il a été présenté au § 3.2. Les résultats des simulations correspondantes seront l'objet du chapitre suivant.

Dans son état actuel, SHADOC a de nombreuses possibilités aussi bien pour les choix de paramètres que pour les observations qui en découlent. Il s'agit tout d'abord d'avoir une première estimation du comportement d'ensemble du modèle puis de décrire quelques usages particuliers qui ont été menés à bien.

3.3.1 Des scénarios aléatoires

Classiquement, une démarche de modélisation comporte au sein de la phase de "vérification, validation" une opération d'analyse de sensibilité du modèle aux variations des paramètres introduits (Coquillard et Hill, 1997). Il s'agit de tester l'influence des variations des différents paramètres, indépendantes et simultanées, sur les résultats des simulations. Or, le modèle SHADOC est caractérisé par un grand nombre de paramètres la plupart indépendants (jusqu'à 105 selon le scénario⁷⁸) et partiellement qualitatifs entrant dans la description d'un scénario. Une analyse de sensibilité classique n'est pas possible. Il reste cependant à comparer la variabilité des résultats entre différents scénarios, que l'on nommera par la suite variabilité inter-scénario : dans quelle mesure peut-on à la vue d'observations simulées dire que deux scénarios sont différents ?

Pour cela une autre caractéristique de SHADOC est à prendre en compte : de nombreux tirages aléatoires sont utilisés dans les différents processus aussi bien au cours d'une simulation que lors de la phase d'initialisation quand les parcelles et les règles sont affectées aux paysans en suivant les proportions définies par les paramètres du scénario. Il s'agit alors d'observer aussi quelle est la variabilité des observations simulées en répétant plusieurs fois le même scénario. Il s'agit de la détermination de la variabilité stochastique

⁷⁸ Pour certains paramètres, le choix de valeurs implique l'utilisation d'autres paramètres pour lesquels il y a alors un autre choix possible. Par exemple, si le paramètre relatif à l'existence de revenus extérieurs vaut #aucun, il n'est pas utile de spécifier la valeur du montant maximal des revenus extérieurs.

interne du modèle (Hill, 1993) que l'on appellera par la suite variabilité intra-scénario. Elle doit être comparée à la variabilité inter-scénario pour répondre à la question sur la possibilité de distinguer deux scénarios à partir des résultats des simulations.

Pour répondre à cette question, les méthodes usuelles d'échantillonnage des scénarios possibles sont basées sur des plans factoriels (Law et Kelton, 1991 ; Kleijnen et van Groenendaal, 1992). Même celles utilisées dans le cas de modèles complexes comme en médecine (Blower et Dowlatabi, 1994) se sont révélées inadaptées vu la taille de l'espace des paramètres et l'absence de relation d'ordre *a priori* sur l'espace des observations simulées. Il s'agit d'une exploration du comportement du modèle, aucune hiérarchisation préalable des paramètres n'est possible. C'est pourquoi nous avons finalement choisi de constituer cent scénarios au hasard parmi l'ensemble des scénarios possibles et de comparer les simulations obtenues. Chaque paramètre est tiré au hasard parmi l'ensemble des paramètres possibles. Etant donné la durée d'une simulation et la taille des fichiers de sortie, le nombre de répétitions par scénario a été limité dans un premier temps à 20.

Cette comparaison des variabilités intra et inter-scénario se fera dans un premier temps sur l'évolution de l'intensité culturale au cours d'une simulation et les indicateurs synthétiques lui étant associés, à savoir le nombre de campagnes menées à bien et le nombre total de parcelles cultivées sur la durée de la simulation. Ces observations sont en effet les plus proches de la définition de la viabilité proposée : le nombre de campagnes donne une idée de la durée de vie de la simulation, le nombre de parcelles cultivées renseignent sur le niveau d'utilisation réel du système irrigué et l'évolution de l'intensité culturale de la dynamique de l'évolution. L'objectif de ces comparaisons est de pouvoir définir une partition en classes de viabilité pour les scénarios aléatoires simulés.

Ce qui précède concerne une utilisation de ces 100 scénarios aléatoires dans un objectif de compréhension du fonctionnement du modèle lui même. Ces simulations peuvent aussi être étudiées pour travailler sur le modèle conceptuel de départ et commencer à reformuler notre compréhension du terrain et des pratiques d'aménagement et de réhabilitation de systèmes irrigués. Il s'agit dans un premier temps d'étudier pour ces 100 scénarios si, compte tenu de la variabilité intra-scénario, certaines régions de l'espace des paramètres sont en correspondance avec une classe de viabilité particulière.

3.3.2 Un outil de recherche sur les systèmes irrigués

Au cours de sa construction même, SHADOC a été utilisé comme un outil de recherche : des versions préalables ont été utilisées pour orienter de nouveaux passages sur le terrain dans un processus de modélisation d'accompagnement.

Mais son usage en tant qu'outil de recherche ne s'arrête pas à sa construction : le modèle présenté au § 3.2 est lui-même une étape dans le processus de modélisation d'accompagnement vers un accroissement des connaissances sur la viabilité des systèmes irrigués. Un des objectifs de cette modélisation est de mieux comprendre les relations entre modes de coordination entre paysans et viabilité des systèmes irrigués, ce qui implique de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes irrigués. Après l'étude d'ensemble au moyen des 100 scénarios aléatoires, il s'agit de s'intéresser plus précisément à l'effet de quelques paramètres particuliers. A partir de scénarios choisis au sein du jeu initial, nous allons tester les effets de modifications de quelques paramètres sur les résultats des simulations afin d'observer la sensibilité à ces paramètres dans divers contextes. Vu le nombre important des paramètres *a priori* pris en compte, de nombreux tests sont possibles. C'est pourquoi la conception de ces tests s'appuie sur des questions particulières posées au modèle, pour éventuellement ensuite renvoyer à de nouvelles questions au terrain. Pour un paramètre donné les modifications testées chercheront à couvrir une partie importante de son domaine de variation.

Les simulations décrites précédemment participent déjà à ce travail et peuvent amener à poser quelques questions donnant lieu à des simulations. Cependant l'hypothèse faite sur l'importance des processus d'apprentissage pour la viabilité des systèmes irrigués au deuxième chapitre et dans la constitution du modèle, nous amène à chercher des scénarios correspondant aux questions suivantes :

Quel est l'effet des différents réseaux sociaux en œuvre sur la viabilité des systèmes irrigués via les mécanismes d'apprentissage individuel, c'est-à-dire au travers des règles de changement de règles des paysans ?

Quel est l'effet des différents réseaux sociaux en œuvre sur la viabilité des systèmes irrigués via les mécanismes d'apprentissage collectif, c'est-à-dire au travers des règles de changement de règles des groupes ?

Quel est l'effet des différents réseaux sociaux en œuvre sur la viabilité des systèmes irrigués via les modes d'évaluation individuelle du déroulement ou du résultat des campagnes par les paysans, c'est-à-dire au travers des critères d'évaluation des paysans ?

Quel est l'effet des différents réseaux sociaux en œuvre sur la viabilité des systèmes irrigués via les modes d'évaluation collective du déroulement ou du résultat des campagnes par les groupes, c'est-à-dire au travers des critères d'évaluation des groupes ?

L'enjeu de ces questions est double : vérifier l'importance accordée aux processus d'apprentissage dans notre représentation du système irrigué d'une part, observer l'effet de la stabilité des pratiques d'un niveau d'organisation pour l'autre niveau d'organisation.

Outre une meilleure connaissance de la viabilité des systèmes irrigués, les résultats des simulations orientées par les questions précédentes présentés au chapitre suivant sont aussi l'occasion de développer quelques exemples d'utilisation du modèle sur des cas particuliers. Le modèle pourrait donner lieu de la même manière à d'autres simulations exploratoires correspondant à d'autres questions particulières.

Avant de traiter de ces questions, puisque sur une version antérieure du modèle l'effet des réseaux d'affinité sociale sur la viabilité du système irrigué avait été mis en évidence et avait conduit à de nouvelles études sur le terrain, il s'agit de se poser cette même question sur cette nouvelle version du modèle qui est supposée mieux la prendre en compte.

En fait toutes ces questions, après l'observation d'ensemble précédente au travers des 100 scénarios aléatoires, reviennent à déplacer une loupe pour observer localement dans l'espace des paramètres le comportement du modèle. Après avoir décrit l'objectif de ces grossissements, il faut maintenant préciser où doit être mise la loupe, c'est-à-dire quels sont les scénarios observés.

3.3.3 Plan d'expérience en résultant

Le plan d'expérience est constitué de deux parties. Une première concerne les 100 scénarios aléatoires initiaux. Ceux-ci sont décrits de manière extensive, de même que tous

les scénarios simulés, dans l'annexe 8. Cette première partie pourra aussi concerner éventuellement quelques scénarios complémentaires testés suite aux résultats des simulations de ces scénarios aléatoires.

La deuxième partie concerne d'abord le choix de 5 scénarios représentatifs de la diversité des 100 scénarios précédents. Ensuite, pour chacune des questions précédentes, une vingtaine de modifications relatives à la question posée sont faites sur chacun des 5 scénarios de manière identique. Pour chacune de ces questions il s'agit de tester si une modification des paramètres lui correspondant dans le contexte d'un scénario donné modifie de manière sensible la viabilité de ce scénario.

effet des réseaux d'affinité sociale

L'effet des réseaux d'affinité sociale sera observé *via* les paramètres d'homogénéité de la constitution des groupes, du nombre de réseaux d'affinité sociale et des ensembles d'imitation utilisés par les règles de changement de règle. Ces paramètres représentent les possibilités de variation des scénarios au niveau de la structure de ces réseaux d'affinité sociale et de leur lien avec l'aménagement ainsi qu'un des processus où les réseaux d'affinité sociale interviennent directement. Le paramètre d'homogénéité permet de représenter des systèmes irrigués pour lesquels les différents groupements sont constitués en fonction de réseaux sociaux préexistant et le nombre de réseaux d'affinité permet de faire varier la taille de ces lieux de coordination. Le processus dans lequel interviennent les réseaux d'affinité sociale qui est retenu est le processus d'apprentissage individuel car on a fait l'hypothèse de l'importance de ce processus dans la dynamique du système irrigué. Il s'agit en fait de traiter la question de ***l'effet d'une modification de la structure des réseaux d'affinité sociale et d'une de leur utilisation sur la viabilité de quelques scénarios.***

Les modifications apportées aux scénarios retenus sont résumées dans le Tableau 8.

homogénéité	nombre de réseaux d'affinité sociale	population d'ensemble d'imitation
true	5	v1, v2, v5, v6
false	1, 3, 5	v1, v2, v3, v4, v5

Tableau 8 : modifications des paramètres pour tester l'effet des réseaux d'affinité sociale sur la viabilité

Dans ce tableau, les populations d'ensembles d'imitation sont décrites par des vecteurs à quatre composantes $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$, avec :

α : le pourcentage de paysans dont l'ensemble d'imitation est le réseau d'affinité sociale.

β : le pourcentage de paysans dont l'ensemble d'imitation est l'intersection du réseau d'affinité sociale avec le groupe d'allocation de l'eau.

γ : le pourcentage de paysans dont l'ensemble d'imitation est l'intersection du réseau d'affinité sociale avec le groupe d'accès au crédit.

δ : le pourcentage de paysans dont l'ensemble d'imitation est l'intersection du réseau d'affinité sociale avec le groupe d'allocation de l'eau et le groupe d'accès au crédit.

Les valeurs retenues pour les populations d'ensemble de simulation des scénarios du Tableau 8 sont les suivantes :

$$v1 = (100, 0, 0, 0)$$

$$v2 = (0, 100, 0, 0)$$

$$v3 = (0, 0, 100, 0)$$

$$v4 = (0, 0, 0, 100)$$

$$v5 = (25, 25, 25, 25)$$

$$v6 = (50, 50, 0, 0)$$

Les valeurs retenues représentent des populations de paysans ayant tous le même ensemble d'imitation ou équitablement réparties en fonction des diverses possibilités. L'objectif de cet ensemble de scénarios est plutôt de s'intéresser à l'effet de l'homogénéité et du nombre de réseaux d'affinité sociale, les différentes valeurs de population d'ensembles d'imitation permettent d'accroître le nombre de contextes dans lesquels sont testés les effets des modifications des scénarios. Remarquons que pour une homogénéité valant "true", le nombre de réseaux d'affinité sociale est nécessairement 5 puisque le périmètre représenté a 5 irrigateurs et qu'il y a donc nécessairement 5 groupements dont l'objectif est la répartition de l'eau entre les paysans le long d'un irrigateur. Remarquons aussi que les trois dernières composantes des vecteurs décrivant les ensembles de simulation sont équivalentes puisque les réseaux sociaux, les groupes d'accès au crédit et les groupes d'allocation de l'eau sont dans ce cas superposés.

effet de l'apprentissage individuel

L'effet de l'apprentissage individuel est vu pour chaque paysan *via* la modalité de sa règle de changement de règles et une nouvelle fois de son ensemble d'imitation. C'est-à-dire, si l'on ne tient pas compte du paramètre critère d'évaluation qui correspond à une autre question traitée plus loin, les deux paramètres intervenant directement dans le processus de

changement de règle. Il s'agit dans cette série de modifications de traiter de ***l'effet d'un changement dans les processus de changements de règles des paysans sur la viabilité de quelques scénarios.***

Les modifications apportées aux scénarios retenus sont résumées dans le Tableau 9.

population de règles de bilan individuel	population d'ensembles d'imitation
(100 0 0 0)	sans objet
(0 100 0 0)	(100 0 0 0), (0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 0 0 100)
(0 0 100 0)	(100 0 0 0), (0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 0 0 100)
(0 0 0 100)	(100 0 0 0), (0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 0 0 100)
(25 25 25 25)	(100 0 0 0), (0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 0 0 100)
(70 10 10 10)	(100 0 0 0), (0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 0 0 100)

Tableau 9 : modifications des paramètres pour la question de l'apprentissage individuel

Dans ce tableau, les populations de règles de bilan individuel sont décrites par un vecteur à quatre composantes, $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$, avec :

α : le pourcentage de paysans dont la modalité de la règle de bilan individuel est #idem.

β : le pourcentage de paysans dont la modalité de la règle de bilan individuel est #meilleur.

γ : le pourcentage de paysans dont la modalité de la règle de bilan individuel est #proximité.

δ : le pourcentage de paysans dont la modalité de la règle de bilan individuel est #retour.

Les vecteurs correspondant aux populations d'ensembles d'imitation sont du même type qu'au tableau précédent et représentent des cas extrêmes de population de paysans homogène de ce point de vue. Les populations de règles de bilan individuel reprennent également les cas de population homogène selon chacune des quatre modalités de règles de changement de règles possibles. A celles-ci s'ajoutent un cas avec une proportion égale de paysans pour chacune des modalités et un cas où une minorité de paysans pratiquent un changement de règle. L'hypothèse sous-jacente à ce dernier cas est qu'une minorité de paysans pratiquant des changements de règles suffit à assurer une évolution aux règles mises en œuvre par l'ensemble des paysans.

effet de l'apprentissage collectif

L'effet de l'apprentissage collectif est vu essentiellement *via* la règle de changement de règles des groupes, c'est-à-dire, si l'on ne tient pas compte du paramètre critère d'évaluation qui correspond à une autre question traitée plus loin, le seul paramètre intervenant directement dans le processus de changement de règles des groupes. Cet apprentissage

collectif est aussi étudié avec l'hypothèse d'un blocage de la règle de changement de règle individuelle étudiée précédemment : est-ce que le changement du contexte concernant un niveau d'organisation change l'effet de l'apprentissage pour un autre niveau d'organisation ? Il s'agit dans cette série de modifications de traiter de ***l'effet d'un changement dans les processus de changements de règles des groupes sur la viabilité de quelques scénarios.***

Les modifications apportées aux scénarios retenus sont résumées dans le Tableau 10 ci-dessous.

modalité de changement de règle des groupes #eau	modalité de changement de règle du groupe #pompage	modalité de changement de règle des groupes #crédit	population de règles de bilan individuel
idem	idem	idem	(100 0 0 0)
meilleur	meilleur	meilleur	(100 0 0 0)
proximité	proximité	proximité	(100 0 0 0)
idem, meilleur, prox	idem, meilleur, prox	idem, meilleur, prox	initial

Tableau 10 : modifications des paramètres pour la question de l'apprentissage collectif

La dernière ligne du tableau correspond à une permutation des différentes valeurs des trois premières colonnes. Tous les groupes ayant le même attribut #raison ont la même modalité de règle de changement de règle. Le terme initial signifie que la population de règles de bilan individuel du scénario initial est reprise.

effet de l'évaluation individuelle

L'effet de l'évaluation individuelle du déroulement des campagnes est vu *via* les populations de critères des paysans en relation avec quelques populations possibles de règles de changement de règles, en se limitant à celles pour lesquelles tous les paysans peuvent pratiquer le cas échéant un changement de règles. Il s'agit dans cette série de modifications de traiter de ***l'effet d'un changement dans les critères d'évaluation des paysans du déroulement d'une campagne sur la viabilité de quelques scénarios.***

Les modifications apportées aux scénarios retenus sont résumées dans le Tableau 11 ci-dessous.

population de critères individuels	population de règles de bilan individuel
(100 0 0 0 0)	(0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 50 50 0)
(0 100 0 0 0)	(0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 50 50 0)
(0 0 100 0 0)	(0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 50 50 0)
(0 0 0 100 0)	(0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 50 50 0)
(0 0 0 0 100)	(0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 50 50 0)
(20 20 20 20 20)	(0 100 0 0), (0 0 100 0), (0 50 50 0)

Tableau 11 : modifications des paramètres pour la question de l'évaluation individuelle

Les vecteurs de population de règles de bilan individuel sont décrites par le même type de vecteur que précédemment. Les populations de critères individuels de satisfaction sont décrites par des vecteurs à cinq composantes, $(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta)$, avec :

α : le pourcentage de paysans dont le critère de satisfaction est # production.

β : le pourcentage de paysans dont le critère de satisfaction est #dateDemarrage.

γ : le pourcentage de paysans dont le critère de satisfaction est #dateRecolte.

δ : le pourcentage de paysans dont le critère de satisfaction est #cagnotte.

η : le pourcentage de paysans dont le critère de satisfaction est #endettement

La grande dimension de l'espace des populations de critères individuels a impliqué de ne retenir que les cas extrêmes : tous les paysans ayant le même critère ou répartition équivalente du nombre de paysans pour chacun de ces critères.

effet de l'évaluation collective

L'effet de l'évaluation collective du déroulement des campagnes enfin est vu *via* les critères d'évaluation des groupes en relation avec quelques types de règles de changement de règles de ces mêmes groupes. Il s'agit dans cette série de modifications de traiter de ***l'effet d'un changement dans les critères d'évaluation des groupes du déroulement d'une campagne sur la viabilité de quelques scénarios.***

Les modifications apportées aux scénarios retenus sont résumées dans le Tableau 12 ci-dessous.

critères d'évaluation des groupes	règles de bilan des groupes
(production, production, production)	initial, meilleur, proximité
(dateDémarrage, consommation, dateDémarrage)	initial, meilleur, proximité
(consommation, endettement, endettement)	initial, meilleur, proximité
(intensitéCulturale, intensitéCulturale, intensitéCulturale)	initial, meilleur, proximité
(membres, membres, membres)	initial, meilleur, proximité

Tableau 12 : modifications des paramètres pour la question de l'évaluation collective

Les vecteurs de la première colonne correspondent successivement aux groupes dont l'attribut raison vaut #eau, aux groupes dont l'attribut raison vaut #pompage et aux groupes dont l'attribut raison vaut #crédit. Dans la deuxième colonne, hormis l'usage du paramètre du scénario initial, tous les groupes ont la même modalité de règle de changement de règles.

L'ensemble {connaissance du terrain, modèle, plan d'expérience} ainsi développé à partir du cas de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal correspond à une étape dans le processus de modélisation d'accompagnement décrit au début de ce chapitre. La réalisation des simulations du plan d'expérience doit maintenant mener à une réévaluation de cet ensemble : les résultats des simulations pourront soit renvoyer à de nouvelles questions sur le terrain pour améliorer sa compréhension, soit renvoyer au modèle et à ses hypothèses ou encore orienter vers de nouvelles simulations sur des aspects particuliers des scénarios. Il s'agit dans un premier temps de décrire les résultats des simulations résultant du plan d'expérience décrit ci-dessus.

4. Quelques expériences de simulations

Le plan d'expérience précédent a donné lieu à de nombreuses simulations sur le modèle SHADOC, tel qu'il a été présenté au § 3.2. En voici les principales observations pour les scénarios aléatoires tout d'abord, pour l'étude de la cohérence avec les versions antérieures ensuite et enfin pour les nouvelles questions posées au modèle. Ces observations sont données sous la forme d'une description des résultats des simulations, leur interprétation, à la lumière du terrain notamment, se fera dans le chapitre suivant.

Dans un premier temps, cette description présente une vue d'ensemble des résultats des simulations obtenue à partir des 100 scénarios aléatoires et des différents indicateurs observables sur les simulations. On s'intéresse ensuite aux simulations correspondant aux questions particulières relatives à l'importance des réseaux sociaux puis aux processus d'apprentissage.

4.1 Une vue d'ensemble

Cette vue d'ensemble commence par une description qualitative des différentes évolutions de simulations observées. Il s'agit essentiellement de faire connaissance avec SHADOC autrement que par la description qui en a été faite au chapitre précédent, en le faisant travailler et en observant comment il réagit aux diverses demandes que l'on peut lui faire. On s'intéresse ensuite plus spécifiquement à la variabilité des résultats des simulations d'un scénario à l'autre et entre les simulations d'un même scénario, afin de répondre à la question de la possibilité de réaliser une partition de la population de 100 scénarios en fonction de leur viabilité. Cette partition est ensuite comparée aux différentes valeurs prises par les paramètres des scénarios.

4.1.1 Description "naturaliste" des observations simulées

Cette description naturaliste, qui commence par une première définition qualitative d'une simulation viable, s'intéresse successivement à l'évolution et à la variabilité de plusieurs indicateurs d'une simulation pour différents scénarios : intensité culturelle, cagnottes des paysans, consommation de gasoil, communications entre les paysans. Elle finit par quelques observations de comportements du système en cours de simulation.

définition d'une simulation viable

Les 100 scénarios aléatoires retenus, associés à la gamme des indicateurs observés conduisent à de nombreuses observations. Celles associées aux niveaux d'intensité culturelle, observées dans un premier temps sur l'ensemble de la population des paysans

quel que soit leur objectif, montrent pour la majorité des scénarios une première phase durant 5 campagnes environ au cours desquelles de nombreuses simulations s'arrêtent, les autres simulations dépassant nettement ce seuil, comme sur l'exemple de la Figure 30. On qualifiera dans la suite de *viable* les simulations dépassant nettement ce seuil sans s'arrêter. Il s'agit là d'une première définition qualitative de la viabilité d'une simulation que l'on précisera quand on cherchera à définir la viabilité d'un scénario.

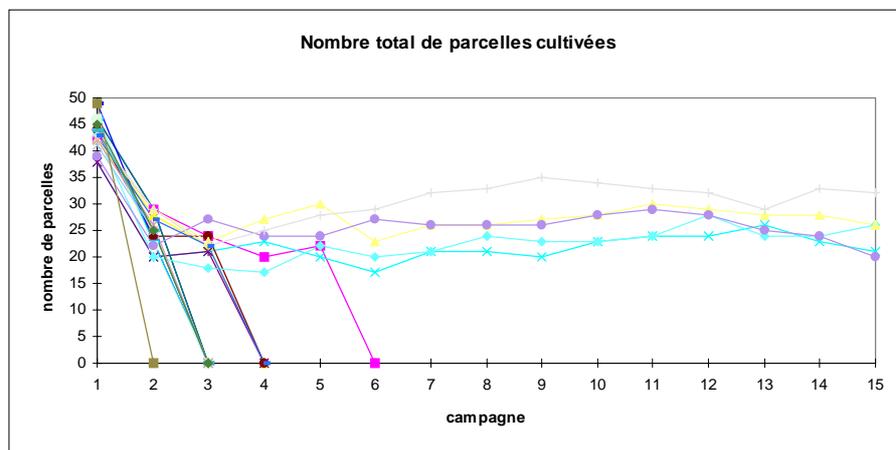


Figure 30 : simulation de l'intensité culturale avec quelques trajectoires viables. [Has23]

variabilité des scénarios en fonction de l'intensité culturale

Pour certains scénarios, ce sont toutes les simulations qui ne dépassent pas ce seuil d'environ 5 campagnes. Certaines simulations dépassent ce seuil avec un niveau très faible d'intensité culturale et ne doivent en fait pas être distinguées de celles qui s'arrêtent dès le début : dans la pratique de tels événements n'existent pas. Il s'agit d'un artefact associé à la modalité #dateLimite de la règle de démarrage de la campagne et au choix de règles selon des modalités pures et non mixtes comme le plus souvent pratiqué. Par exemple une règle réellement mise en œuvre pour le démarrage d'une campagne pourrait être du type "on commence au plus tard au 15 juillet à condition que au moins un quart des parcelles soient déjà prêtes à être irriguées".

En ce qui concerne les scénarios pour lesquels il existe des simulations dépassant ces seuils de nombre de campagnes enchaînées et de nombre de parcelles mises en culture, il existe des variations entre les scénarios du point de vue de l'évolution des niveaux d'intensité culturale. Ces variations concernent non seulement la proportion de simulations viables, mais aussi l'évolution du niveau d'intensité culturale au-delà de ce seuil et la variabilité entre ces simulations, aussi bien en nombre de campagnes enchaînées qu'en taux de mise en culture. Les proportions observées de simulations viables parmi les 20 répétitions couvrent en fait l'éventail des possibles : depuis les scénarios dont une seule

simulation est viable jusqu'à ceux dont toutes les simulations sont viables comme le montrent les deux exemples de la Figure 31.

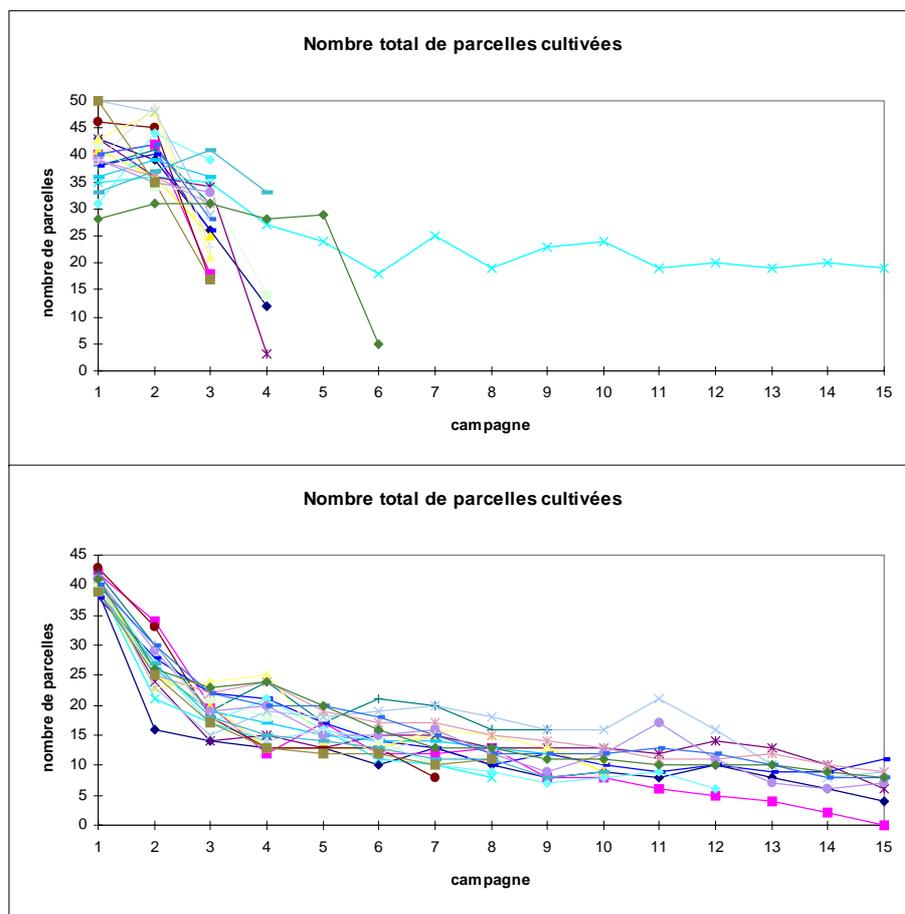


Figure 31 : deux cas extrêmes de scénarios comportant des simulations viables. [Has44 et Has43]

Quand plusieurs simulations sont viables, il n'y a pas toujours l'homogénéité observée sur le deuxième exemple de la figure ci-dessus. Il peut exister une variabilité importante entre les évolutions simulées, c'est le cas pour le premier exemple de la Figure 32. Cette variabilité entre les évolutions simulées peut concerner le niveau d'intensité culturelle atteint par les simulations viables ou la forme des évolutions des intensités culturelles. Le deuxième exemple de la Figure 32 montre ainsi pour un scénario donné des trajectoires toutes stables du point de vue de l'intensité culturelle, mais à des niveaux différents, pouvant correspondre à différents modes de fonctionnement viable du système irrigué simulé. La forme des évolutions de l'intensité culturelle des simulations viables varie d'un scénario à un autre : des simulations à intensité culturelle stable à celles décroissantes de manière régulière ou fortes au début et lentes ensuite en passant parfois par des comportements oscillatoires comme dans le troisième exemple de la Figure 32.

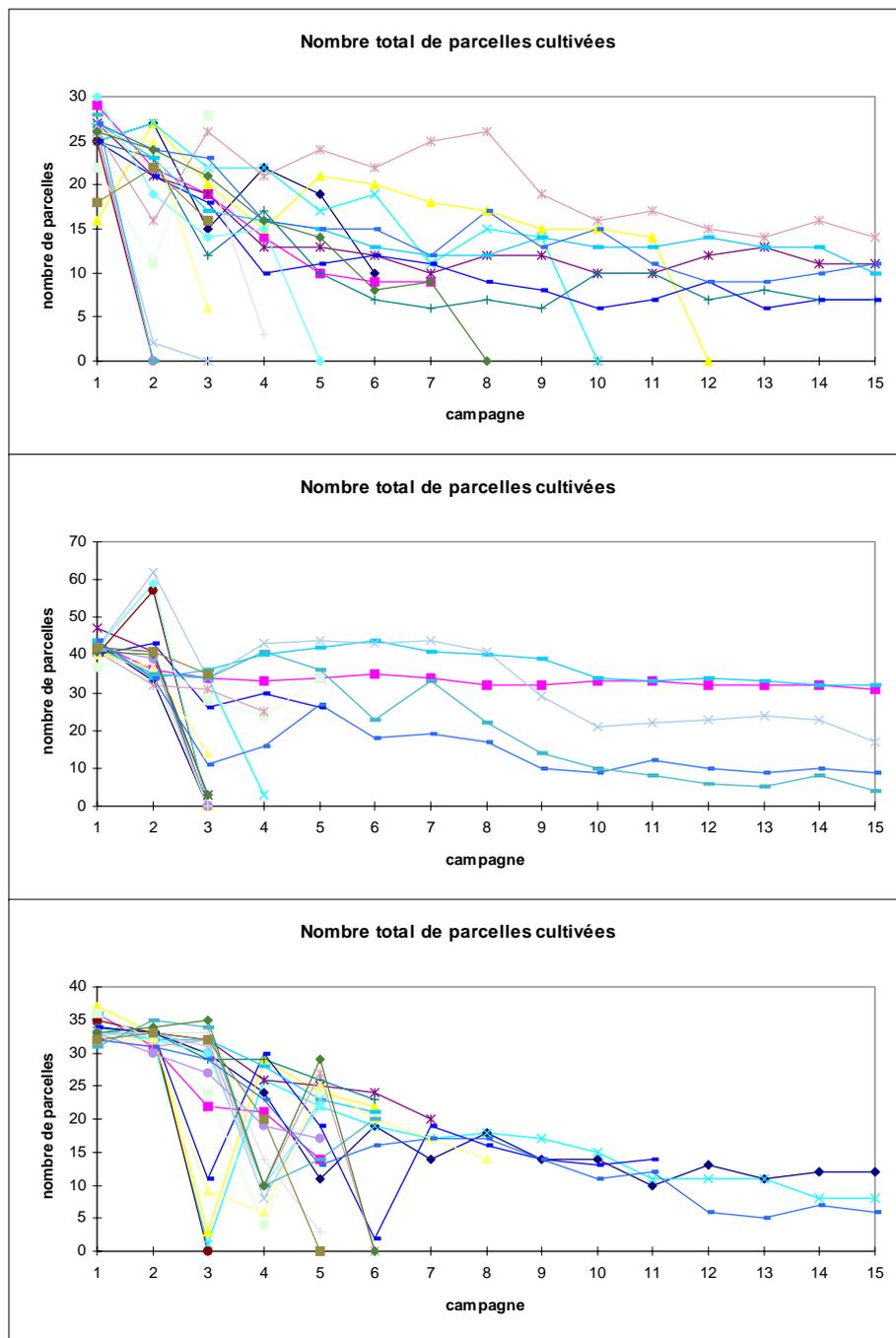


Figure 32 : variabilité des scénarios avec simulations viables. [Has64, Has35, Has62]

Ces premières observations indiquent que, pour un même scénario, plusieurs sentiers d'évolution simulée viable peuvent exister. Par exemple un périmètre donné pourra évoluer vers un fonctionnement où, à toutes les campagnes 60 % des parcelles sont mises en culture ou bien vers une alternance de campagnes où presque toutes les parcelles sont mises en culture et de campagnes où seulement une faible proportion des parcelles sont mises en culture. Ceci soulève de nouvelles questions : si un seul type de chemin est observé, cela veut-il dire qu'il n'en existe pas d'autres ou que tous les chemins existant sont

identiques du point de vue de l'intensité culturelle ? Les sentiers d'évolution de deux simulations prenant un même chemin du point de vue de l'intensité culturelle sont-ils identiques du point de vue d'un autre indicateur ?

variabilité des scénarios en fonction des objectifs des paysans.

Les niveaux d'intensité culturelle peuvent aussi être observés en fonction des objectifs des paysans : #nourriture, #production, #foncier ou #fauteDeMieux. La variabilité des objectifs des paysans se retrouve-t-elle dans la sous-population de ceux qui mettent en culture ou y a-t-il spécialisation dans l'agriculture des paysans ayant un objectif donné ? Cette question revient à tester l'hypothèse de l'existence de "bons" objectifs dépendant du contexte du scénario, si l'on considère comme "bon" l'objectif d'un paysan qui réussit à enchaîner un grand nombre de campagnes. On pourrait imaginer par exemple que dans un contexte particulier de règles collectives les paysans ayant un objectif #foncier soient plus satisfaits du déroulement d'une campagne et soient quasiment les seuls à continuer à mettre en culture leur parcelle au bout d'un certain nombre de campagnes. Si cette hypothèse était vraie, on devrait observer une homogénéisation des paysans mettant en culture en fonction de leur objectif, seuls les paysans ayant un "bon" objectif continuerait à mettre en culture. Peu de cas présentent une telle évolution, soit que les différentes modalités d'objectifs présentes au départ évoluent à l'image de la population dans son ensemble, soit que les variabilités sur l'intensité culturelle propres à un objectif se compensent les unes les autres.

variabilité des scénarios en fonction de l'évolution des cagnottes

Tel qu'il a été conçu, SHADOC représente un lieu de circulation d'eau et de crédit. Outre l'usage de l'eau vu au travers de l'intensité culturelle, le déroulement des simulations s'exprime aussi *via* l'évolution des cagnottes des paysans. L'observation des valeurs simulées de celles-ci et de leur variance au sein de la population du système irrigué peut donner des indications sur la variabilité des effets possibles de l'arrivée de l'irrigation du point de vue de la richesse détenue par la population du système irrigué. Le schéma général est une augmentation à la fois de la somme et de la variance des richesses suivie dans certains cas d'une diminution de la somme des richesses commençant plus ou moins tôt avec une poursuite de l'augmentation des variances, tel que représenté sur la Figure 33. Ce schéma le plus souvent rencontré connaît diverses exceptions : la croissance de la somme des richesses peut être continue, il peut y avoir décroissance de la variance en fin de simulation et même parfois décroissance continue de la somme des attributs #cagnotte pour certaines simulations viables.

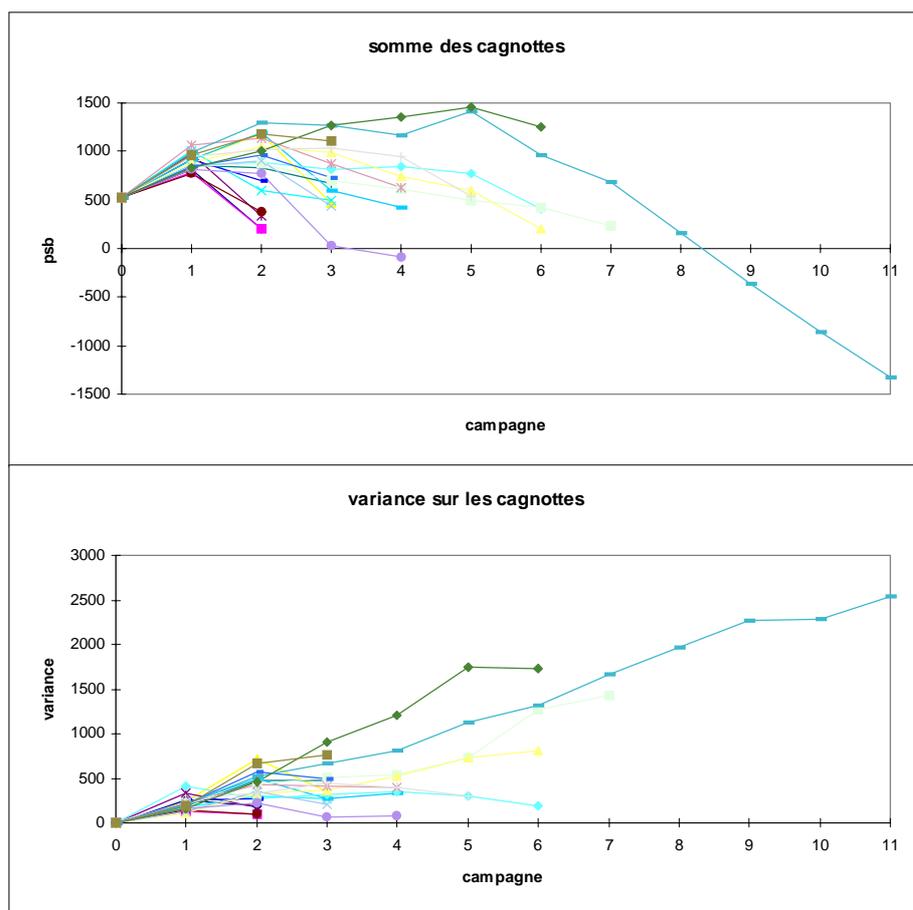


Figure 33 : schéma général de l'évolution simulée de la somme et de la variance des attributs #cagnotte des paysans. [has56] Le terme "psb" pour "produit systémique brut" correspond à la somme des attributs #cagnotte des paysans.

La variabilité intra est fréquemment importante tant pour la somme des cagnottes que pour la variance et peut même être très forte pour cette dernière. Cette variabilité intra concerne essentiellement l'ampleur des tendances observées, elles-mêmes généralement invariantes pour toutes les simulations d'un même scénario. Dans quelques cas cependant apparaissent des ruptures nettes sur quelques simulations de certains scénarios qui ne peuvent être *a priori* reliées à des observations particulières sur les niveaux d'intensité culturelle. La Figure 34 ci-dessous montre à partir d'un scénario ces différents cas de variabilité intra.

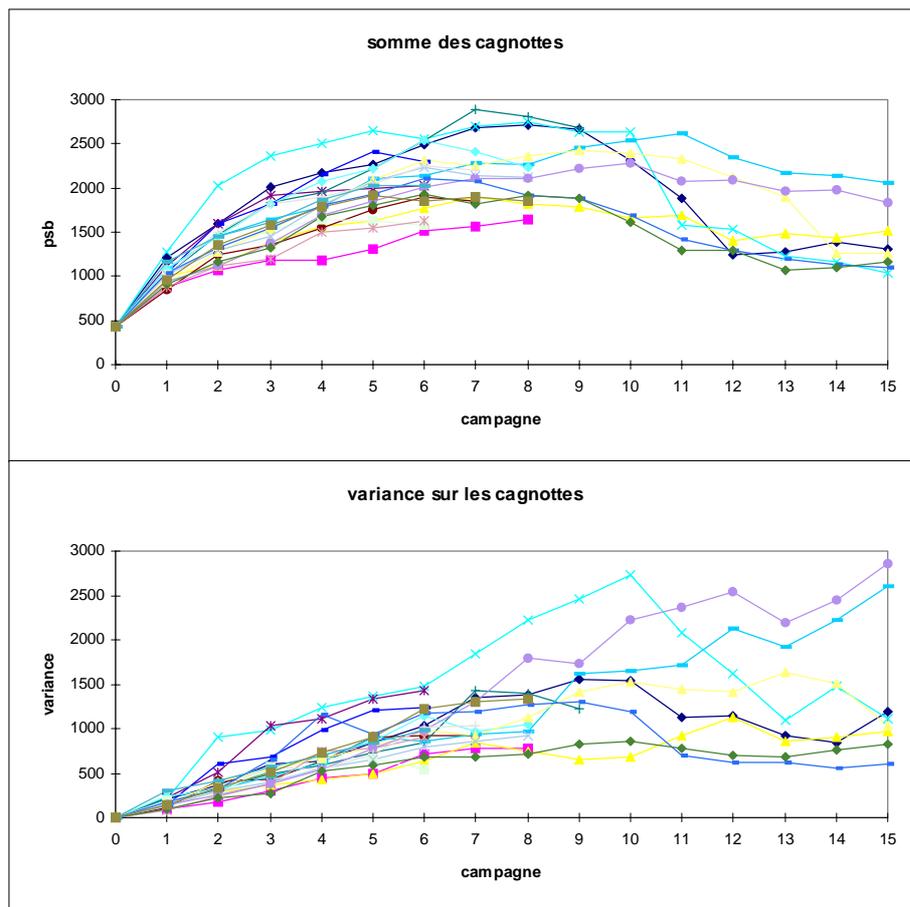


Figure 34 : variabilité de la somme et de la variance des attributs #cagnotte. [Has14]

variabilité des scénarios en fonction de l'évolution de la consommation de gasoil

L'usage de l'eau a été jusqu'à présent observé de manière distribuée au niveau de chaque parcelle *via* l'intensité culturale et l'évolution des cagnottes. Un autre indicateur existe à l'échelle du périmètre : la consommation de gasoil de la station de pompage. Celui-ci donne une indication de la cohérence du modèle relativement au terrain, car il s'agit d'une information assez facile à collecter, souvent disponible et relativement fiable.

On s'intéresse pour cette vérification essentiellement aux premières campagnes, car lors des suivantes, la simulation peut donner lieu à l'apparition de processus qui font augmenter la consommation. Dans ce cas cette augmentation donne une information sur la trajectoire simulée du système et non sur une éventuelle erreur du modèle. Ces augmentations de la consommation se produisent aussi sur certains périmètres observés comme sur le périmètre de Nianga en hivernage 1995, avec moins d'ampleur que sur les résultats des simulations cependant. Le plus souvent les valeurs observées en particulier lors des premières campagnes de chaque simulation sont de l'ordre de 15 000 à 18 000 m³/ha/campagne, comme dans le cas de la Figure 35 ci-dessous, ce qui correspond assez bien aux valeurs

observées sur le terrain puisque ces valeurs se situent entre les chiffres relevés en hivernage et en Contre-Saison Chaude.

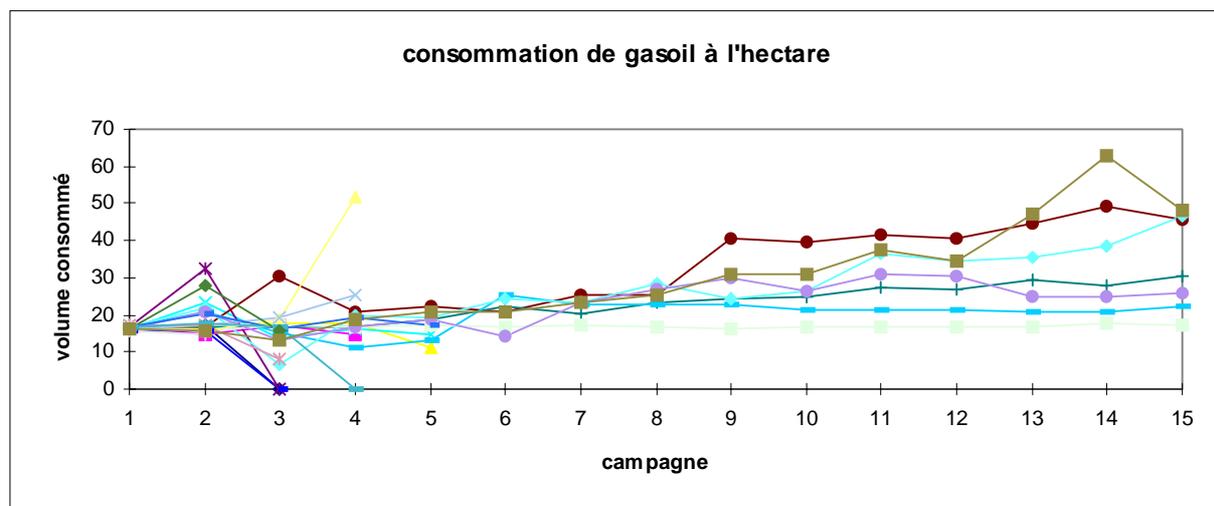


Figure 35 : exemple d'évolution simulée de consommation de gasoil à l'hectare. [has16]

Dans la Figure 35 ci-dessus, comme pour de nombreux autres scénarios, des phases de crise apparaissent dans l'évolution simulée de la consommation de gasoil au cours de certaines simulations : la consommation à l'hectare augmente, parfois fortement. De tels événements sont le plus souvent corrélés à de faibles intensités culturelles. Ces phases de crise ne sont pas systématiquement suivies d'un arrêt des simulations. La consommation peut redescendre au niveau antérieur et la simulation se poursuivre, ou encore la consommation reste à des niveaux élevés et la simulation se poursuit sur plusieurs campagnes.

variabilité des scénarios en fonction de l'évolution des communications

Enfin, suite à l'hypothèse faite sur l'importance de la dynamique des règles et des interactions pour la viabilité des systèmes, intéressons nous maintenant à des indicateurs relatifs aux communications mises en œuvre au cours des simulations et à l'évolution des comportements des paysans : nombre de changements de règles par campagne et nombre de communications par campagne en distinguant selon les thèmes des communications, accès au crédit, pompage, demande de cotisation et résultats.

L'évolution d'ensemble des indicateurs relatifs au nombre de communications par campagne ne peut être traitée de la même manière pour les quatre thèmes de communications en usage dans le modèle. Il faut considérer à part les communications qui portent sur les résultats. Pour celles-ci, il y a presque toujours une forte variabilité au départ puis une diminution importante du nombre de communications. Cet indicateur est partiellement

redondant de celui sur les changements de règles et connaît une diminution due à l'existence d'un élément absorbant dans l'ensemble des modalités de règles de changement de règles : la modalité #idem. En effet comme nous avons choisi que la règle de changement de règles peut porter sur elle-même, quand un paysan en imite un autre qui a cette modalité #idem, il reste bloqué dans cette position pour la suite de la simulation. En pratique ce choix revient à dire qu'un paysan observant qu'un autre paysan dont il aimerait avoir les résultats ne change jamais ses règles se mettrait à ne plus changer ses règles. Dans une nouvelle version de SHADOC, il pourrait être intéressant de supprimer cette possibilité en considérant les modalités des règles de changement de règles comme constantes. Les paysans dont la modalité est #retour ne sont pas non plus pris en compte par cet indicateur quand ils changent de règles puisque, à part pour leur premier changement, il n'y a pas de communication quand ils changent de règles.

Pour les communications concernant les trois autres thèmes, l'évolution la plus fréquemment rencontrée consiste en une stationnarité ou une légère diminution du nombre de communications jusqu'à une éventuelle "crise" se caractérisant par une augmentation soudaine du nombre des communications de l'un des thèmes. C'est le cas de l'exemple de la Figure 36 pour des communications portant sur le pompage.

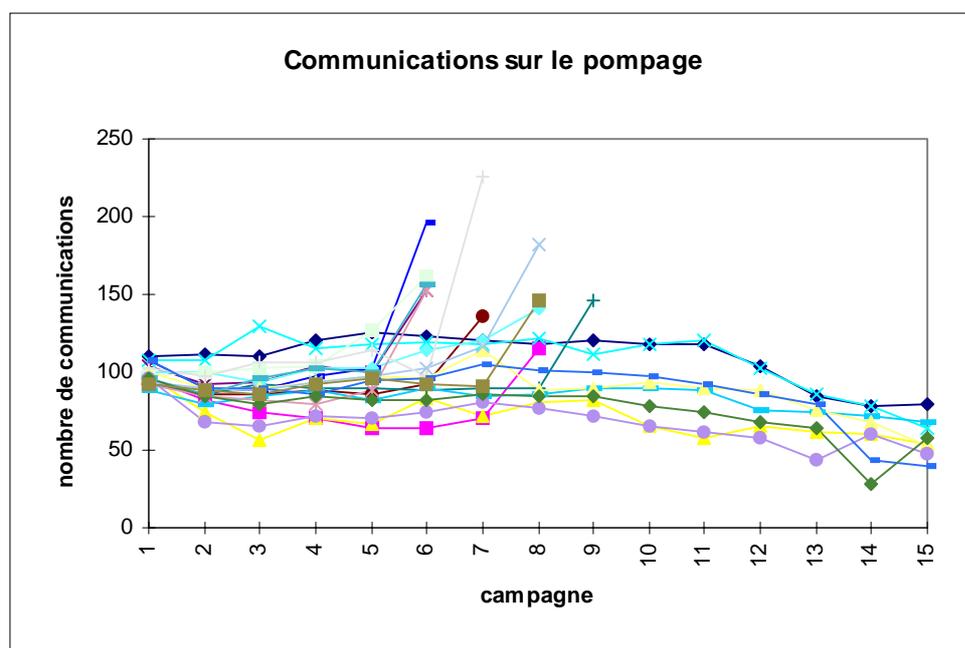


Figure 36 : simulation du nombre de communications échangées, exemple avec une crise sur le pompage. [Has14]

Ces niveaux constants sont presque nuls pour les communications relatives aux cotisations, très variables pour un même scénario pour celles relatives au crédit et dans un rapport fixe au nombre de paysans pour celles relatives au pompage. Les explosions du nombre de communications mentionnées ci-dessus sont le plus souvent suivies de l'arrêt du système et

peuvent ainsi indiquer des hypothèse sur la voie de sortie du domaine de viabilité suivie par le système, si on fait l'hypothèse que le thème des communications dont le nombre explose correspond au problème qui cause l'arrêt du système. Par exemple, une explosion des communications relatives à la cotisation peut signifier un arrêt du système par une faillite du groupement dont l'attribut #raison vaut #pompage qui n'a plus de moyens pour acheter du gasoil. Pour un même scénario la "voie de sortie" n'est pas toujours la même en fonction de la simulation.

Dans certains cas cependant, il y a maintien durant plusieurs campagnes du nombre de communications sur l'un des thèmes à un niveau élevé, comme pour le premier graphique de la Figure 37 ci-dessous. Dans d'autres cas il y a un retour au niveau antérieur puis poursuite de la simulation à ce niveau ou apparition d'oscillations, comme dans le deuxième graphique de la Figure 37.

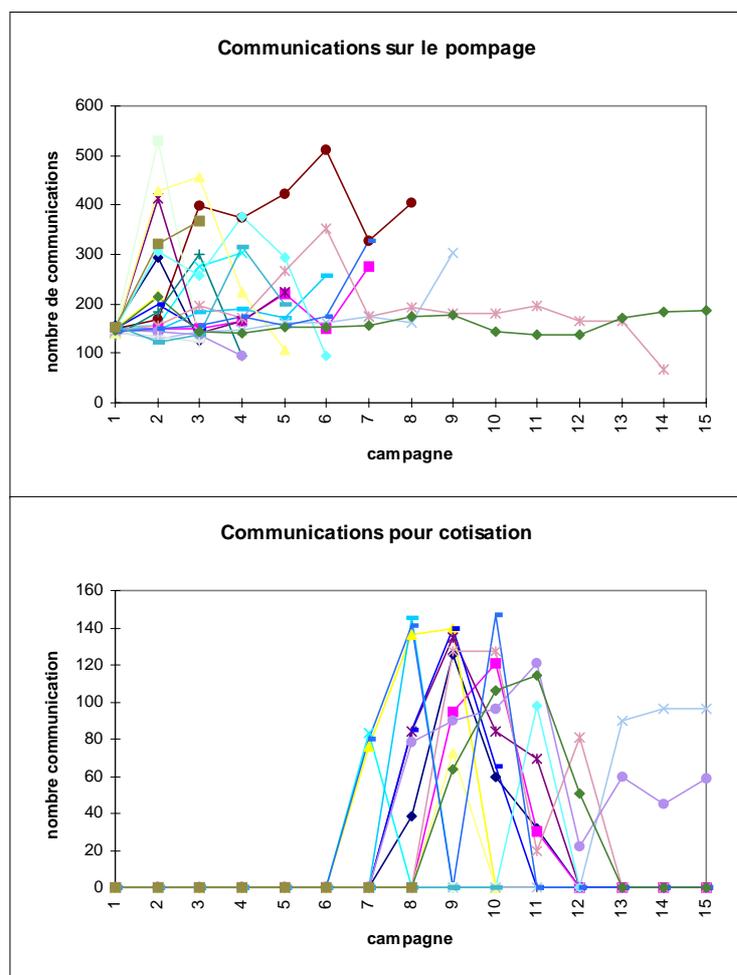


Figure 37 : simulation du nombre de communications échangées. [has21, has43]

Ces périodes de crise ne se retrouvent pas toujours sur les niveaux de cagnotte ou d'intensité culturelle. Une autre variante au schéma général consiste, en particulier pour les

communications au sujet du pompage, en une augmentation continue du nombre de communications, même si rien n'apparaît au niveau des autres indicateurs. Les évolutions non viables ne se feraient peut-être pas nécessairement uniquement *via* des phases de crise.

Quant au nombre de changements de règles observés, les simulations donnent presque toutes une forte baisse durant les premières campagnes puis une stabilisation à un niveau faible comme pour le premier graphique de la Figure 38.

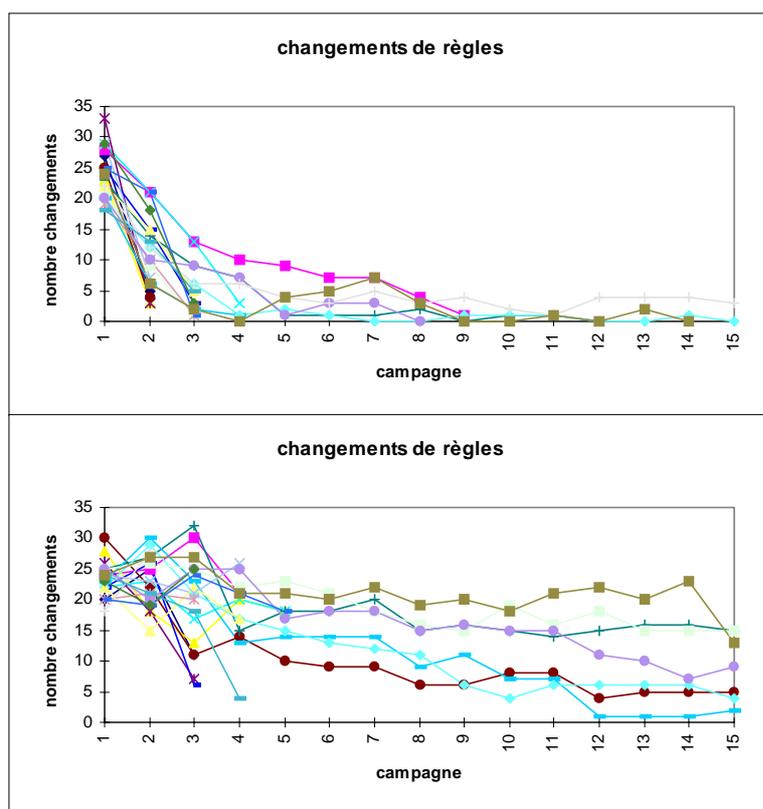


Figure 38 : évolution simulée du nombre de changements de règles avec et sans stabilisation [has4, has16]

Ce seuil, en deçà duquel la variabilité intra est importante, se situe le plus souvent autour de la quatrième campagne. Cette tendance observée est en partie due à un effet de la modalité #idem comme élément absorbant, mais aussi à une stabilisation de l'apprentissage puisque cela se passe de la même manière pour des situations initiales où très peu de paysans ont une modalité de règle de changement de règles valant #idem affaiblissant ainsi les conséquences du caractère absorbant de cette valeur. Cette observation connaît aussi des exceptions quelle que soit la proportion initiale de paysans ayant #idem comme modalité de règle de changement de règles. Le nombre de changements de règles par campagne peut rester constant, voire augmenter. C'est le cas du deuxième graphique de la Figure 38 : la

variabilité intra du scénario est importante. Enfin, quelques scénarios connaissent des temps de décroissance plus longs.

simulations de scénarios choisis à partir de l'interface

Outre la simulation des scénarios aléatoires, SHADOC peut aussi être utilisé pour des simulations individuelles. L'objectif est alors d'apporter une représentation visuelle du fonctionnement du modèle pour une simulation, autre aspect de la vue d'ensemble. Cela permet une meilleure appréhension de certaines conséquences de choix de paramètres et renvoie vers les processus du modèle impliqués. Ainsi quel que soit le scénario choisi, même à la première campagne simulée, la proportion de parcelles mises en culture est inférieure à 100 %, parfois nettement. Or ce taux de mise en culture est habituellement plus élevé. Ceci peut s'expliquer en particulier par des attributs #taille des irrigateurs volontairement limités. S'ils sont augmentés, certains scénarios conduisent à des mises en valeur de 100 % à toutes les campagnes. Ceci permet *a priori* de faire plus intervenir les processus de coordination pour l'accès à l'eau et de reproduire des situations de pénurie à l'échelle locale existant suite à l'évolution de l'état des canaux, principaux et irrigateurs, non représentée spécifiquement dans le modèle.

Les hypothèses sur les règles de comportement conduisent également à l'apparition de paysans agissant en fait comme des relais bancaire : ils empruntent auprès de leur groupement d'accès au crédit et redistribuent au sein de leur réseau social aux individus de statut inférieur et ne font ainsi parfois pas campagne. De tels paysans n'ont pas été observés dans la réalité : il s'agit de cas limites et même si certains cas proches peuvent exister, leur parcelle est en fait aussi cultivée mais en impliquant d'autres échanges. Ceux-ci qui peuvent être sous forme de travail en particulier, ne sont pas représentés ici. Ces paysans parviennent aussi à obtenir les intrants pour la campagne au moment voulu s'ils en ont besoin, mais cela ne constitue pas un préalable au démarrage de la campagne comme supposé dans le modèle. Dans ce cas le modèle amplifie des comportements existant.

Cette description qualitative des différentes formes de sentiers d'évolution⁷⁹ des systèmes irrigués simulés donne un aperçu de l'étendue des observations qui peuvent être faites sur les scénarios simulés en termes de comportement d'ensemble du modèle. Elle comporte

⁷⁹ Par "sentier d'évolution", on entend la trajectoire suivie par le système représenté au cours d'une simulation à partir des conditions initiales que constituent le scénario.

cependant des dangers quant à la prise en compte de la variabilité des simulations pour la comparaison et l'interprétation de ces résultats.

Cette description montre en particulier l'existence d'un seuil autour de la cinquième campagne à la fois pour l'évolution de l'intensité culturelle et l'évolution du nombre de changements de règles. Ceci permet d'affiner l'hypothèse initiale sur l'importance de la coordination entre les paysans pour la viabilité du système irrigué. Cette concomitance sur les seuils incite à explorer de manière plus fine les coordinations pour l'apprentissage et donc de conserver dans la suite l'observation de l'indicateur du nombre de changements de règles, même s'il est un peu biaisé. L'existence de ce seuil a donné une première possibilité de classification des simulations qu'il s'agit maintenant d'affiner.

Cependant cette description qualitative a aussi mis en évidence une variabilité importante que ce soit intra ou inter scénario. Il s'agit maintenant de comparer ces deux variabilités et d'en étudier les conséquences pour une classification des scénarios.

4.1.2 Comparaison des variabilités

variabilité des simulations viables

L'observation de l'intensité culturelle a montré une variabilité intra assez importante pour certains scénarios. Les indicateurs intermédiaires⁸⁰ simulés permettent de poser des hypothèses pour reconstituer l'histoire de simulations et ainsi la variabilité des sentiers d'évolution suivis. Il peut exister plusieurs sentiers viables pour un même scénario. Deux simulations d'un même scénario peuvent être très proches du point de vue des intensités culturelles et variables selon l'un de ces indicateurs intermédiaires comme c'est le cas pour la somme des cagnottes sur l'exemple de la Figure 39. Ainsi deux périmètres peuvent paraître avoir des comportements comparables pour un observateur extérieur mais avoir en fait des évolutions différentes pouvant provoquer un arrêt du système prématuré pour l'un des deux.

L'estimation de la variabilité intra sur la seule intensité culturelle, ou sur un seul des autres indicateurs, constitue une sous-évaluation de celle-ci qui correspond à la représentation particulière de la viabilité des systèmes irrigués retenue. Cette possibilité d'observer l'existence de différents chemins par les simulations viables pour un scénario donné est

⁸⁰ C'est-à-dire les indicateurs observés qui ne permettent pas de déterminer directement la viabilité d'une simulation. Il s'agit en fait de tous les indicateurs autres que l'intensité culturelle étant donné la définition retenue pour la viabilité d'un système irrigué. Ils sont qualifiés d'intermédiaires parce qu'ils sont supposés avoir néanmoins un effet sur la viabilité d'une simulation.

importante, même si la problématique porte sur la viabilité du scénario. En effet certains chemins viables d'un scénario peuvent impliquer que certaines valeurs intermédiaires simulées prennent des valeurs interdites par des règles non prises en compte dans le modèle.

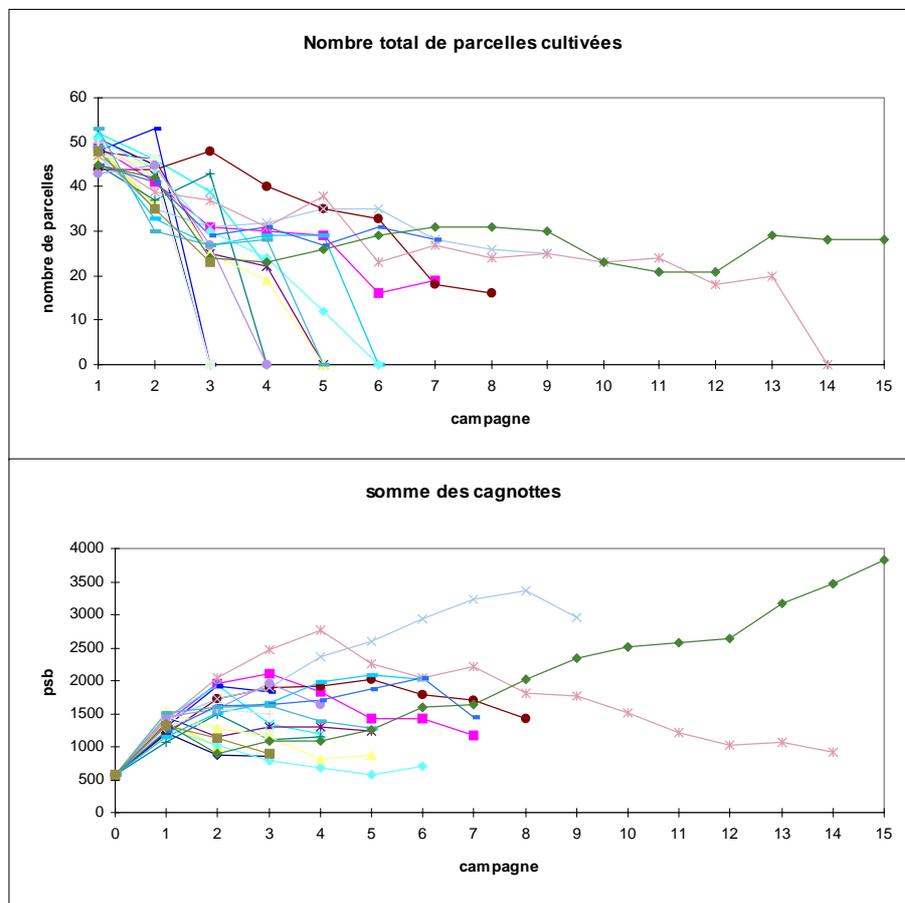


Figure 39 : comparaison des variabilités intra en fonction de l'intensité culturelle (en haut) et la somme des cagnottes (en bas) [Has21]

Cependant, même en se limitant à la variabilité intra concernant l'évolution des intensités culturelles, celle-ci reste parfois importante. Les tirages aléatoires intervenant dans le modèle sont à l'origine de cette variabilité entre les simulations d'un même scénario. Ceux-ci interviennent au cours de processus pour des événements que l'on ne sait pas représenter⁸¹, mais aussi partiellement dans la définition des conditions initiales. En particulier les scénarios définissent seulement les proportions de paysans pouvant être décrits par les différentes modalités de comportements individuels. A chaque simulation, les modalités des règles de chaque paysan sont à nouveau tirées au sort, seules les proportions

⁸¹ ou que l'on a choisi de ne pas représenter

de chaque modalité au sein de la population sont conservées. Pour supprimer cette cause potentielle de variabilité intra, quelques scénarios ont été repris en conservant en mémoire à chaque simulation une situation de départ comprenant pour chaque paysan la situation de sa parcelle dans le périmètre ainsi que l'ensemble de ses attributs, y compris son ensemble de règles initial. La variabilité intra sur l'intensité culturale s'est trouvée assez peu changée comme sur l'exemple de la Figure 40. La variabilité intra serait donc essentiellement due aux tirages aléatoires en cours de simulation et les simulations précédentes ont donc été conservées.

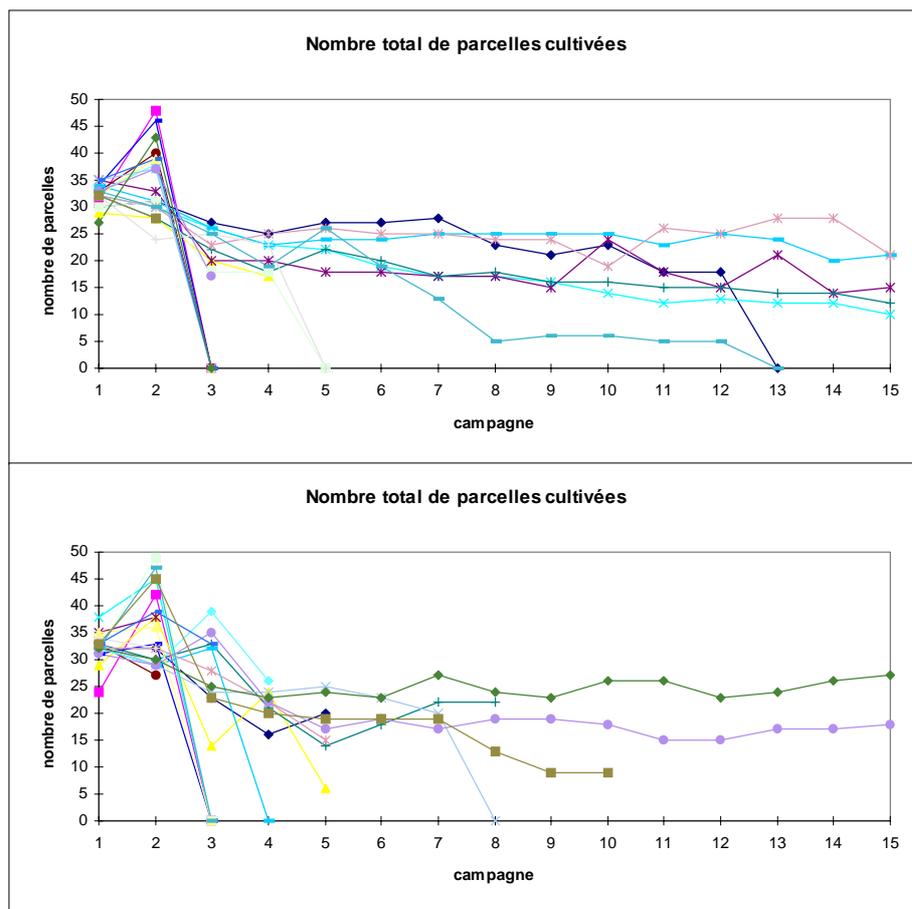


Figure 40 : simulation de l'intensité culturale avec mémoire de la distribution spatiale initiale des paysans (graphique du haut) et sans (graphique du bas). [has69]

définition d'une partition en classes de viabilité des scénarios

L'observation qualitative précédente des différentes observations simulées a impliqué l'utilisation d'une première définition de la viabilité d'une évolution simulée d'un système irrigué simulé. Il s'agit maintenant de préciser cette définition et de l'étendre aux scénarios afin d'obtenir une partition de l'ensemble des 100 scénarios en classes de viabilité. Or la description qualitative des résultats des simulations a mis en évidence une importante

variabilité de la viabilité des évolutions simulées d'un scénario donné : dans certains cas aucune simulation ne peut être considérée comme viable, dans d'autres cas quelques simulations peuvent être considérées comme viables, enfin dans quelques cas il s'agit de la majorité des simulations qui peuvent être considérées comme viables. Ceci incite à chercher à classer les scénarios selon 3 classes correspondant à ces groupes observés qualitativement.

Auparavant il faut revenir sur la définition d'une simulation viable afin de la préciser. Pour cela nous avons besoin de déterminer dans un premier temps les seuils S_c et S_i permettant de qualifier chaque simulation de *viable* ou de *non viable*. S_c correspond à un nombre de campagnes minimum enchaînées et S_i au taux de mise en culture minimum à une campagne donnée pour qu'elle soit prise en compte. Une simulation est considérée comme *viable* si elle donne lieu à au moins une campagne de rang supérieur à S_c , avec un taux de mise en culture supérieur à S_i . Dans un deuxième temps, il s'agit de définir deux seuils sur la proportion de simulations viables obtenues pour un paquet de simulations d'un scénario donné pour affecter une classe de viabilité à ce scénario : un seuil S_1 en dessous duquel le scénario est considéré comme *non viable*, un seuil S_2 au-dessus duquel le scénario est considéré comme *viable*, entre les deux le scénario sera dit *un peu viable*. La détermination de ces seuils ci-dessous prend en compte leur signification par rapport au modèle et/ou aux observations sur le terrain et la sensibilité de la partition à ces définitions.

Intéressons-nous dans un premier temps au choix des valeurs des seuils S_c et S_i . Le seuil S_c correspond à la fin de la première phase durant laquelle s'arrêtent la majorité des simulations pour beaucoup de scénarios. Il s'agit donc de chercher une rupture dans l'évolution du nombre total pour l'ensemble des simulations des 100 scénarios aléatoires de simulations *viables* quand S_c augmente, pour l'ensemble des scénarios. La Figure 41 montre effectivement, pour plusieurs valeurs possibles de S_i , l'existence d'une baisse assez rapide du nombre de simulations viables si $S_c \leq 4$ et une baisse plus lente si $S_c \geq 5$. La valeur $S_c = 6$ a alors été retenue, d'une part pour "prendre de la marge" par rapport au bruit initial, d'autre part parce qu'elle permettait d'obtenir des classes de viabilité assez stables.

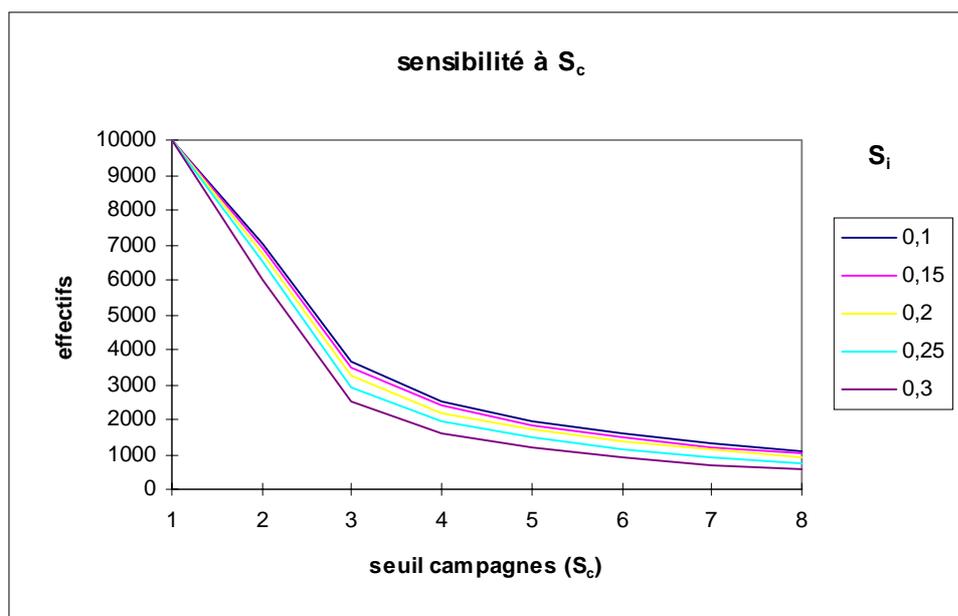


Figure 41 : sensibilité du nombre de simulations viables au choix de S_c .

En ce qui concerne S_i , il n'y a pas d'effet de seuil équivalent permettant de retenir une valeur particulière. Il s'agit pourtant de ne pas prendre en compte pour déterminer la viabilité des scénarios des simulations dont toutes les campagnes simulées au-delà de S_c n'auraient qu'une seule parcelle mise en culture. De tels cas ne peuvent exister en réalité. Comme le seuil de démarrage d'une campagne est pris à 0.3 quand la modalité de la règle de type #démarrageCampagne de l'agent groupe de raison #pompage vaut #surfaceMini, et comme on souhaite prendre en compte une différence entre les deux modalités, on a retenu la valeur $S_i = 0.25$.

Nous considérons donc à partir de maintenant qu'une simulation est *viable* si elle atteint une intensité culturelle supérieure ou égale à 0.25 % au moins une fois à la sixième campagne ou après.

La première classe de viabilité des scénarios définie est la classe des scénarios *non viables*, c'est-à-dire des scénarios ne donnant jamais ou très rarement lieu à des simulations viables. Une valeur maximale de 5 % de simulations viables est retenue pour S_1 . Pour la définition de S_2 , l'observation du nombre de simulations viables pour 20 simulations d'un scénario donné, répétée sur 4 paquets de 20 simulations indépendants, a permis de choisir la séparation entre les classes *un peu viable* et *viable* à 9 simulations viables sur 20. Ce choix a été fait dans une perspective de stabilité des classes compte tenu de la variabilité intra des

scénarios : nous avons cherché à minimiser localement pour différentes valeurs de S_2 la somme des erreurs de classement de scénarios entre les classes *un peu viable* et *viable*⁸².

Nous considérerons donc dans la suite qu'un scénario est de classe *viable* s'il donne lieu à au moins 10 simulations viables sur une série de 20 simulations, de classe *non viable* s'il donne lieu à aucune ou à une seule simulation viable sur un paquet de 20 simulations, et de classe *un peu viable* s'il donne lieu à 2 à 9 simulations viables sur un paquet de 20 simulations.

La classe de chacun des 100 scénarios aléatoires a alors été déterminée à partir de la moyenne du nombre de simulations viables obtenu pour chacun des quatre paquets de vingt simulations. La comparaison de la partition ainsi obtenue à celles qui seraient obtenues à partir de chacun de ces paquets de simulation pris indépendamment ainsi que d'un cinquième paquet indépendant des quatre premiers donne le Tableau 13 ci-dessous. Les différences concernent toujours l'affectation dans deux classes voisines, aucun scénario classé *jamais viable* ne serait classé *viable* à partir des résultats d'un seul paquet.

nombre de scénarios mal classés	paquet 1	paquet 2	paquet 3	paquet 4	paquet 5
erreurs entre classe 1 et classe 2	1	3	2	1	3
erreurs entre classe 0 et classe 1	3	3	3	8	4
total	4	6	5	9	7

Tableau 13 : nombre de scénarios parmi les 100 scénarios aléatoires dont la classe déterminée par la moyenne des quatre premiers paquets est différente de celle obtenue pour un paquet seul.

Ce tableau montre que la classification obtenue par cette méthode est assez stable et permet de séparer les scénarios. On la retiendra donc pour la suite.

4.1.3 Quelles corrélations

Les simulations ont ainsi permis de proposer une classification des scénarios en fonction de leur viabilité. Y a-t-il des corrélations avec des valeurs de certains paramètres décrivant les scénarios pris individuellement ? Les quelques corrélations observées sont présentées de

⁸² pour chaque valeur de S_2 , le classement obtenu à partir du nombre de simulations viables obtenu pour chaque paquet de simulations a été comparé à celui obtenu à partir de la moyenne des quatre paquets. On a alors cherché à minimiser le nombre d'occurrences d'un classement différent d'un scénario à partir d'un des paquets par rapport à celui obtenu à partir de la moyenne.

manière brute dans ce qui suit. Leur interprétation relativement aux observations du terrain sera l'objet du chapitre suivant.

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 (Manly, 1991) avec le logiciel ADE4 (Chessel et al., 1997) 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. Ce même test a aussi été utilisé pour les vecteurs décrivant le nombre de parcelles le long de chaque irrigateur et pour le revenu d'origine extérieur maximum pouvant être reçu par un agent paysan en fin de campagne. L'hypothèse précédente de corrélation de la classe de viabilité avec les valeurs de certains paramètres est acceptée au seuil de 5 % pour trois des paramètres testés : le revenu maximum extérieur, la règle de remboursement et le statut social. Plus le revenu maximum extérieur est élevé, plus la viabilité du scénario est élevée. En ce qui concerne la règle de remboursement, l'analyse discriminante donne une tendance pour les scénarios de la classe *viable* à avoir une faible proportion de paysans dont la modalité est #investir et une proportion élevée de paysans dont la modalité est #dèsQuePossible⁸³, elle montre aussi que la distinction est par contre faible quelque soit la modalité entre les classes *non viable* et *un peu viable*. Dans le cas du statut social, une analyse discriminante du même type que la précédente indique une séparation nette de la classe *non viable* par rapport aux deux autres classes, en particulier quand la proportion de paysans dont le statut est #laam⁸⁴ est élevée.

Les autres paramètres sont constitués de variables qualitatives non ordonnées. Pour chaque paramètre, une classification des scénarios a été faite en fonction des valeurs prises par ces paramètres. La corrélation entre chacune de ces classifications et les classes de viabilité des scénarios a été testée par la méthode du χ^2 . Certains paramètres étudiés précédemment par le test de Manly ont également été repris sous forme de classes en particulier en fonction de leur homogénéité autour d'une modalité : tous les paysans ont-ils un comportement semblable ou se comportent-ils selon des modalités différentes ? Dans

⁸³ pour mémoire, la modalité #investir de la règle de remboursement correspond à un remboursement des crédits en cours en fin de campagne avec une partie seulement du revenu de la campagne, l'autre partie est sortie du système. La modalité #dèsQuePossible correspond à un remboursement du maximum de crédit en cours avec le revenu de la campagne.

⁸⁴ Pour mémoire, le statut #laam est le plus élevé de la hiérarchie représentée

quelques cas un regroupement des classes *un peu viable* et *viable* a été effectué pour garantir la validité du test statistique, à cause du faible effectif de la classe *viable*. Un de ces paramètres, l'existence d'un revenu extérieur, est fortement corrélé à la classe de viabilité : tous les scénarios dont le paramètre #revenuExt vaut #aucun sont dans la classe *non viable*. C'est pourquoi les tests de corrélation ont également été faits sur le sous-ensemble des scénarios n'ayant pas cette valeur #aucun pour le paramètre #revenuExt.

Au seuil de 5 %, hormis #revenuExt, aucune corrélation n'est observée entre les classes de viabilité et l'une des classifications obtenues à partir des paramètres des scénarios. Par contre le regroupement des classes *viable* et *un peu viable* conduit à l'observation de quelques corrélations. Ces corrélations concernent en particulier le critère d'évaluation de la campagne par les agents groupe dont l'attribut #raison vaut #crédit. Comme le résume le Tableau 14, les scénarios dont la majorité des groupes ont un critère d'évaluation de la campagne global⁸⁵, tel que la production totale ou la consommation de gasoil, ont plus de chance d'être dans la classe *viable* ou dans la classe *un peu viable*. Ceux dont le critère concerne plutôt un facteur supposé de la viabilité, tel que le niveau d'endettement ou la date de démarrage de la campagne, ont une plus grande probabilité de se retrouver dans la classe *non viable*.

	non viable	(un peu) viable	total
critère distribué	21	11	32
critère global	9	13	22
critère intermédiaire	17	6	23
critère variable	18	5	23
total	65	35	100

Tableau 14 : table de contingence associée au paramètre Critère d'évaluation du groupe de raison #crédit. Probabilité de dépassement du test du χ^2 associé : 95,86 %

En cas d'analyse sur les seuls scénarios dont le paramètre #revenuExt a une valeur différente de #aucun, ces corrélations concernent aussi l'existence d'un chef et sa situation pour le groupe dont l'attribut #raison vaut #pompage et pour le degré d'homogénéité des

⁸⁵ Les six modalités de critère d'évaluation d'une campagne sont regroupés en trois classes selon que le critère correspond à une évaluation globale (production ou consommation), distribuée au niveau des membres (intensité culturelle, satisfaction des membres) ou portant sur un facteur supposé important pour obtenir un bon résultat (niveau d'endettement des membres, date de démarrage de la campagne).

objectifs des paysans. Ainsi l'analyse statistique résumée dans les tableaux 14 et 15 indique une corrélation entre l'existence d'un chef dont la parcelle se trouve à l'amont du périmètre et la viabilité du système ainsi qu'entre la non viabilité et une homogénéité ou une hétérogénéité extrême des objectifs des paysans⁸⁶.

	non viable	(un peu) viable	total
sans chef	6	7	13
chef au hasard	11	4	15
chef selon statut	5	7	12
chef selon position	4	14	18
chef selon statut et position	11	3	14
total	37	35	72

Tableau 15 : table de contingence associée au paramètre existence d'un chef pour le groupe de raison #pompage pour les scénarios où il existe un revenu extérieur. Probabilité de dépassement du test du χ^2 associé : 99,17 %

	non viable	(un peu) viable	total
hétérogène	13	10	23
moyen	7	16	23
homogène	17	9	26
total	37	35	72

Tableau 16 : table de contingence associée au paramètre d'homogénéité des objectifs des paysans du système irrigué pour les scénarios où il existe un revenu extérieur. Probabilité de dépassement du test du χ^2 associé : 95,88 %

Ces résultats bruts seront interprétés en relation avec les connaissances du terrain au chapitre suivant. Notons d'ores et déjà que, hormis le comportement individuel lié au remboursement du crédit, aucune règle tant individuelle que collective n'apparaît comme déterminante pour la classe de viabilité d'un scénario donné. Les scénarios simulés pour définir la partition proposée étaient situés aléatoirement parmi l'ensemble des scénarios possibles. Il reste à étudier l'effet sur la viabilité de variations dans quelques dimensions de

⁸⁶ Ici les scénarios ont été classés selon des sphères concentriques autour du point (25, 25, 25, 25). La couronne intermédiaire semble corrélée à une plus grande viabilité du système irrigué.

l'espace des scénarios. Il s'agit an fait des simulations relatives aux questions particulières posées au § 3.3.2. C'est l'objet de la suite.

4.2 Cohérence avec les versions antérieures du modèle

Des simulations sur une première version du modèle avaient amené à faire l'hypothèse que la structuration de la société en réseaux sociaux était aussi importante à prendre en compte pour la viabilité du système irrigué que les règles d'allocation de l'eau. Cette observation a conduit à la modélisation présentée au chapitre précédent. L'hypothèse ci-dessus est-elle cohérente avec la nouvelle représentation d'un système irrigué qu'elle a engendrée ?

4.2.1 Un exemple d'étude "en tranche" du comportement du modèle

L'étude précédente du comportement d'ensemble du modèle a permis de déterminer un critère de classification en classes de viabilité des scénarios et d'observer que la plupart des classes de paramètres inclus dans ces scénarios ne sont pas corrélées à ces classes de viabilité. En particulier, le paramètre #homogénéité et le nombre de réseaux d'affinité sociale ne sont pas corrélés à la classe de viabilité des scénarios. Si les réseaux sociaux interviennent dans la viabilité des systèmes irrigués ce n'est alors *a priori* qu'à un deuxième degré : il peut s'agir par exemple d'une influence locale dans l'espace des scénarios, l'effet pouvant varier en sens et en intensité en fonction de la valeur des autres paramètres.

Il s'agit en fait d'étudier la sensibilité du modèle aux variations de quelques paramètres : ceux pour lesquels on peut s'attendre à un effet dû à la structuration de la société en réseaux sociaux, tels que l'homogénéité de constitution des groupes, le nombre de réseaux d'affinité sociale et l'espace d'imitation pour les règles de changement de règles. Cette étude de sensibilité, qui prolonge celle faite au § 4.1.2, concerne des variations de quelques paramètres, représentatives de l'ensemble des valeurs possibles de ces paramètres. Elle n'est pas à proprement parler locale au sens de "dans un voisinage du scénario initial" : il s'agit de toute la gamme de variation de quelques paramètres seulement qui est explorée. On l'appellera par la suite étude "en tranche".

On exposera la méthode utilisée dans un premier temps sur l'exemple relatif à l'effet des réseaux d'affinité sociale. Cinq points de l'espace des scénarios ont été choisis parmi les 100 scénarios aléatoires précédents de la façon suivante :

deux scénarios, S1 et S2, tirés au hasard parmi les scénarios de la classe non viable.

un scénario, S3, non viable à la limite des classes non viable et un peu viable.

un scénario, S4, tiré au hasard parmi les scénarios de la classe un peu viable.

un scénario, S5, à la limite entre les classes un peu viable et viable.

Chacun de ces scénarios donne ensuite lieu à l'écriture d'une vingtaine de scénarios selon le plan d'expérience exposé à la fin du chapitre précédent. Tous ces nouveaux scénarios sont décrits en annexe 8.

Enfin, étant donné le critère de partition choisi et la définition retenue pour la viabilité, les variations dans chacune des dimensions seront observées du point de vue de la durée des simulations en nombre de campagnes enchaînées et du taux de parcelles mises en culture. Il s'agit par conséquent d'une évaluation "par défaut" de ces variations.

4.2.2 Description des scénarios initiaux

Les deux scénarios de la classe *non viable*, S_1 et S_2 , n'ont jamais donné lieu à une simulation viable sur toutes les répétitions de chaque paquet.

Le scénario de la classe *un peu viable*, S_4 , donne lieu à des simulations assez homogènes du point de vue du niveau d'intensité culturale à chaque campagne. Même celles qui s'arrêtent en cours sont jusqu'à leur arrêt au même niveau d'intensité culturale que celles qui continuent. Du point de vue du nombre de campagnes enchaînées, deux modes apparaissent, un premier groupe de simulations s'arrête vers la dixième campagne, les autres atteignent la quinzième, mais pas toujours au-dessus du seuil retenu de 25 % des parcelles cultivées, ce qui diminue la signification de la séparation en deux groupes distincts. Toutes les simulations commencent par une décroissance assez nette puis se poursuivent par une décroissance lente.

Ce scénario est très stable. Outre la cohérence entre les taux de mise en culture à une campagne simulée donnée, la stabilité tient aussi dans l'évolution d'une campagne sur l'autre. Aucun phénomène d'oscillation n'est apparu, très peu de simulations présentent une remontée du taux de mise en culture d'une campagne à la suivante, et dans ces rares cas de telles remontées sont de faible ampleur. Il n'apparaît pas non plus de stabilisation à un niveau élevé de taux de mise en culture. Ces observations sur la variabilité au sein d'un paquet de simulations sont reconduites pour tous les autres paquets de simulations. La Figure 42 ci-dessous illustre sur un paquet le comportement de ce scénario.

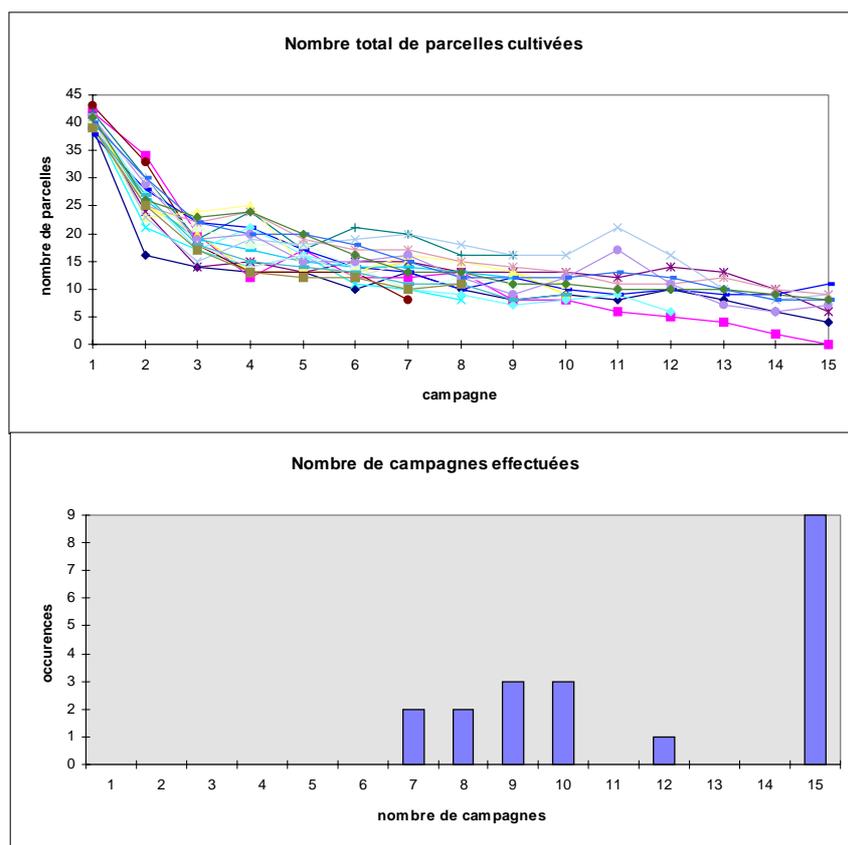


Figure 42 : courbes d'évolution des simulations d'un paquet du scénario S_4 et histogramme du nombre de campagnes effectué.

Le scénario S_5 à la limite entre les classes *un peu viable* et *viable* donne lieu à plusieurs voies d'évolution des simulations : des simulations non viables avec arrêt précoce, des simulations atteignant la quinzième campagne. Parmi ces dernières, certaines se stabilisent à un niveau assez élevé, jusqu'à 80 % ou plus du nombre de parcelles, tandis que d'autres décroissent lentement dans un premier temps puis se stabilisent à un niveau moins élevé. Cette stabilisation autour d'un niveau de mise en culture donné est majoritaire.

Ce scénario est caractérisé par une variabilité intra assez importante. Cette variabilité est observée au sein de chaque paquet de simulations entre les différents modes d'évolution, mais aussi entre deux paquets de simulations : les écarts à une campagne donnée entre les taux de mise en culture des simulations viables sont eux-mêmes très variables d'un paquet à un autre. Au niveau diachronique, aucun phénomène d'oscillation n'apparaît mais des remontées importantes des taux de mise en culture apparaissent parfois, de manière rare cependant. La Figure 43 ci-dessous illustre les évolutions de ce scénario sur deux paquets de simulations différents.

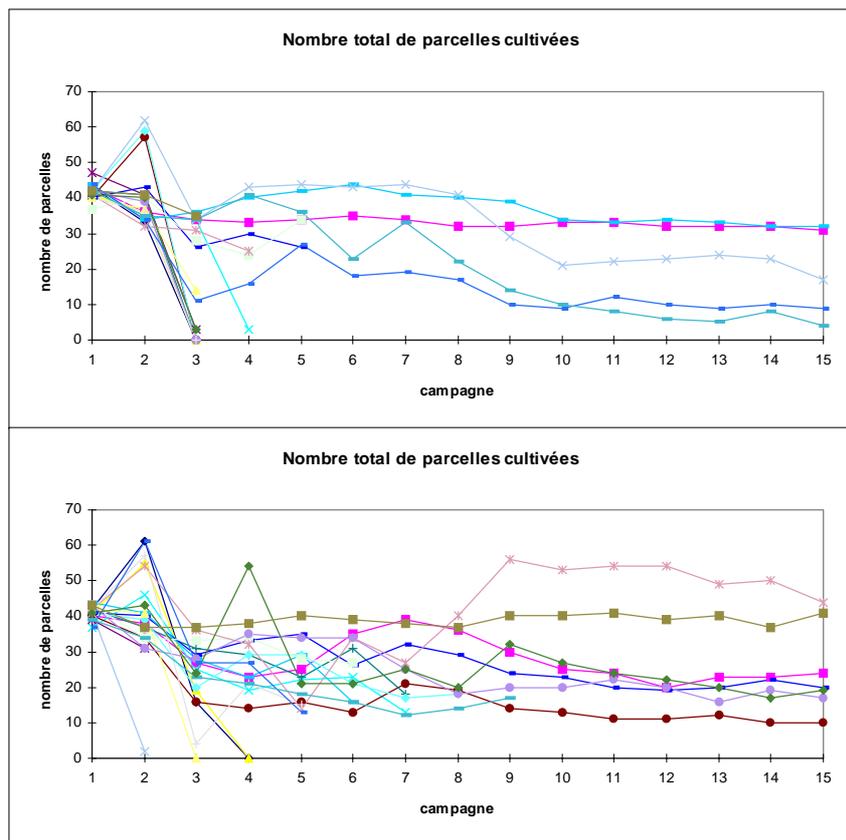


Figure 43 : trajectoires de deux paquets de simulations du scénario S_5 .

Le scénario S_3 enfin, à la limite entre les classes *non viable* et *un peu viable*, ne donne lieu à pratiquement aucune simulation viable atteignant la quinzième campagne. Dans certains paquets de simulations, il dépasse le seuil fixé pour l'intensité culturale à une campagne ou deux seulement et ce pour un nombre réduit de simulations.

En ce qui concerne la variabilité, la comparaison entre paquets de simulations a ici peu de sens, puisque elle ne pourrait concerner que une ou deux simulations par paquet. Au niveau diachronique, aucun événement d'augmentation importante du taux de parcelles mises en culture après quelques campagnes de quasi-arrêt n'a été observé.

4.2.3 Effet des changements de valeurs des paramètres

Pour cette série de modifications consacrées à l'effet des réseaux sociaux, tous les scénarios dérivés des deux scénarios initialement dans la classe *non viable* y restent sans aucune tendance de rapprochement vers la classe *un peu viable* pour certains d'entre eux.

Les scénarios dérivés du scénario S_3 , initialement à la limite des classes *non viable* et *un peu viable*, sont tous dans l'une ou l'autre de ces deux classes, toujours proches de la limite : quatre scénarios passent dans la classe *un peu viable* mais en restant à sa limite

inférieure du point de vue du pourcentage de simulations viables. La durée des simulations est très variable et se situe dans les limites des variations observées sur S_3 . La variabilité des simulations de chaque scénario dérivé est de l'ordre de celle du scénario initial.

Les scénarios issus du scénario S_4 , initialement dans la classe *un peu viable*, conservent leur homogénéité autour d'un niveau d'intensité culturelle maintenu pendant un nombre élevé de campagnes proche du seuil de viabilité retenu. L'existence de deux modalités du point de vue du nombre de campagnes est également conservée dans tous les cas selon la même séparation : un groupe de simulations vont jusqu'à la quinzième campagne les autres s'arrêtent autour de la dixième. Trois scénarios dérivés cependant passent dans la classe *viable*, leur nombre de simulations viables est nettement plus élevé que celui obtenu pour la meilleure série de simulations du scénario initial. Ces scénarios ne correspondent pas à une valeur particulière de l'un des paramètres modifiés : parmi les paramètres modifiés, il n'y en a pas dont une valeur particulière aurait le même type d'effets pour plusieurs scénarios initiaux. Enfin un seul scénario dérivé passe dans la classe *non viable*. Les différences observées entre ces scénarios et le scénario initial dont ils dérivent portent sur les niveaux d'intensité culturelle. Les formes d'évolution sont les mêmes, comme le montre la Figure 44.

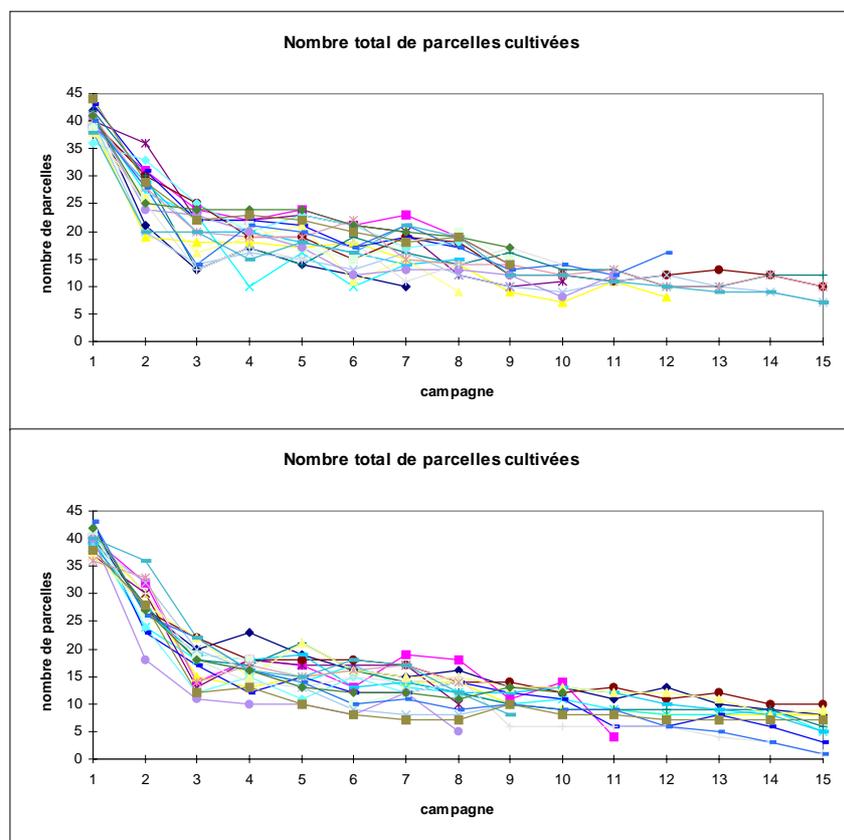


Figure 44 : trajectoires de simulations de deux scénarios issus de S_4

En ce qui concerne le scénario S_5 , initialement à la limite entre les classes *un peu viable* et *viable*, tous les scénarios dérivés se retrouvent du point de vue du nombre de simulations

viables dans la gamme de variation du scénario initial qui est couverte en entier. Du point de vue de la variabilité, quelques scénarios apparaissent plus homogènes surtout si on se limite à comparer les simulations viables à une campagne donnée. Dans deux cas, la proportion de simulations dont la variabilité diachronique est importante est plus élevée. Il n'est pas possible de les relier à une valeur particulière des paramètres.

Les observations simulées sur cette première série de modifications des scénarios initiaux montrent que dans les dimensions correspondantes il n'y a pas de rupture de la viabilité observée pouvant être expliquée par les changements effectués sur les scénarios initiaux. Ceci confirme la non corrélation observée précédemment est confirmée dans les variations observées. Cependant, pour l'un des scénarios initiaux, quelques scénarios modifiés sont apparus plus viables, sans qu'on puisse cependant relier ce changement de viabilité à des valeurs particulières des paramètres modifiés. Il y aurait là un effet qui reste à expliquer.

Si elle existe, l'influence des réseaux d'affinité sociale sur la viabilité, supposée à la suite des simulations sur une première version du modèle, ne semble pas passer par les paramètres retenus pour cette série de modifications. Une autre voie consiste maintenant à explorer des variations sur l'activation de ces réseaux.

4.3 Des questions particulières posées au modèle : à propos des changements de règles

Ce travail se situe dans le contexte de la question du lien entre les modes de coordination entre les paysans et la viabilité des systèmes irrigués. Or ce qui précède a tendance à montrer que la structure des réseaux d'affinité sociale n'a peut-être pas un effet aussi important que supposé dans un premier temps sur la viabilité des systèmes irrigués. Ceci ne remet pas en cause l'hypothèse initiale mais oriente les explorations vers les processus qui utilisent ces réseaux sociaux et les modalités des règles qui y sont liées. Les processus d'apprentissage et d'évaluation des campagnes en particulier font appel à ces réseaux : on se limitera à ceux-ci dans ce qui suit.

Pour cela les scénarios initiaux utilisés précédemment sont repris, affectés des modifications présentées dans le plan d'expériences au § 3.3. Les comparaisons entre les simulations en résultant sont faites de la même manière que précédemment.

4.3.1 Autour de l'apprentissage individuel

La première série de modifications concerne des paramètres liés à l'apprentissage individuel : proportion de paysans dans chacune des modalités possibles de règle de changement de règles et proportion de paysans dans chacune des modalités possibles d'ensemble d'imitation.

Compte tenu de la variabilité propre à chaque scénario initial, cette première série de modifications donne lieu à peu de changements sur les taux de mise en culture simulés. C'est essentiellement sur les scénarios dérivés de S_4 que ces modifications ont un effet : sur les 21 scénarios dérivés, 12 sont hors de l'intervalle des valeurs observées dans les séries des simulations de S_4 . Parmi ceux-là, cinq se trouvent dans la classe *viable*. Cependant, comme sur l'exemple de la Figure 45, tous ces scénarios issus de S_4 gardent la même homogénéité en terme d'intensité culturelle simulée que S_4 . Cette reproduction du comportement d'ensemble du scénario père est aussi valable pour la variabilité d'une campagne simulée à la suivante. Les changements portent surtout sur les niveaux d'intensité culturelle plus ou moins élevés dans la phase de décroissance lente. Comme pour la série de modifications précédentes, aucune valeur de l'un des paramètres testés n'apparaît comme ayant plus d'effets que d'autres.

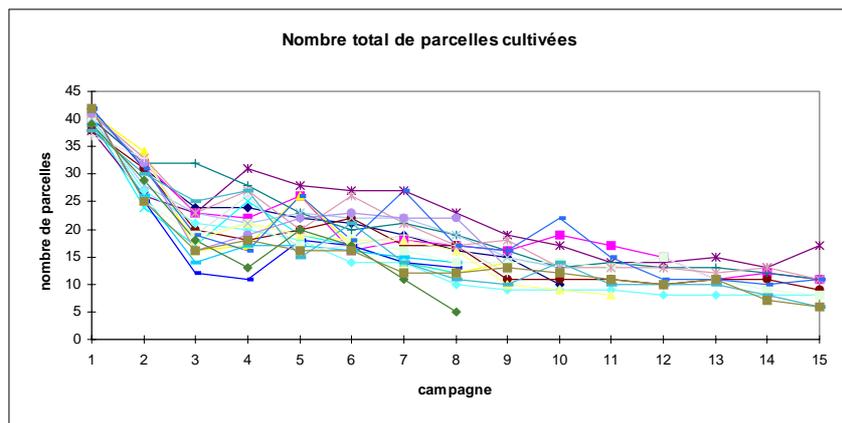


Figure 45 : série de trajectoires de simulations d'un scénario issu de S_4

Cette série de modifications n'a aucun effet sur les scénarios issus de S_1 et S_2 , même en tendance. Tous restent sans aucune simulation viable. Les scénarios issus de S_3 ne connaissent pas beaucoup plus de changements du point de vue des simulations de mise en culture. Un seul passe dans la classe *un peu viable*, mais en y restant à la limite inférieure.

Enfin quelques changements apparaissent pour les scénarios issus de S_5 , du point de vue du nombre de campagnes viables simulé comme de la variabilité entre deux campagnes successives, mais ces changements restent de faible amplitude au regard de la variabilité observée pour S_5 et sont donc assez peu significatifs.

Cette série de modifications relatives à l'apprentissage individuel donne donc des variations de faible ampleur. Comme pour celles relatives aux réseaux d'affinité sociale précédemment, le paysage est relativement peu accidenté dans ces directions.

4.3.2 Autour de l'apprentissage collectif

La deuxième série de modifications s'intéresse maintenant aux modes d'apprentissage des groupes au travers de la règle de changement de règles de chaque type de groupe.

Cette série de modifications a des effets plus nettement marqués que la précédente sur toutes les séries. C'est sur les scénarios issus de S_5 que l'effet est le plus important malgré la variabilité de celui-ci. Pour neuf de ces scénarios, toutes les simulations sont viables, pour un dixième, une seule n'est pas viable. Ces dix scénarios ont de plus le même type d'évolution, présenté à la Figure 46 : leurs simulations sont très homogènes aussi bien en niveau de mise en culture qu'en nombre de campagnes enchaînées. Le niveau d'intensité culturelle décroît jusqu'à la troisième campagne puis remonte au niveau initial dans les

campagnes suivantes et reste stable jusqu'à la fin. Les autres scénarios issus de S_5 conservent un comportement proches de ceux observés pour les séries de S_5 , aussi bien en niveau de viabilité qu'en variabilité. Les dix scénarios qui se distinguent correspondent à l'ensemble de ceux dont le groupe dont l'attribut #raison vaut #pompage a une règle de changement de règles dont la modalité vaut #idem.

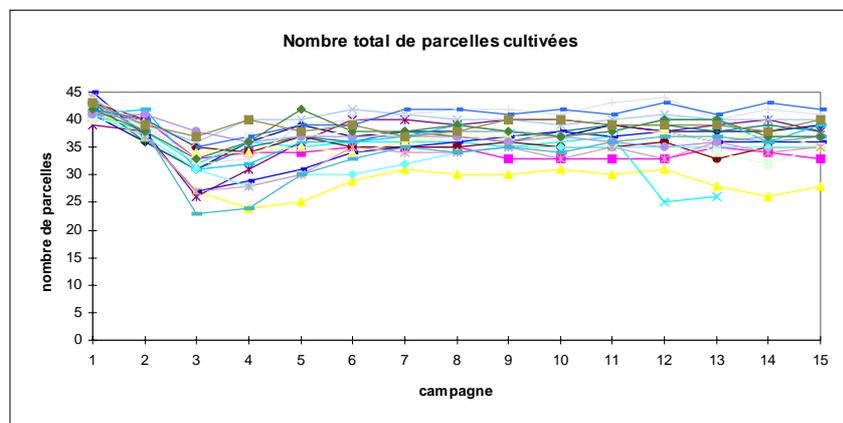


Figure 46 : série de trajectoires de simulations d'un scénario issu de S_5 dont le groupe de raison #pompage a une règle de changement de règles de modalité #idem

Pour les scénarios issus de S_3 , le comportement est du même type. Même si leur amélioration en terme de nombre de simulations viables n'est pas toujours significative, comme précédemment, les scénarios dont la modalité de la règle de changement de règles du groupe de raison #pompage vaut #idem connaissent un changement d'évolution : ils tendent vers un comportement du type de celui observé pour les séries de simulations de S_4 , évolutions assez homogènes en intensité culturale avec deux modalités de nombre de campagnes enchaînées. Ceci se traduit pour quelques scénarios comme celui de la Figure 47 par une augmentation du nombre de simulations viables pouvant être assez importantes. Les autres scénarios conservent un comportement semblable à celui de S_3 .

En ce qui concerne les scénarios issus des autres scénarios initiaux, l'effet est inversé : ce sont les scénarios dont la modalité de la règle de changement de règles du groupe de raison #pompage ne vaut pas #idem qui connaissent des variations sur la viabilité des simulations. Pour les simulations issues de S_1 ou S_2 , cet effet correspond à une tendance à l'amélioration, plus sensible pour S_1 . Il s'agit seulement d'une tendance puisque dans tous les cas ces scénarios demeurent non viables. Pour les scénarios correspondant, plusieurs simulations durent un plus grand nombre de campagnes mais avec un niveau d'intensité culturale insuffisant.

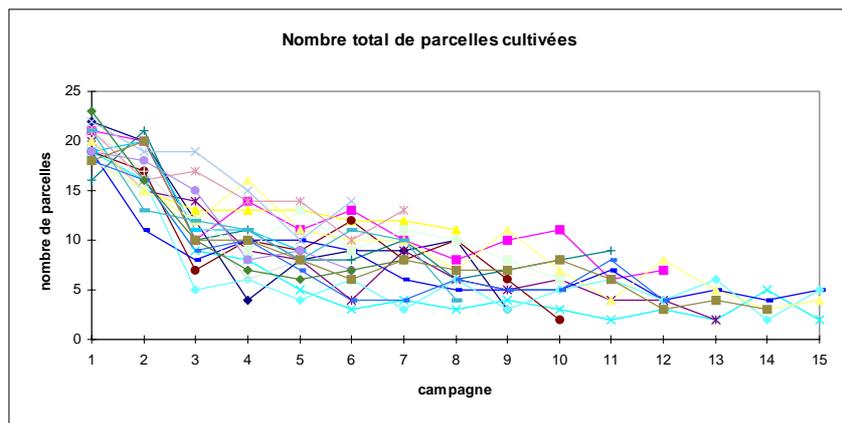


Figure 47 : série de trajectoires de simulations d'un scénario issu de S_3 dont le groupe de raison #pompage a une règle de changement de règles de modalité #idem

Pour les scénarios issus de S_4 enfin, quand un changement d'évolution est observé, celui-ci est négatif. Il apparaît des simulations ne dépassant pas le seuil retenu sur le nombre de campagnes et la proportion de simulations atteignant la quinzième campagne devient très faible voire nul. Les neuf scénarios dont la modalité de la règle de changement de règles du groupe de raison #pompage ne vaut pas #idem se situent dans la classe *non viable*, dont six avec aucune simulation viable, comme celui de la Figure 48 ci-dessous.

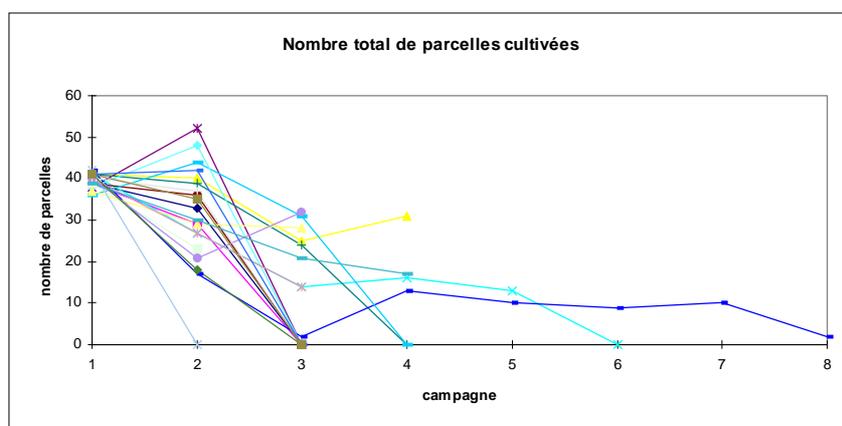


Figure 48 : série de trajectoires de simulations d'un scénario issu de S_4 dont le groupe de raison #pompage a une règle de changement de règles de modalité différente de #idem

Cette série de modifications relatives à l'apprentissage collectif donne donc des résultats plus marqués. Le paysage est plus accidenté. Les modifications observées sont cohérentes entre elles pour tous les scénarios issus d'un même scénario, elles sont corrélées à la valeur prise par la modalité de la règle de changement de règles du groupe de raison #pompage. Le sens de cette variation n'est cependant pas toujours cohérent d'un scénario initial à un autre.

4.3.3 Autour de l'évaluation individuelle

La troisième série de modifications concerne des paramètres liés à l'évaluation individuelle en fin de campagne : proportion de paysans dans chacune des modalités possibles de critère d'évaluation du déroulement de la campagne, en fonction de différentes valeurs des proportions de paysans dans les différentes modalités possibles de règle de changement de règles.

Cette série de modifications a des effets comparables à ceux obtenus pour la première série concernant l'apprentissage individuel. Les effets ne concernent essentiellement que les scénarios issus de S_4 . Sept de ces derniers passent dans la classe *viable*. Tous gardent le même type de comportement que celui observé pour les simulations de S_4 , les différences portent sur le niveau d'intensité culturelle atteint par les simulations dans la phase de décroissance lente comme le montre la Figure 49.

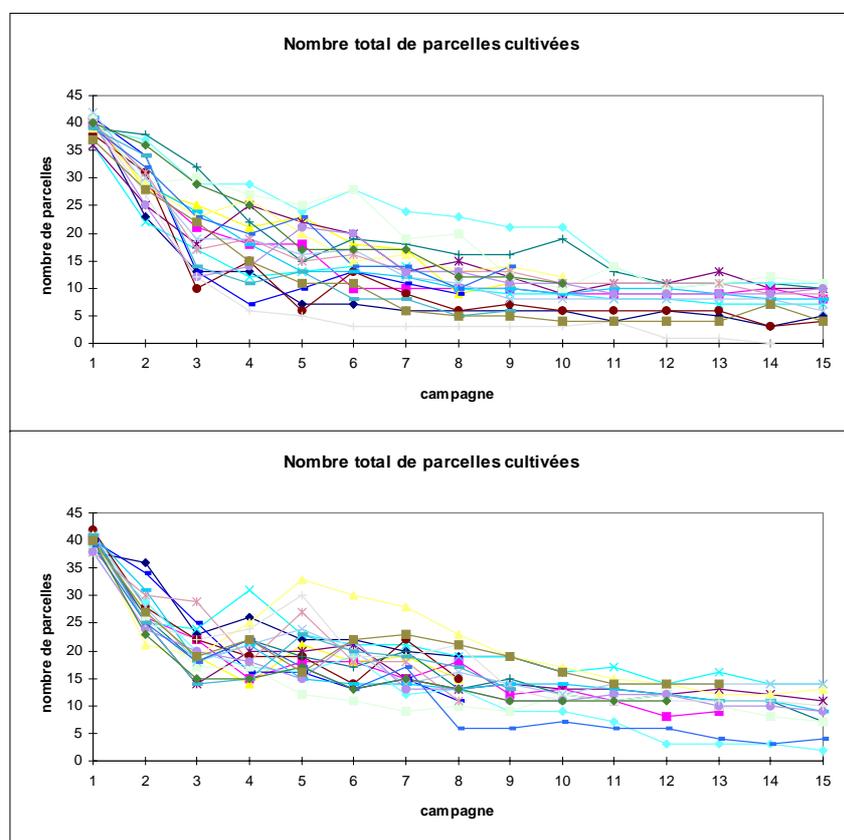


Figure 49 : séries de trajectoires de simulations de deux scénarios issus de S_4

Comme pour les modifications correspondant à l'apprentissage individuel, aucune valeur de modalité du critère d'évaluation ne semble avoir un effet particulier. Les scénarios issus des autres scénarios initiaux ne donnent lieu à aucune modification significative. Le paysage est

donc également peu accidenté dans les directions relatives aux populations de critères d'évaluation.

4.3.4 Autour de l'évaluation collective

La quatrième série de modifications concerne l'évaluation de fin campagne faite par chaque groupe : critère d'évaluation du déroulement d'une campagne pour chaque groupe pour différentes valeurs de leurs règles de changement de règles.

Les résultats observés au § 4.3.2 concernant la valeur de la modalité de la règle de changement de règles du groupe de raison pompage sont confirmés pour chaque scénario initial. Cet effet est plus fort que le lien observé au § 4.1.3 concernant une corrélation entre le critère d'évaluation des groupes de raison crédit et la viabilité du scénario qui n'est plus vérifiée ici.

Nous venons de mettre en œuvre le plan d'expérience présenté à la fin du chapitre précédent à la suite de la description des terrains étudiés et du modèle construit pour les représenter. L'ensemble de simulations décrit ci-dessus a montré un système irrigué virtuel au comportement assez variable, aussi bien d'un scénario à un autre que d'une simulation à une autre pour un scénario donné. Une étude des simulations de 100 scénarios aléatoires a néanmoins permis de constituer une partition de cet ensemble en classes de viabilité en fonction du taux de simulations viables réalisées pour chaque scénario. Peu de corrélations entre ces classes de viabilité et les populations de règles mises en œuvre ont été observées. De même, la variabilité induite par les paramètres liés aux réseaux d'affinité sociale ou à l'apprentissage en différents points de l'espace des scénarios est faible et peu corrélée à des valeurs particulières de ces paramètres sauf dans le cas de la règle de changement de règles du groupe de raison #pompage.

Ces résultats de simulations constituent un point de départ vers une nouvelle étape dans notre démarche de modélisation d'accompagnement pour la compréhension de la viabilité des systèmes irrigués : il s'agit maintenant *via* leur interprétation d'arriver à de nouvelles questions sur le terrain, sur sa représentation et à de nouvelles expériences de simulation.

TROISIEME PARTIE :

DES SIMULATIONS AU TERRAIN ET RETOUR AU MODELE

A partir des résultats du plan d'expérience présentés au chapitre précédent et de l'ensemble de la démarche, depuis le terrain jusqu'à la conception du plan d'expériences en passant par la construction du modèle, la discussion va être maintenant menée selon deux axes : les éléments de réponse apportés par ces simulations pour la problématique initiale d'une part, la méthode utilisée d'autre part.

La problématique initiale posée à la fin du premier chapitre concernait les liens entre les modes de coordination et la viabilité des systèmes irrigués. En quoi la modélisation et les simulations précédentes permettent-elles de traiter cette question et qu'apportent-elles ? Il s'agira de discuter la cohérence des hypothèses sur la viabilité des systèmes irrigués induites par cette démarche avec les approches usuellement rencontrées, aussi bien dans une perspective de compréhension du fonctionnement des systèmes irrigués que dans une perspective "d'action pour le développement". Des propositions de modification de ces dernières approches pour des opérations de conception ou de réhabilitation de systèmes irrigués sont proposées en conséquence.

La méthode employée mérite aussi discussion : sa pertinence pour aborder la problématique initiale constitue le cœur de ce travail. C'est l'objet du deuxième et dernier chapitre de cette partie. Son choix repose d'une part sur l'intérêt pour traiter cette question de méthodes et d'outils issus d'autres domaines de connaissance comme la gestion des ressources en propriété commune et les systèmes multi-agents, d'autre part sur des limites observées sur des méthodes utilisées habituellement. Il s'agit alors non seulement de discuter de l'intérêt *a posteriori* de ces outils et méthodes pour la question de la viabilité des systèmes irrigués, mais aussi de vérifier que les limites observées sur les méthodes antérieures ne se posent plus dans les mêmes termes pour la démarche mise au point et utilisée.

5. Des simulations à la viabilité des systèmes irrigués

Les scénarios simulés ont été décrits par un ensemble de paramètres. Les simulations permettent de discuter de l'effet éventuel de chaque paramètre pris individuellement ou de scénarios considérés globalement ou encore des variations de quelques paramètres du scénario en différents en différents points de l'espace des paramètres.

Dans un premier temps, l'effet ou l'absence d'effet des différents paramètres va permettre de discuter d'une part des différents types de conséquences qui peuvent être tirées des résultats des simulations et d'autre part de proposer des explications relatives à la viabilité des systèmes irrigués en fonction de ces résultats. Bien souvent le caractère exploratoire de la démarche ne permettra d'émettre que des hypothèses à vérifier par de nouvelles simulations sur des scénarios à concevoir spécifiquement et/ou par un retour sur le terrain, dans une nouvelle phase de la démarche de modélisation d'accompagnement déjà utilisée.

Dans un deuxième temps, la discussion sur la viabilité des systèmes irrigués approfondira un point particulier ressortant des simulations : les liens entre viabilité et modes de coordination concernent non seulement la coordination entre les paysans mais aussi entre les différents niveaux d'organisation.

5.1 Discussion de l'effet de quelques paramètres des scénarios

5.1.1 Quelques paramètres semblent avoir de l'importance

Les résultats des simulations présentés au chapitre précédent ont montré que quelques paramètres paraissent en partie explicatifs de la classe de viabilité obtenue. Il s'agit maintenant d'interpréter ces explications éventuelles à la lumière des différents processus dans lesquels interviennent ces paramètres ainsi que des pratiques observées sur le terrain ou recommandées dans la littérature.

Le statut social

Les résultats des simulations semblent montrer que, plus il y a de paysans dans la classe #laam, la plus élevée de la représentation du statut social, plus la probabilité que le scénario soit viable ou un peu viable est basse, et inversement que plus la proportion de paysans dans la classe la plus basse est grande, plus la probabilité que le scénario soit viable ou un peu viable est élevée.

Or, dans le modèle, le statut des paysans, hormis le choix des responsables des différents groupes dans certains cas, ne joue que *via* les prêts ou les dons. Un agent de la classe #Paysan ne demande un prêt, ou le cas échéant une aide pour payer la dépense quotidienne, qu'à un groupe ou à un paysan de statut social égal ou supérieur au sien parmi les membres de son réseau d'affinité sociale. La dépense quotidienne est également croissante avec le statut social du paysan : il y a plus de monde à déjeuner chez un noble que chez un descendant de captif.

Cette représentation concerne les conséquences d'ordre économique de l'existence d'une hiérarchie sociale. La plupart des valeurs au travers desquelles s'exprime la hiérarchie sociale et se reconnaissent les membres d'une même classe, telles que le sens de l'honneur propre aux tooroBe pour lequel ils ne refuseront jamais un prêt (Wane, 1969), ne sont prises en compte que *via* certaines de leurs conséquences pour les processus en œuvre dans les systèmes irrigués. Cette représentation ne prend pas en compte les avantages éventuels dus à leur rang que peuvent avoir les paysans de statut social élevé, en particulier ceux relatifs au pouvoir associé à ce statut : dans le système de production antérieur, les terres étaient contrôlées par une partie de la société dont un élément du pouvoir tenait à la redistribution des terres à cultiver lors de chaque décrue puis à la redistribution des produits des cultures (Magistro et al., 1994).

Du point de vue du modèle, il n'est pas surprenant que les résultats des simulations indiquent une moins bonne viabilité pour des scénarios où la majorité des paysans est dans la classe de statut social le plus élevé : ils ont plus de dépenses et moins de sources de revenus. Ces résultats sont néanmoins intéressants non seulement pour la confiance dans le modèle à laquelle il participe comme il sera discuté plus loin, mais aussi pour la compréhension de la viabilité des systèmes irrigués.

En effet, la non prise en compte des avantages dus à leur rang des paysans de statut social élevé dans le modèle vient d'une caractéristique propre aux systèmes irrigués observés : ils ne sont pas un lieu d'expression du pouvoir associé à un statut social élevé. Cela ressort notamment de l'un des entretiens au cours duquel un noble s'est plaint qu'il ne faisait plus bon être noble aujourd'hui au Fuuta Tooro. La manière dont les systèmes irrigués sont arrivés dans la région les a placés en porte-à-faux relativement au fonctionnement de la société locale. Le facteur économique, dont la neutralisation était la condition de stabilité des relations sociales grâce à un système de redistribution de la production (Magistro et al., 1994), s'est retrouvé au centre de la dynamique du nouveau système de production. L'emprise de l'irrigation sur le milieu a participé à la régression des systèmes de production antérieurs. Le principe sous-jacent au système de production irrigué, basé sur une augmentation et une sécurisation de la production agricole, a mis en dehors du système de

production une des composantes fondamentales des relations entre les membres de la société locale. La viabilité des systèmes irrigués se serait retrouvée ainsi fragilisée.

Cette hypothèse sur un lien entre la médiocre viabilité des systèmes irrigués observés et la modification du rôle joué par la hiérarchie sociale dans le système de production local ne nécessite pas de nouvelles simulations. Dans ce cas, l'usage du modèle a permis de retrouver des résultats déjà acquis par d'autres méthodes (Boutillier et Schmitz, 1987). Ceci montre la cohérence de notre démarche avec d'autres approches, renforçant ainsi sa crédibilité pour la suite.

L'interprétation de l'effet de ce paramètre décrivant les statuts sociaux des paysans montre au passage que sur une question où la complexité n'est pas à proprement parler en jeu, les résultats des simulations peuvent être compris à la lumière de connaissances déjà acquises par d'autres approches parmi celles présentées au chapitre 2. Il s'agit ici en particulier des approches rentrant dans la gamme des travaux en "gestion sociale" de l'eau. Cet exemple ne renvoie pas à de nouvelles questions spécifiques au terrain ni à de nouvelles simulations.

Critère d'évaluation des groupes d'accès au crédit

La corrélation observée entre les critères d'évaluation des groupes d'accès au crédit et la viabilité des systèmes irrigués est plus difficile à interpréter. En effet parmi les deux critères globaux, le critère lié à la consommation d'eau n'a pas de sens pour les groupes d'accès au crédit : ils n'ont aucun moyen d'évaluer leurs règles selon cet indicateur puisque l'information de la consommation d'eau de leurs membres n'existe pas. Si une telle valeur est affectée par un scénario à un groupe d'accès au crédit, elle est remplacée dans chaque simulation par l'un des autres critères pris aléatoirement parmi l'ensemble des valeurs possibles pour l'attribut #critère. Par contre dans le cas du groupe de raison #pompage pour lequel cet indicateur a un sens, il ne semble plus être explicatif.

Cet élément d'observation des résultats doit également être interprété relativement au terrain. Comment un critère d'évaluation, qui est parfois dérivé d'un objectif venant de l'extérieur du système, est interprété et mis en œuvre par le groupement concerné s'il n'est pas pertinent pour ce dernier ? Cela peut être le cas par exemple d'un GIE dont le domaine de compétence se limite au crédit et à qui il est demandé de participer à la limitation de consommation en eau du périmètre par le bailleur de fonds auprès duquel il s'approvisionne.

Cette question n'a pas à proprement parler été travaillée par les simulations et, ni le modèle tel qu'il est ni une analyse des connaissances acquises sur le terrain ne permettent de bien y répondre. Il faudrait pour cela s'intéresser aux conflits d'intérêt entre les entités internes au

système et l'environnement de celui-ci. Pour cela il n'est pas certain qu'un approfondissement du modèle dans cette voie soit nécessaire pour aller plus loin sur cette question uniquement : des approches basées sur l'analyse des conflits peuvent suffire. Ces approches sont à rapprocher du type de celle menée par Schmitz sur les conflits récents dans la vallée du Fleuve Sénégal (Schmitz, 1993). Mais comme elles devraient ici être ciblées sur les conflits entre différents niveaux d'organisation, elles peuvent aussi être replacées dans le contexte d'études sur les ordres contradictoires (Watzlawick et al., 1972) : les GIE peuvent en effet recevoir sous forme d'incitations de la part d'entités dont ils dépendent, tels que des bailleurs de fonds par exemple, des ordres correspondant à un champ hors de leurs compétences. Un cas extrême consisterait dans un groupement dont la raison est l'accès au crédit et à qui il est demandé de participer à la diminution de la consommation en eau. Il s'agirait alors d'interroger le terrain sur l'autonomie des GIE dans le processus d'évaluation du déroulement d'une campagne. Dans un premier temps, si les informations correspondantes s'avèrent difficiles à obtenir, un autre moyen de prendre en compte cette difficulté au niveau du modèle est de reprendre le modèle en supprimant la possibilité de critères non pertinents dans l'écriture des scénarios et de tester si la corrélation observée persiste.

Existence d'un chef au groupe de raison #pompage.

En ce qui concerne l'existence d'un chef pour le groupe de raison #pompage et la situation de sa parcelle dans le périmètre qui semble être corrélée à la viabilité des scénarios, le rôle de celui-ci dans le modèle apparaît à deux niveaux. Quand il existe un chef, ce dernier intervient notamment dans l'évaluation du déroulement de la campagne au cas où la modalité du critère d'évaluation du groupe est #membres : le chef doit être inclus dans la majorité de membres du groupe satisfait, ce qui revient à lui accorder un droit de *veto*. Il intervient aussi pour la diffusion de l'information dans certaines modalités de perception des règles et de communication entre les groupes et les individus. L'existence d'un chef dans le groupe de raison #pompage facilite en particulier la diffusion de l'information relative aux conditions d'autorisation de démarrage de la campagne : si la modalité de communication entre individus et groupe est #préférentiel et s'il y a un chef dans le groupe, tous les membres de son réseau d'affinité sociale ont accès à l'information sur les conditions qu'ils doivent remplir pour avoir droit de faire la campagne ou sur le démarrage effectif de la station de pompage. Ceux-ci peuvent alors faire fonction d'autant de relais pour la diffusion de l'information auprès des autres paysans *via* leur réseau d'affinité sociale.

Cependant ceci n'implique pas *a priori* la situation de la parcelle du chef du groupe dans le périmètre. Or ce n'est pas l'existence d'un chef au groupe de raison #pompage qui est corrélée à la viabilité mais bien l'existence d'un chef choisi en fonction de la position de sa parcelle⁸⁷ : la corrélation disparaît en effet si on considère tous les scénarios pour lesquels le groupe de raison #pompage a un chef, quel qu'il soit.

La situation de la parcelle du responsable n'intervient donc pas directement pour expliquer cette corrélation. Pour prendre en compte les conséquences induites pour le paysan ayant le rôle de responsable par la position de sa parcelle à l'amont du périmètre, on peut faire l'hypothèse qu'il a une probabilité de satisfaction individuelle du déroulement d'une campagne plus élevée. Ceci se traduit en une probabilité de satisfaction également plus élevée pour le groupe si le critère d'évaluation collectif est #membres. Mais un croisement avec cette modalité de critère d'évaluation, même si elle porte sur des effectifs faibles, ne semble pas confirmer cette hypothèse.

Alors cette corrélation serait-elle un artefact ? peut-être. Elle n'en indique pas moins un thème d'approfondissement à considérer pour la compréhension de la viabilité des systèmes irrigués, car en général, les systèmes irrigués d'origine exogène, tels ceux de la Vallée du Fleuve Sénégal, sont constitués avec un parti pris d'égalité dans l'attribution des parcelles. Les parcelles sont théoriquement tirées au sort⁸⁸ pour les responsables comme pour les autres, et effectivement dans les aménagements suivis, les parcelles des responsables ne paraissent pas les mieux situées.

Un approfondissement sur ce thème devrait se faire selon deux voies. Dans un premier temps, il faut retourner vers l'étude du comportement du modèle par rapport à ce facteur afin de vérifier qu'il ne s'agit pas d'un artefact et, si tel n'est pas le cas, comprendre à quel niveau de la représentation du système irrigué se situent des explications possibles de cette corrélation. Il s'agit là de remonter à l'articulation du terrain au modèle pour, dans un deuxième temps éventuellement, retourner sur le terrain vérifier les hypothèses issues de nouvelles simulations pour comprendre ce rôle du chef.

Si cette importance de la place de la parcelle du chef du groupement s'occupant de la station de pompage au sein du système irrigué se vérifie, il s'agit là d'une remise en cause d'une pratique de conception des aménagements couramment rencontrée : l'égalité dans la répartition des parcelles irriguées. Un avantage pour les responsables se rencontre

⁸⁷ Ce qui pour le modèle est équivalent à une attribution de la parcelle la mieux placée au chef.

⁸⁸ C'est en tout cas au minimum dans les recommandations qui accompagnent la mise en place de la plupart des aménagements.

cependant dans un certain nombre de systèmes irrigués anciens : il s'agit de l'octroi d'un avantage incitant celui qui en bénéficie à ne pas abuser de sa position. Ceci se rencontre dans de nombreux cas de gestion de ressources en propriété commune (Ostrom, 1990). Les responsables ont par exemple un privilège dans l'accès ou dans la répartition des accès à l'eau ou à la terre au sein de l'aménagement eu égard à leur fonction, comme c'est par exemple le cas en sultanat d'Oman (Le Cour Grandmaison, 1984).

Homogénéité de la population de paysans

Les simulations semblent aussi montrer une corrélation entre le degré d'homogénéité de la population des paysans du point de vue de leurs objectifs et la viabilité des systèmes irrigués. Les scénarios avec une forte homogénéité autour de l'un des quatre objectifs⁸⁹, de même que les scénarios avec une répartition en proportions semblables pour chaque objectif sont moins viables que les cas intermédiaires, comprenant un minimum de diversité mais pas trop.

L'objectif de chaque paysan intervient dans différents processus au cours d'une simulation. Il apparaît pour les choix d'investissement auxquels sont associées des valeurs de rendement potentiel. Il apparaît aussi pour la fréquence et la régularité des déplacements des paysans pour aller contrôler l'état de leur parcelle ou pour aller chercher du crédit. Ils interviennent également dans le respect de la règle d'attribution de l'eau s'ils estiment que leur parcelle a besoin d'eau et qu'ils ne sont pas autorisés à irriguer ni par le groupement ni par le paysan ayant le tour d'eau. Ils interviennent enfin dans l'accès à un revenu extérieur dans le cas où la modalité correspondante est #selonObjectif.

La tendance vers la non viabilité des scénarios dont la population d'objectifs est très hétérogène peut s'expliquer par les hypothèses mises dans le modèle : la fréquence et la régularité du déplacement d'un paysan sur sa parcelle variant d'un objectif à un autre, il se poserait plus de problèmes de coordination dans l'accès à l'eau *via* des conflits d'accès à l'eau plus nombreux. Ceci induirait une intensité culturelle plus faible et donc une moindre viabilité du système irrigué simulé.

Une réponse collective à un risque pour le système lié à la variabilité importante des conditions extérieures pourrait constituer une explication à la nécessité d'un minimum de diversité. Cependant cette variabilité du contexte n'est pas représentée dans le modèle suite aux hypothèses présentées au § 3.1. Il n'y a pas d'aléa représenté dans SHADOC variant

⁸⁹ pour mémoire, ces objectifs sont #production, #nourriture, #foncier et #fauteDeMieux.

d'une campagne sur l'autre de sorte que les paysans avec un objectif donné puissent être favorisés à une campagne et les paysans avec un autre objectif à une autre campagne. Ceci ne remet pas en cause l'hypothèse de gestion du risque par la variabilité des comportements, qui serait le pendant au niveau collectif des observations faites au niveau individuel : les agronomes nous ont montré que, dans un environnement risqué, les paysans ont individuellement tendance à diversifier leurs sources de revenus pour diminuer le risque (Milleville, 1989). Des phénomènes de gestion collective du risque au travers de réseaux sociaux ont été observés dans d'autres contextes par des anthropologues (Hegmon, 1989). Dans ces derniers cas la réduction du risque passe par des échanges entre les membres de ces réseaux sociaux, les membres du réseau moins touchés lors d'une campagne donnée peuvent couvrir les besoins des membres les plus touchés, selon la réalisation de l'aléa les échanges se font dans un sens puis dans un autre.

De tels échanges, interprétés ci-dessus comme une gestion collective du risque, sont à double sens pour un type de bien donné. Ce n'est plus le cas dans le cas de spécialisations d'activités : les échanges d'un type de biens se font alors dans un seul sens. Or dans le système représenté, un des processus dans lesquels interviennent les objectifs des paysans n'a pas encore été pris en compte : l'accès différencié au revenu extérieur quand la modalité de cet accès est #selonObjectif. La population de scénarios correspondante est trop restreinte pour des tests statistiques mais le tableau de contingence présenté ci-dessous semble indiquer que pour cette population, les scénarios de classe intermédiaire du point de vue de l'homogénéité des objectifs des paysans sont plus souvent de classe *viable* ou *un peu viable*.

	non viable	(un peu) viable	total
hétérogène	4	3	7
moyen	2	9	11
homogène	4	2	6
total	10	14	24

Tableau 17 : table de contingence associée au paramètre d'homogénéité des objectifs des paysans du système irrigué pour les scénarios où il existe un revenu extérieur.

Ceci peut s'interpréter par une spécialisation des paysans représentés : schématiquement, dans cette situation particulière d'accès à des revenus extérieurs au système, certains paysans captent la ressource extérieure et d'autres s'occupent de la culture. Ceci est concordant avec l'observation mentionnée à la fin du § 4.1.1 de paysans se transformant en relais bancaire. La nécessité d'un minimum de diversité dans les objectifs des paysans

pourrait alors s'interpréter comme une complémentarité des différents objectifs dans le fonctionnement du système irrigué. Ceci renforce l'hypothèse initiale de l'importance de la prise en compte des modes de coordination entre les paysans, dont font partie les échanges résultant d'une spécialisation éventuelle, dans la viabilité d'un système irrigué. Si cette relation peut s'envisager à partir de la lecture des hypothèses et de la description des scénarios dans le cas d'une modalité d'accès aux revenus extérieurs #selonObjectif, cette complémentarité reste à comprendre dans les autres cas, même si elle n'y est pas aussi marquée.

Cet exemple à partir de l'homogénéité des objectifs des paysans montre l'intérêt de la méthode utilisée aussi bien pour la modélisation que pour la démarche d'analyse du terrain. Tout d'abord, l'intérêt de l'utilisation d'un tel modèle comme outil de représentation et de simulation de processus complexes apparaît ici. La corrélation observée est en effet plus difficile à interpréter directement à partir du modèle que les paramètres discutés précédemment, car elle implique des interactions entre les acteurs dans différents processus et non plus dans un processus unique ou *via* des paramètres globaux. L'intérêt de la démarche d'analyse basée sur les modes d'appropriation et les processus de décision dans le cas, le plus fréquemment rencontré, où la relation d'une société à son milieu passe par la mobilisation collective de plusieurs types de ressources est ici vérifié. ***L'hypothèse précédente de spécialisation relative des activités des paysans dans certains contextes pour expliquer l'effet positif de la diversité de la population du système pour sa viabilité n'a pu être émise que parce que la représentation du système qui a été faite comprend l'accès à deux ressources, l'eau et le crédit, selon des modalités variées et avec des objectifs variés.*** Si le système irrigué est considéré comme le lieu de mobilisation d'une seule ressource, l'eau, cette hypothèse ne peut apparaître et les recommandations pour améliorer la viabilité du système irrigué vont vers une moindre diversité des comportements pour améliorer la coordination entre les paysans.

Il reste à vérifier cette hypothèse par un retour sur le terrain afin de s'interroger sur la réalité de cette diversité et sur la manière dont elle est perçue par les paysans comme par les responsables des groupements. Cette observation sur les simulations, si elle se confirme au travers d'une telle confrontation au terrain, remet en question une pratique usuelle des projets de développement : la formation de "paysans modèles" dont on attend qu'ils fassent tâche d'huile pour diffuser les bonnes méthodes de travail. Il ne s'agit pas nécessairement d'une remise en cause, car d'un côté il s'agit de diffuser des pratiques et d'un autre côté il s'agit d'une diversité d'objectifs de mise en culture. Ce sont deux niveaux différents : les pratiques sont mises en œuvre pour satisfaire un objectif. La démarche de formation de "paysans modèles" porte sur les pratiques, elle n'a pas d'effet *a priori* sur la diversité des

objectifs des paysans. On peut s'interroger cependant dans certains cas sur ses chances de succès : pourquoi aller imiter une pratique d'un paysan dont l'objectif n'est pas le même que le sien ? et quand bien même on l'imiterait, cette pratique sera-t-elle satisfaisante pour tous les objectifs existant parmi la population du système ?

Outre les perspectives données sur la compréhension de la viabilité des systèmes irrigués, ces quelques exemples illustrent ainsi divers usages en recherche qui peuvent être faits du modèle et des résultats des simulations : mise en évidence d'une nouvelle question à prendre en compte, vérification du modèle conceptuel, de sa cohérence avec son implémentation, renvoi à des cadres théoriques d'analyse des systèmes irrigués et de pratiques de développement autour des systèmes irrigués.

5.1.2 D'autres paramètres semblent ne pas avoir d'importance

Si les simulations ont mis en évidence quelques corrélations, cela ne concerne en fait qu'une faible partie des paramètres permettant de décrire les scénarios. Les autres paramètres semblent ne pas avoir d'effets particuliers allant dans le même sens pour la plupart des scénarios dans le cadre des hypothèses de représentation. Or parmi ces derniers, certains sont parfois l'objet de débats pour la conception de modèles viables de systèmes irrigués. On s'intéressera en particulier à la taille des aménagements, à la prise en compte des structures sociales préexistantes, au mode d'allocation de l'eau entre les attributaires et aux règles d'accès au système irrigué.

Taille des aménagements : cohérence avec d'autres études de cas

Dans le courant "Small is beautiful" et suite aux échecs observés de plusieurs grands systèmes irrigués, la taille des aménagements en superficie et en nombre de paysans est devenue l'enjeu de débats (Hunt, 1989). Ces derniers ont opposé la croissance des difficultés de coordination entre les paysans avec la taille des systèmes irrigués aux avantages d'une grande taille dont les économies d'échelle et à l'existence de solutions variées au problème de coordination dans des grands aménagements existant depuis longtemps (Tang, 1992).

SHADOC ne permet pas de prendre en compte l'étendue des variations des tailles d'aménagement rencontrées, même en se limitant à la vallée du Fleuve Sénégal. Ici les périmètres aléatoires simulés ont des tailles variant de 30 à 100 parcelles. Les ordres de grandeur des tailles des périmètres observés varient de 10 à 1000. Un grand système irrigué centralisé du type décrit par Wittfogel n'est pas représenté par SHADOC pour ce qui

concerne les effets éventuels dus à sa taille. La discussion ne peut concerner ici que des systèmes irrigués de petite taille⁹⁰ ou des parties de systèmes de grande taille fédératifs⁹¹.

Les hypothèses de représentation faites pour SHADOC impliquent que c'est essentiellement sur la taille des groupes au sein desquels doivent avoir lieu les mécanismes de coordination que les variations de taille peuvent avoir un effet, que ces mécanismes concernent l'accès à l'eau ou au crédit. En effet, la taille du bief croît linéairement avec les tailles des irrigateurs, lesquelles augmentent par palier avec le nombre de parcelles : on peut donc faire l'hypothèse que l'effet des différents choix de structure de taille sur l'approvisionnement en eau sont limités, autrement dit l'eau ne manque pas *a priori* plus pour une structure de taille que pour une autre. D'autre part, les seuls coûts collectifs pris en compte dans le modèle sont ceux relatifs à l'achat de gasoil pour le pompage, or la consommation de gasoil est supposée proportionnelle à la consommation d'eau qui est elle-même la somme des consommations des parcelles et des débordements des canaux. Il n'y a que pour ces derniers que d'éventuelles "économies d'échelle" pourraient avoir lieu quand la taille de l'aménagement s'accroît, mais ces débordements peuvent également être vus comme une résultante de la coordination entre les paysans pour l'accès à l'eau.

De même que par l'analyse d'un grand nombre d'études de cas, Tang montre que les grandes variations de taille paraissent ne pas avoir d'effets sur les performances des systèmes irrigués (Tang, 1992), les résultats des simulations montrent que les petites variations de taille semblent ne pas avoir non plus d'effets sur la viabilité des systèmes irrigués dans le cadre des processus représentés, que la taille varie en nombre total de parcelles ou que ce soit la répartition de l'amont à l'aval du bief principal des irrigateurs comportant un grand nombre de parcelles qui varient. Les résultats des simulations présentés ne permettent ainsi pas d'indiquer un lien entre la qualité des modes de coordination pour la viabilité des systèmes irrigués et la taille de ceux-ci, même si les variations envisagées sont d'amplitude relativement faible.

Sur cet exemple, les simulations ont permis de participer à une discussion en cours dans une approche des aménagements du point de vue de leur structure. Ces paramètres de taille sont en effet l'objet d'une attention toute particulière dans de nombreux projets d'aménagement. Ainsi pour la conception de nouveaux systèmes irrigués, les études comportent une composante "socio-économique" dont l'un des objectifs principaux est l'évaluation du nombre de bénéficiaires potentiels dans les villages concernés par un projet

⁹⁰ type PIV au Sénégal.

⁹¹ telles que les Unités Autonomes d'Irrigation dans les grands périmètres étudiés.

afin de calculer la main d'œuvre disponible et d'y appliquer des ratios définis au préalable pour l'attribution de parcelles aménagées. Cette priorité accordée à la question des paramètres liés à la taille paraît perdre cette importance si on s'intéresse seulement à la question de la viabilité d'un système irrigué.

La non corrélation entre les classes de viabilité des scénarios simulés et le nombre de groupes d'accès au crédit va dans le même sens en travaillant sur des tailles de sous-groupes de la population totale au sein desquels une coordination est nécessaire. La question de la coordination de ces sous-groupes amène à s'interroger sur un autre paramètre fréquemment discuté pour la viabilité des systèmes irrigués : la prise en compte des structures sociales préexistantes dans la constitution de ces sous-groupes.

prise en compte des structures sociales préexistantes.

La littérature sur la gestion des systèmes irrigués, en particulier l'approche "gestion sociale", insiste souvent sur le manque de prise en compte des structures sociales existantes, dans la conception des systèmes irrigués. Le débat porte alors sur la nécessité de caler les associations ou groupements d'utilisateurs mis en place sur des structures sociales existantes pour faciliter la coordination entre les agents (Hecht, 1990 ; Tang, 1992) ou au contraire sur la division de groupes sociaux existant entre plusieurs associations d'utilisateurs pour limiter les conflits entre celles-ci (Coward, 1979).

Dans la représentation utilisée dans SHADOC, le paramètre "homogénéité" des scénarios peut représenter une démarche volontariste de prise en compte des réseaux d'affinité sociale existant lors de la conception d'un système irrigué. Il s'agit de faire correspondre les compositions des réseaux d'affinité sociale et des groupes au sein desquels doit se faire la coordination pour l'attribution de l'eau et / ou pour l'accès au crédit. Une valeur *#true* de ce paramètre revient à se mettre dans les conditions de la première hypothèse du paragraphe précédent en la poussant à l'extrême dans une adéquation totale entre associations d'utilisateurs et structures sociales existantes. Une valeur *#false* rapproche des conditions de la seconde.

Or les simulations présentées aux § 4.1 et 4.2 montrent qu'il n'y a ni corrélation entre ce paramètre et la viabilité du scénario ni effet particulier d'un changement de ce paramètre pour des scénarios donnés. Il n'y a ni avantage ni désavantage à superposer les groupes liés à des tâches particulières au sein du système irrigué aux réseaux sociaux locaux. La deuxième hypothèse, à savoir qu'il est préférable d'avoir une division des réseaux sociaux existant entre les différents groupes pour la résolution des conflits entre ces derniers, n'est pas réellement testée dans ces simulations. Cependant on peut considérer qu'une valeur

#faux du paramètre #homogénéité en constitue une version dérivée. Cette dernière implique en effet la possibilité d'intersections entre les différents réseaux permettant ainsi aux informations de diffuser plus largement même si c'est en plusieurs étapes : la division des réseaux d'affinité sociale ne permet pas dans ce cas d'éviter les conflits mais de favoriser les échanges entre les paysans de l'ensemble du système, ce qui peut être considéré comme équivalent si l'on fait l'hypothèse que une des conséquences des conflits à l'intérieur des systèmes irrigués est de freiner la diffusion de l'information. Dans ce cas l'absence de corrélation entre ce paramètre #homogénéité et la viabilité d'un scénario peut être interprétée de différentes manières :

les deux hypothèses sont fausses.

les deux hypothèses sont vraies et se compensent.

selon le contexte des autres paramètres d'un scénario donné, c'est une hypothèse ou l'autre qui est vérifiée.

Les résultats de ces simulations doivent être complétés pour répondre à la question par des enquêtes spécifiques sur le terrain ou de nouvelles simulations. Ils permettent d'apporter des éléments dans la discussion des deux hypothèses. Le modèle réalisé peut donc constituer un outil de discussion entre différentes approches sur la viabilité des systèmes irrigués.

L'explication fondée sur une compensation des deux hypothèses aussi vraies l'une que l'autre peut être testée par de nouvelles simulations faisant varier ce paramètre #homogénéité dans différents contextes de la même manière que les effets des réseaux sociaux et des règles d'apprentissage ont été étudiés. Une nouvelle série de simulations correspondante serait aussi l'occasion de différencier ce paramètre d'homogénéité en fonction des différents types de groupements pour ensuite s'intéresser aux processus spécifiques pour lesquels la coordination entre les paysans se fait au sein de groupements homogènes avec les structures sociales extérieures au système irrigué. Il y a là un réel travail de conception de nouveaux scénarios afin d'affiner la compréhension du fonctionnement du modèle.

L'analyse relative à ce paramètre #homogénéité renvoie au niveau du terrain à une série d'enquêtes auprès des paysans et des responsables de groupements des trois points proposés ci-dessus pour expliquer l'absence de corrélation observée.

Attribution de l'eau.

Parmi les différentes règles collectives mises en œuvre dans un système irrigué, la règle d'attribution de l'eau est la plus souvent discutée dans la littérature (Scheer, 1996) et peut varier dans une gamme de modalités assez large (Martin et Yoder, 1988 ; Gilot, 1994). Dans

la plupart des cas, il est supposé que cette règle est très importante pour la viabilité du système irrigué et doit en conséquent être convenablement formulée.

Dans ce modèle elle est en fait assez peu discutée car elle s'est avérée ne pas avoir autant d'importance qu'il lui en était accordé dans la première version, dont elle constituait un élément central (Barreteau et al., 1997). Cependant les simulations sur la dernière version confirment que l'existence d'un tour d'eau n'est pas déterminante pour la viabilité des systèmes irrigués représentés, dans la mesure où des ajustements par des échanges de services entre les paysans le long d'un même irrigateur sont possibles. Il n'y a en fait alors pas beaucoup de différences entre les deux modalités.

La règle d'allocation de l'eau dans la conception de systèmes irrigués ne paraît donc pas déterminante en elle-même pour la viabilité du système. Le modèle SHADOC peut néanmoins être utilisé pour une discussion plus poussée autour de cette règle, notamment pour comparer l'effet de différents modes d'allocation de l'eau. Une telle discussion nécessiterait de nouvelles simulations. Celles-ci pourraient alors être orientées par l'hypothèse que la souplesse induite par les possibilités d'échanges de services entre paysans dans le cadre d'une règle d'allocation contraignante, telle qu'un tour d'eau quel qu'il soit, facilite la coordination entre des paysans aux objectifs et disponibilités différents. Il s'agirait par exemple de tester des croisements particuliers de paramètres relatifs à la règle d'allocation de l'eau, à l'autorisation d'échanges de tours d'eau et à l'homogénéité des objectifs des paysans. Une réflexion particulière est à mener pour constituer ces nouveaux scénarios en relation avec des questions que pourraient se poser des utilisateurs du modèle pour des terrains particuliers.

Autorisation de participer à la campagne

Il reste enfin les règles collectives liées à l'autorisation de participer à une campagne et à la fixation de la redevance. Historiquement elles ont également été assez souvent discutées dans une perspective d'équilibre budgétaire, généralement *via* la perception d'une redevance hydraulique (Scheer, 1996). Il n'était pas dans les objectifs des simulations présentées au § 4.1 d'approfondir cette question, cependant l'absence de corrélation observée ne montre pas un effet important pour la viabilité des systèmes irrigués de règles laxistes de ce point de vue.

Cette non corrélation observée sur les résultats des simulations va dans le même sens pour les coûts de pompage seuls que les observations de Oorthuizen et Kloezen. Ces derniers ont montré, à partir d'une étude de cas aux Philippines, que l'autonomie financière n'a pas amélioré la qualité de la maintenance (Oorthuizen et Kloezen, 1995).

Cette question d'équilibre budgétaire et d'autonomie financière mérite d'être replacée dans le contexte plus large des principes d'une gestion viable des ressources en propriété commune : en excluant à une campagne donnée les paysans dont l'endettement est trop élevé, elle constitue en fait une réduction du principe selon lequel l'ensemble des bénéficiaires de la ressource doit avoir une frontière clairement délimitée (Ostrom, 1990 ; Ostrom, 1992). Ceci pose alors deux questions quant à la mise en avant fréquente actuellement de ces questions d'équilibre budgétaire et d'autonomie financière : des règles de délimitation de l'ensemble des ayant droits à une campagne donnée basées sur ces seuls critères permettent-elles d'établir des limites claires et précises ou d'autres modes de délimitation doivent également être imaginés ?

Ceci renvoie à l'analyse du terrain vers le mode de détermination de qui est autorisé à participer à la campagne. Si l'endettement des paysans est pris en compte, ce n'est pas le seul paramètre. Nous avons vu au § 3.1 que d'autres paramètres tels que le statut social, le rôle au sein du bureau du groupement ou des relations sociales particulières avec des membres du bureau ayant cette capacité d'autoriser un paysan à participer à la campagne peuvent jouer. Il s'agirait d'approfondir la connaissance des terrains observés à ce niveau pour éventuellement modifier le modèle en conséquence : en s'intéressant de plus près aux diverses modalités d'autorisation des paysans à participer à la campagne.

Pour tous les paramètres discutés ci-dessus, l'absence de corrélation observée ne doit cependant pas conduire à un rejet complet de l'hypothèse d'un effet de ces paramètres sur la viabilité des systèmes irrigués. Si tel était l'objectif, il conviendrait de reprendre de nouvelles simulations selon un plan d'expériences spécifique au paramètre mis en question pour pouvoir rejeter cette hypothèse dans le contexte de la représentation d'un système irrigué retenue pour le modèle. Les simulations présentées au chapitre 4 indiquent seulement que, dans le cadre des hypothèses sous-jacentes à SHADOC, il n'est pas certain que ces paramètres aient l'importance qui leur est souvent accordée.

5.1.3 Effet local de quelques paramètres : des réseaux sociaux à l'apprentissage individuel et collectif

Les paragraphes précédents ont traité de l'influence éventuelle des valeurs prises par certains paramètres sur la viabilité des systèmes irrigués simulés à partir du lot de scénarios aléatoires. Les séries de simulations suivantes, dont les résultats ont été décrits aux § 4.2 et 4.3, s'intéressent à l'influence des valeurs prises par quelques uns des paramètres dans différents contextes issus de quelques scénarios initiaux représentant la variabilité des

simulations d'intensité culturale obtenues dans le premier jeu de simulations : pour les paramètres étudiés ainsi l'absence de corrélation observée est-elle due à une absence d'influence, une influence apparemment aléatoire ou une influence variable en sens comme en amplitude selon le contexte ? Les paramètres simulés et discutés dans la suite concernent l'effet des réseaux sociaux et des modalités d'apprentissage des paysans et des groupes.

questions de réseaux sociaux

Dans la suite des simulations effectuées sur la première version du modèle, l'effet des réseaux sociaux est étudié au travers de l'homogénéité des groupements, de leur nombre et de la manière dont ils sont pris en compte dans les processus d'apprentissage, comme décrit au § 3.3.3. C'est-à-dire au travers de paramètres relatifs à la structure des réseaux sociaux et de leur prise en compte dans l'organisation du système irrigué. Les simulations correspondantes ont montré une absence d'influence de ces paramètres dans quatre des contextes testés et une influence faible et non corrélée à des valeurs particulières des modifications sur le cinquième.

Dans le modèle, les réseaux sociaux sont activés dans différents processus : ils fournissent le cadre dans lequel se passent les échanges de crédit et les autres arrangements de type financier entre paysans, les autorisations d'irriguer en dehors du tour, les informations sur l'état de la parcelle si celui-ci est jugé critique et les informations sur les résultats obtenus dans une campagne donnée avec l'ensemble de règles et d'acointances associées. Ils interviennent donc à différents moments, ou avec les choix faits de représentation du temps à différentes phases, et à différents échelles des simulations : effet d'un pas de temps sur le suivant ou d'une campagne sur la suivante.

Sur la base de cette représentation, il semble donc que la structure des réseaux sociaux et de leurs intersections avec les organisations internes au système irrigué est rarement importante pour la viabilité des systèmes irrigués. Dans les quelques cas où il semble y avoir un effet d'un changement de cette structure, celui-ci est peu important et ne peut être relié à une direction donnée. L'effet éventuel de ces réseaux sociaux quand il existe serait faible et imprévisible. Ceci ne signifie cependant pas qu'il ne faille pas en tenir compte dans une nouvelle étape de modélisation. Dans les simulations, comme dans les observations, ils sont effectivement utilisés que ce soit pour des échanges de crédit, de tours d'eau ou d'informations en cours de saison à propos de l'état des parcelles ou sur les résultats en fin de campagne. Cette implication de réseaux extérieurs dans la dynamique du système irrigué est également observée par d'autres auteurs (Manig, 1994). Le peu d'effet visible de ces

réseaux et le caractère apparemment désordonné de celui-ci quand il existe sont alors assez surprenants.

La pertinence de la représentation des réseaux sociaux extérieurs au système irrigué et leur éventuelle influence sur la viabilité de celui-ci, apparemment imprévisible si elle existe, renvoient en fait à des travaux sur la conception de systèmes irrigués viables et à leur complexité. Même si les réseaux sociaux ont un effet sur la viabilité des systèmes irrigués cet effet ne peut pas être relié à certains paramètres même de façon contextuelle parce que les réseaux sociaux interviennent dans plusieurs parties du modèle avec des effets à des échelles de temps différentes. Les simulations apportent un éclairage sur les changements à attendre d'une autre prise en compte de ces réseaux pour un scénario donné ainsi que la variabilité de cet effet selon les hypothèses faites sur la manière dont les paysans activent ces réseaux. On retrouve ici le principe selon lequel il n'existe pas de "meilleure voie" pour organiser les activités d'irrigation (Ostrom, 1992), décliné sous l'angle de l'adaptation de l'organisation du système irrigué aux réseaux d'affinité sociale lui préexistant et le traversant. Un processus de construction et d'adaptation de l'un à l'autre à moyen terme est nécessaire. C'est dans l'évolution de la structure des organisations du système irrigué qu'il faut voir un des effets des réseaux sociaux extérieurs, d'où l'intérêt d'un approfondissement sur les questions d'apprentissage.

Ces résultats relatifs à l'influence de réseaux sociaux extérieurs à un système sont à replacer dans le contexte plus large de l'analyse des réseaux sociaux, cette approche basée sur les interactions appliquée à un cas particulier rejoint en effet quelques autres analyses dans d'autres contextes. Même si, pendant longtemps l'analyse des réseaux sociaux s'est placée d'un point de vue structurel (Forsé et Langlois, 1997) et l'est encore dans beaucoup de travaux actuels, quelques auteurs ont travaillé sur les interactions entre un réseau et ses membres ainsi qu'entre des réseaux ayant des membres en commun. Parmi ces derniers la plupart ont une perspective centrée sur l'individu et ses choix dans l'appartenance aux réseaux dont il fait partie. Les réseaux sont alors vus comme des propriétés émergentes d'un ensemble d'interactions entre des individus *a priori* indifférenciés. Pour les autres, les individus sont considérés comme faisant partie *a priori* de réseaux qui contraignent leurs comportements et évoluent en fonction de ceux-ci. Quand il existe plusieurs partitions en réseaux sociaux d'un ensemble d'individus, ceux-ci interagissent entre eux de manière variable : les propriétés de l'un de ces réseaux influent sur celles de l'autre éventuellement jusqu'à les modifier. Un exemple sur deux types de réseaux seulement montre que ces interactions ont un effet variable qui dépend de l'utilisation de chaque réseau (Ferrand, 1997). Même si cet exemple passe par les fonctions des réseaux, les conséquences des interactions restent dans une perspective de structure des réseaux. Un autre exemple, qui

s'appuie sur la théorie des conflits d'allégeance, s'intéresse à l'effet bénéfique de l'existence d'un croisement des réseaux sociaux sur les conflits internes à une société : de nombreuses études de cas présentent des sociétés où les réseaux sociaux sont entrecroisés rendant ainsi les conflits éventuels moins violents (Flap, 1997). Cet effet d'un croisement des réseaux sociaux renvoie à des recommandations faites pour des systèmes irrigués selon lesquelles il vaut mieux diviser au sein des différents groupements les réseaux sociaux extérieurs pour atténuer les conflits potentiels entre ces groupements (Coward, 1979).

Il apparaît donc que, même s'ils ont été rares, des travaux sur les interactions entre réseaux sociaux et leurs conséquences ont apporté des résultats intéressants qui confirment la nécessité d'un approfondissement de cette question sur quelques applications telles que les systèmes irrigués. Cependant les premiers résultats des simulations ont montré qu'il est alors plus important de s'attacher à bien comprendre et représenter les processus dans lesquels sont activés ces réseaux d'affinité sociale et leur dynamique : ce qui signifie que c'est essentiellement au niveau de l'utilisation de ces réseaux sociaux extérieurs qu'il faut orienter le travail maintenant. Une de ces utilisations dans la représentation propre au modèle SHADOC concerne la question de l'apprentissage *via* l'évaluation et la comparaison de résultats de campagne et les imitations éventuelles qui en résultent.

questions d'apprentissage

Les réseaux d'affinité sociale sont utilisés dans le modèle, au moins partiellement, par les agents de la classe #Paysan non satisfaits par le déroulement d'une campagne : recueil d'informations sur les résultats d'autres paysans puis imitation éventuelle de l'ensemble de règles de l'un d'entre eux. Dans le modèle, les agents individuels ne sont pas les seuls à mettre en œuvre un processus d'évaluation / imitation : les différents types de groupements le font également mais sans faire appel directement aux réseaux d'affinité sociale. Il peut cependant être fait appel indirectement à ces réseaux aussi bien par les groupes que par les individus. Les agents pour lesquels le processus d'évaluation débouche sur des changements de règles peuvent communiquer ceux-ci uniquement aux membres de leur réseau d'affinité sociale, réseau du chef pour un groupe.

Les simulations relatives à ces processus d'apprentissage ont montré un effet important et de sens variable selon le contexte du scénario pour l'un des paramètres : la modalité de la règle de changement de règles du groupe de raison #pompage vaut-elle #idem ? Cet effet peut-être positif ou négatif sur la viabilité des scénarios. Deux niveaux d'intervention différents de cette règle dans les processus modélisés peuvent expliquer ce double effet. D'un côté la valeur #idem bloque toutes les règles du groupe de raison #pompage à leur

valeur initiale : des règles inadéquates vont demeurer. C'est pourquoi quand le scénario initial est *non viable* c'est une valeur différente de #idem qui a un effet très légèrement positif. D'un autre côté, il pourrait être tentant d'expliquer l'effet positif des scénarios *un peu viable* et *viable* par le blocage des règles du groupe de raison #pompage à des valeurs "acceptables". Mais cela suffirait-il à expliquer l'amélioration nette observée pour l'un des scénarios initiaux ? Une autre explication possible tient à la stabilisation du contexte dans lequel évoluent les paysans leur permettant d'avoir des représentations correctes du fonctionnement du groupe et de faciliter leur propre processus d'apprentissage.

Pourtant les règles mises en œuvre dans les systèmes irrigués observés sont, d'après les dires des responsables des GIE s'en occupant, assez stables même dans des systèmes irrigués apparaissant comme peu viables du point de vue du nombre de campagnes enchaînées sans intervention extérieure. Les règles collectives mises en œuvre seraient-elles si mauvaises dans le contexte local ? ou faut-il rejeter l'hypothèse d'un effet positif d'une stabilisation des règles collectives ? ni l'un ni l'autre. En fait c'est la représentation que les paysans se font de ces règles qui est instable, en partie à cause du contexte extérieur au système qui est imprévisible, en partie à cause de la médiocre qualité de la communication entre les niveaux d'organisation, alors que les règles mises en œuvre ne sont pas les règles annoncées et que, à chaque campagne, plane la menace que "cette année on va appliquer le règlement". Cette nécessité d'une stabilité des règles mises en œuvre rejoint l'un des principes de conception de systèmes irrigués viables formulés par Ostrom : l'existence de règles opérationnelles clairement définies (Ostrom, 1992).

Dans un autre contexte, celui de l'apprentissage des organisations, il a été démontré que si plusieurs niveaux d'organisation liés par une relation hiérarchique existent, leurs évolutions interagissent les unes avec les autres (Bruderer, 1993). Dans le cas des systèmes irrigués, il s'agirait alors de l'interaction entre les évolutions des paysans et des groupements dont ils font partie. Il convient cependant de revenir sur le cas particulier de représentation de l'apprentissage, qu'il soit individuel ou collectif, utilisé dans SHADOC. Tous les agents, sauf le groupe de raison #pompage, évoluent en imitant les règles d'autres agents, sans erreur de réplique mais éventuellement à partir d'un ensemble restreint d'agents pouvant être imités et selon diverses modalités de sélection. Le groupe de raison #pompage qui ne peut imiter personne évolue avec une démarche aléatoire dans l'espace des règles qui le concernent. Ceci peut expliquer l'importance de l'effet de la modalité #idem en tant que stabilisatrice du contexte : d'une part pour d'autres modalités la sélection d'un nouvel ensemble de règles par le groupe de raison #pompage ne prend pas en compte une quelconque connaissance du système, ce qui diminue l'effet positif des interactions entre les évolutions des deux niveaux d'organisation, d'autre part il a été montré que les stratégies

imitatives réussissent mieux dans un contexte stable que dans un contexte instable (Phelan, 1997).

Les réseaux d'affinité sociale au départ de cette discussion sur les questions d'apprentissage ont un peu disparu avec l'intérêt pour la règle de changement de règles du groupe de raison #pompage. L'effet de cette dernière occulte d'éventuels effets d'autres paramètres, de nouvelles simulations avec une modalité constante de la modalité de cette règle seraient nécessaires pour aller plus loin sur un effet éventuel d'un changement de ces paramètres. Néanmoins, le contexte de l'évolution des comportements individuels, qui passe par ces réseaux d'affinité sociale, apparaît bien comme pertinent pour discuter de la viabilité des systèmes irrigués comme dans l'exemple des terrasses irriguées de Bali (Lansing et Kremer, 1994).

D'autres travaux, sur les choix budgétaires des ménages notamment, ont montré que dans certaines conditions des stratégies d'apprentissage "social", c'est-à-dire par imitation dans un voisinage, ont plus d'effets sur l'évolution des comportements que des stratégies d'apprentissage individuel, en particulier en contexte peu prévisible (Chattoe et Gilbert, 1997). Dans le cas de ces simulations sur des systèmes irrigués, l'effet de processus d'imitation contraints par l'existence de réseaux sociaux dépend de même de la stabilité du contexte dans lequel ils se trouvent.

Ces simulations sont d'abord à considérer comme un exemple d'utilisation du modèle pour traiter de questions sur le système irrigué : exploration de scénarios paraissant pertinents pour les questions posées, reformulation de ces questions et éventuellement ouverture de nouvelles voies de recherche. Leur cohérence ou non avec des théories antérieures ou des principes établis ouvre également sur une discussion vers une remise en cause non seulement du modèle mais aussi éventuellement de ces théories et principes.

Elles ont également permis de discuter de l'importance éventuelle de la prise en compte de certains paramètres pour la viabilité des systèmes irrigués. En particulier, elles semblent confirmer l'importance de l'existence de plusieurs niveaux d'organisation représentés dans le modèle. Les relations entre ceux-ci sont apparues à plusieurs reprises. Il s'agit maintenant d'approfondir cette question des relations entre les différents niveaux d'organisation.

5.2 La viabilité dans le lien individuel / collectif

La discussion sur l'effet des différents paramètres des scénarios pris individuellement a permis de donner différents exemples d'usages du modèle de manière exploratoire et de retrouver et de discuter de résultats issus de travaux sur la gestion et la conception de systèmes irrigués. Cette vérification de théories en relation avec une représentation du terrain est en soi intéressante par rapport aux débats usuels sur la question ou aux hypothèses souvent utilisées. Elle permet aussi de situer les résultats obtenus dans les connaissances existantes.

Cette discussion a permis de mettre en évidence, à partir de l'exemple de l'évolution des règles, la nécessité de la prise en compte des interactions entre les différents niveaux d'organisation : comment interagissent les ensembles de règles collectives d'un scénario avec les ensembles de comportements individuels ? Les résultats des simulations déjà présentés permettent d'émettre des hypothèses à ce sujet qui peuvent être confirmées par de nouvelles simulations. Nous en explorons alors les conséquences en termes de démarche de conception ou de réhabilitation de périmètres irrigués.

5.2.1 Situation dans le débat individuel / collectif

Le débat entre holisme et individualisme, entre fait social et rationalité individuelle est classique en sciences sociales : les individus sont-ils complètement autonomes ou leurs comportements sont-ils dictés par la société dans laquelle ils se trouvent ? Les limites de ce débat ont déjà été montrées : les deux approches traitent en fait de deux formes d'accord possible entre des personnes et les transforment en lois positives en s'excluant mutuellement (Boltanski et Thévenot, 1991).

L'existence d'un objet collectif indiscutable et partagé, l'aménagement avec le réseau principal et les pompes, pose cette question d'une autre manière : pour agir, modifier ou concevoir un système irrigué faut-il donner la priorité à un niveau d'organisation sur un autre ? Les critiques habituellement rencontrées pour expliquer les échecs des systèmes irrigués portent effectivement soit sur les règles collectives, le "règlement intérieur", soit sur la qualité des pratiques des paysans pris individuellement.

La conception des aménagements hydro-agricoles par des ingénieurs de bureaux d'études en aménagement pour des administrations nationales du pays "bénéficiaire" et payés ou subventionnés par des bailleurs de fonds étrangers à ce pays a connu une importante tradition basée sur la recherche des bonnes caractéristiques techniques et des bonnes

règles collectives d'usage allant avec : "les ingénieurs aménagistes [...] supposent souvent que sur leurs périmètres [...], il n'y a pas de meilleur moyen de distribuer l'eau que selon les règles qu'ils avaient en tête au moment de concevoir et de construire le système irrigué"⁹² (Diemer et Huibers, 1996, p. 1).

Dans ce cadre, les objectifs sont ceux de l'administration et les méthodes celles du pays d'origine, l'ensemble devant respecter les principes du bailleur de fonds. Les paysans sont des rouages de la machine transformant des investissements en production agricole.

Si l'origine de cette approche centrée sur l'aménagement comme boîte noire est à rechercher dans une approche essentiellement technicienne de la conception des systèmes irrigués à ses débuts, on ne peut se limiter à assimiler point de vue collectif à aménagement selon des contraintes techniques. Une telle approche a rapidement été remise en cause (Chambers, 1981) et a évolué en incluant des principes d'usage et d'organisation des systèmes irrigués : affectation de rôles, estimation de besoins en eau. Ces évolutions sont cependant toujours demeurées d'un point de vue global.

Ce type d'approche se poursuit aujourd'hui sous la forme de projets de développement, d'échelle plus petite certes, mais dont les logiques sous-jacentes d'origine externe procèdent toutes de l'échelle du projet ou d'échelles plus larges : normes des bailleurs de fonds, politique économique nationale, rationalité technique (Olivier de Sardan, 1995). Le "projet" a une existence propre qui s'impose aux personnes qui le composent et sont supposées agir dans le sens de ce projet puisqu'il est supposé leur profiter. Les systèmes irrigués constituent un cas particulier de ces projets de développement fréquents dans la moyenne vallée du Sénégal... jusqu'au cas extrême des projets privés ou individuels.

La littérature sur les échecs de ce point de vue qui ne prend pas en compte les intérêts des individus sur lesquels reposent les systèmes irrigués est nombreuse. Elle repose en fait explicitement ou non sur l'hypothèse suivante : pour qu'un individu agisse dans le sens d'un intérêt commun il doit aussi y trouver une motivation individuelle (Olson, 1966). Pour que les membres d'une collectivité, tels que les paysans dans un système irrigué, participent aux activités communes, telle que la participation aux frais de pompage, il doit exister un ensemble d'incitations sélectives indépendantes dépendant de cette participation. De là il résulte une autre perspective sur les systèmes irrigués, basée sur les paysans.

⁹² "irrigation engineers [...] often assume that on their schemes, [...], there is no better way of distributing water than according to the rules they had in mind when they designed and built the irrigation systems" (traduction de l'auteur)

Un tel point de vue pose cependant quelques problèmes eu égard à la définition choisie d'un système irrigué : les paysans sont identifiés comme faisant partie d'un système irrigué par l'appartenance d'une de leur parcelle à un périmètre particulier. Les comportements individuels sur lesquels se base cette perspective ont toujours lieu dans un cadre collectif préexistant et sont donc *a priori* contraints par ce niveau collectif. Un choix fait par un paysan sur sa parcelle a des conséquences pour les autres paysans sur leur propre parcelle. La diminution du volume d'eau disponible pour un paysan dont la parcelle est située plus en aval est un exemple de telles conséquences de choix d'un paysan sur un autre, mais ce n'est pas le seul. Imitation de pratiques, humidification de parcelles voisines ou course pour être le premier à récolter peuvent également être de tels exemples. Dans un tel cadre, "il est impossible de ne pas communiquer" (Watzlawick et al., 1972) : tout choix d'un paysan⁹³ peut être perçu et interprété par un autre paysan.

Certains auteurs ont séparé en plusieurs entités le système irrigué en fonction des différentes catégories d'acteurs et de leurs activités : "producteurs d'eau maîtrisée" d'un côté et producteurs de biens agricoles de l'autre (Rey, 1996). Même si ce n'est pas nécessairement son objectif, cette approche permet de sortir de cette contradiction apparente, et ainsi de se dégager de la nécessité de poser un cadre collectif préalable. Ces entités peuvent être considérées dans certains cas de figure comme autonomes et les individus producteurs de biens comme clients des producteurs "d'eau maîtrisée". Une telle approche permet de traiter séparément le niveau collectif et le niveau individuel et de réduire l'interface entre les deux niveaux à des transactions sur un bien particulier. Un autre avantage de cette approche est de se rapprocher du point de vue des économistes qui se posent la question de l'affectation par les paysans de leurs différentes ressources, dont leur force de travail, entre leurs différentes activités. Ce rapprochement permet alors de faciliter le dialogue entre les différentes disciplines pour la gestion des systèmes irrigués.

Cette perspective, centrée sur les individus et leurs intérêts, existe en particulier dans les démarches de désengagement de l'Etat. La prédominance de l'Etat et de ses représentants dans la gestion et la non prise en compte des intérêts individuels de chaque paysan ont été considérées comme responsables des échecs relatifs des systèmes irrigués, tels que ceux de la vallée du Fleuve Sénégal, il a donc été décidé de transférer aux usagers la gestion de ces systèmes irrigués, lourds dans le budget des Etats et si peu productifs, satisfaisant ainsi les bailleurs de fonds soucieux de rigueur budgétaire et le milieu des ONG et du "Putting

⁹³ qui peut être de ne rien faire.

people first"⁹⁴. Il est attendu de la décentralisation et de la délégation de la gestion des ressources en eau une augmentation de la participation des usagers de l'eau dans les prises de décision et dans les investissements. Ainsi les organisations locales mises en place à cette occasion, devant s'autofinancer, seront poussées à augmenter la production agricole, et par là même la rentabilité de l'investissement initial (Vermillion, 1994).

La représentation des systèmes irrigués est alors devenue la réunion d'un ensemble de paysans individuellement rationnels avec leur cohérence propre. Le système irrigué est la résultante de tous ces comportements individuels et de leurs interactions. Ce point de vue sur les systèmes irrigués amène à se poser des questions relatives à cette rationalité individuelle des paysans et des incitations à mettre en place pour qu'ils se comportent comme on aimerait qu'ils le fassent, par exemple en payant leur redevance hydraulique afin d'obtenir une autonomie financière. Notons tout de même que ces incitations sont d'origine extérieure et jouent en fait un rôle conceptuellement assez semblable au cadre collectif critiqué.

Ainsi, pour un aménagement égyptien, une étude a cherché à comprendre les attitudes des paysans afin d'en tirer des recommandations pour augmenter les chances de succès d'une opération de transfert de la gestion aux usagers (Khouzam, 1995). Cette perspective revient à rechercher les conditions nécessaires pour que les paysans aient un comportement qui permette au niveau collectif de fonctionner⁹⁵. Ceci repose sur deux présupposés : la rationalité des paysans est *a priori* individuelle et il existe de bons comportements individuels qui pourront assurer le bon fonctionnement de l'ensemble si les paysans s'y tiennent. On ne discutera pas le premier ici, par contre les résultats des simulations permettront de discuter du second.

Ce double point de vue existant sur les systèmes irrigués se retrouve d'une manière assez équivalente dans le monde des systèmes multi-agents et de l'Intelligence Artificielle Distribuée.

Un des principes de base des SMA est l'autonomie des agents qui interagissent, le niveau collectif étant une émergence des comportements individuels et des interactions. Des

⁹⁴ titre d'un ouvrage sous la direction de M.M. Cernea (1991).

⁹⁵ Ce point de vue est en fait assez ancien et la recherche des bons paysans pour les installer comme colons dans des zones supposées initialement vierges car non aménagées procédait en fait du même point de vue.

sociétés artificielles créées pour la résolution distribuée de problèmes représentent ainsi des entités autonomes qui communiquent et prennent part de manière temporaire à des groupes en fonction de leur intérêt propre (Searle cité par Haddadi, 1996). Dans certains cas, les méthodes relatives à la coordination entre les agents nécessaires au fonctionnement du SMA sont représentées sous la forme d'une capacité de coordination propre à chaque agent (Muller, 1996).

Cependant même pour ces SMA dédiés à la résolution distribuée de problèmes, il existe le plus souvent une tâche commune qui définit le contexte dans lequel évoluent les agents et contraint leur comportement (Conte et Castelfranchi, 1994). Pour éviter l'usage d'agents trop cognitifs, des normes sociales sont mises en place dans certains SMA comme une contrainte spécifique au système, située au niveau de l'environnement, ou d'un objet à part entière (Conte et Castelfranchi, 1995).

En ce qui concerne SHADOC, nous avons fait l'hypothèse de la coexistence des deux points de vue aussi bien pour le système représenté que pour le modèle. Les groupes existent *a priori* mais évoluent en réponse aux comportements de leurs membres (Glance et Huberman, 1995) : ***nous faisons l'hypothèse d'une co-évolution entre les deux niveaux d'organisation.***

5.2.2 Cohérence entre règles collectives et comportements individuels

Les hypothèses sous-jacentes aux points de vue présentés ci-dessus, qui donnent la priorité à un niveau d'organisation sur l'autre, impliquent l'existence de bonnes règles collectives ou individuelles. L'absence de corrélation observée dans les résultats des simulations des scénarios testés avec les comportements individuels et les règles collectives, pris individuellement, met en doute l'une comme l'autre de ces hypothèses sous-jacentes. Elle ne suffit cependant pas à les remettre en cause. Il peut s'agir de corps de règles, individuelles ou collectives, qui dans leur ensemble garantiraient la viabilité d'un système irrigué, ces corps de règles restant homogènes du point de vue du niveau d'organisation auquel ils font référence. Dans ce cas on ne ferait que retrouver les conclusions d'une étude de cas en Egypte selon laquelle le comportement d'un système irrigué ne peut être expliqué par des paramètres isolés (Layton et al., 1994).

Pour tester cette dernière hypothèse, l'existence de corps de règles individuels ou collectifs garantissant la viabilité d'un système irrigué, décrivons chaque scénario sous la forme de trois parties distinctes que l'on appellera dans la suite chromosome par analogie avec les

algorithmes génétiques : un chromosome C qui contient les règles collectives, un chromosome I qui contient les paramètres décrivant les populations de comportements individuels et un chromosome E qui regroupe les autres paramètres dont en particulier ceux liés à l'environnement tels que l'accès à des revenus extérieurs et les modalités de communication entre individus et groupements. La situation de ces derniers paramètres dans le chromosome E revient à faire l'hypothèse que ces modalités de communication entre niveau individuel et niveau collectif sont propres à la société : ainsi les mêmes modalités d'implication dans la vie du groupe ont été observées dans les GIE liés au périmètre et dans les *fedde*. Le chromosome E regroupe en fait tout ce sur quoi le système n'a pas prise. Les paramètres constituant les chromosomes C et I peuvent prendre n'importe quelle valeur parmi les valeurs possibles présentées en annexe 7. Les sources de choix de chacun étant supposées indépendantes, nous n'avons pas considéré *a priori* de modalités de règles interdites.

Tout scénario S est alors décrit par un triplet $\langle C, I, E \rangle$. A chaque scénario sont associées une viabilité $v(\langle C, I, E \rangle)$ valant le taux de simulations viables de ce scénario et une classe de viabilité $c(\langle C, I, E \rangle)$ valant vrai ou faux⁹⁶. Dans ce formalisme, l'hypothèse d'existence d'ensembles de règles collectives viables *a priori* se traduit ainsi :

(H_c) soit $S_1 = \langle C_1, I_1, E_1 \rangle$ tel que $c(S_1) = \text{vrai}$, si C_1 est un tel ensemble de règles collectives *a priori* viable, alors : $\forall I, \forall E, c(\langle C_1, I, E \rangle) = \text{vrai}$.

De même l'hypothèse d'existence d'ensembles de règles individuelles viables *a priori* se traduit de la manière suivante :

(H_i) soit $S_1 = \langle C_1, I_1, E_1 \rangle$ tel que $c(S_1) = \text{vrai}$, si I_1 est un tel ensemble de règles individuelles *a priori* viable, alors : $\forall C, \forall E, c(\langle C, I_1, E \rangle) = \text{vrai}$.

Ces deux hypothèses sont très fortes et de nombreux travaux font référence à la dépendance à l'environnement au sens large, en particulier socio-économique, dans lequel se situe un aménagement donné pour trouver les "bonnes règles". C'est pourquoi on ne cherchera pas à les tester directement, mais plutôt à tester des hypothèses dérivées plus larges tenant compte de cette dépendance supposée à l'environnement.

En fait l'existence de bonnes règles collectives, respectivement individuelles, suite aux premiers échecs de modèles importés, a rapidement été considérée comme contingente à

⁹⁶ Dans toute la suite on ne fait plus la différence entre les classes *un peu viable* et *viable* qui sont regroupées dans la valeur $c := \text{vrai}$.

un contexte donné : d'après des auteurs néerlandais, les modèles français ou hollandais d'irrigation s'étant montrés inadaptés au Sénégal, il a fallu trouver de nouveaux modèles correspondant aux particularités locales (Diemer et Huibers, 1991). Les systèmes irrigués sont alors considérés comme des systèmes ouverts. Les hypothèses à tester sont alors que, pour un environnement donné, il existe un ensemble de règles collectives, respectivement individuelles, viables *a priori* quelque soit l'ensemble de règles individuelles, respectivement collectives. Dans le formalisme précédent, ceci se traduit de la manière suivante :

(H_c') soit $S_1 = \langle C_1, I_1, E_1 \rangle$ tel que $c(S_1) = \text{vrai}$, si C_1 est un tel ensemble de règles collectives *a priori* viable pour l'environnement E_1 , alors : $\forall I, c(\langle C_1, I, E_1 \rangle) = \text{vrai}$.

(H_i') soit $S_1 = \langle C_1, I_1, E_1 \rangle$ tel que $c(S_1) = \text{vrai}$, si I_1 est un tel ensemble de règles individuelles *a priori* viable pour l'environnement E_1 , alors : $\forall C, c(\langle C, I_1, E_1 \rangle) = \text{vrai}$.

On vérifie aisément $(H_c) \Rightarrow (H'_c)$ et $(H_i) \Rightarrow (H'_i)$: la mise en défaut de ces nouvelles hypothèses élargies implique la mise en défaut des précédentes. C'est pourquoi on se limitera à travailler sur celles-ci. Pour les tester, nous avons choisi de procéder à des échanges de chromosomes entre scénarios pour en constituer de nouveaux et simuler ces derniers. Ces croisements consistent à reprendre le chromosome des règles collectives, respectivement individuelles, d'un scénario et à le mettre à la place du chromosome équivalent d'un autre scénario.

Comme pour certains paramètres discutés au § 5.1, les résultats des simulations nous amènent à émettre des hypothèses appelant à être confortées ou mises en doute par de nouvelles simulations. Ces simulations n'ont pas été menées à bien au § 5.1 car les hypothèses en question n'étaient pas toujours nouvelles⁹⁷ et nécessitaient de concevoir de nouveaux plans d'expérience. La notion d'interactions entre niveaux d'organisation a par contre été moins traitée, c'est pourquoi ces nouvelles simulations ont été menées à bien et observées uniquement dans la perspective de la coordination entre les niveaux d'organisation.

Pour éviter les cas extrêmes, nous avons procédé à des croisements uniquement entre scénarios viables. En effet, vu le mode de création des scénarios aléatoires, on pourrait imaginer, comme il nous a déjà été fait remarqué, que certains scénarios comportent des ensembles de règles individuelles, respectivement collectives, tels que quelques soient les règles collectives, respectivement individuelles, les scénarios les incluant ne puissent être

⁹⁷ Les résultats présentés avaient alors essentiellement un intérêt de démonstration de la fiabilité de la méthode suivie et d'alimentation de débats en cours au sujet de la viabilité des systèmes irrigués.

viables. Cette hypothèse pourrait également être testée par le même type de méthode, en attendant nous avons fait comme si cette hypothèse était vraie, c'est pourquoi nous n'avons croisé que des scénarios viables.

Les scénarios produits de croisements de scénarios sont décrits de la manière suivante : étant donné $S_1 = \langle C_1, I_1, E_1 \rangle$ et $S_2 = \langle C_2, I_2, E_2 \rangle$ viables, nous définissons $S_{i12} = \langle C_1, I_2, E_1 \rangle$ et $S_{c12} = \langle C_2, I_1, E_1 \rangle$. Si (H_c') est vraie et si C_1 est un bon ensemble de règles collectives, $c(S_{i12}) = \text{vrai}$. De même si (H_i') est vraie et si I_1 est un bon ensemble de règles individuelles, alors $c(S_{c12}) = \text{vrai}$.

Ces croisements ne permettent pas d'infirmer ou de confirmer les hypothèses (H_c') et (H_i') , en effet $c(S_1) = \text{vrai}$ n'implique pas que C_1 soit un bon ensemble de règles collectives s'il en existe un, respectivement $c(I_1) = \text{vrai}$ n'implique pas que I_1 soit un bon ensemble de règles individuelles s'il en existe un.

Par contre les simulations de scénarios issus de tels croisements permettent de voir quels seraient d'éventuels ensembles de règles collectives ou individuelles donnant toujours lieu à des scénarios viables dans un environnement donné parmi les cas simulés. Ainsi pour des croisements au sein des 10 scénarios les plus viables des 100 scénarios initiaux, l'hypothèse (H_c') n'est pas vérifiée pour 3 scénarios, de même l'hypothèse (H_i') n'est pas vérifiée pour 3 scénarios. La Figure 50 donne un exemple particulièrement illustratif de la non viabilité d'un scénario croisement en le comparant aux deux scénarios dont il est issu. Pour les autres scénarios, même si aucun croisement parmi ceux testés ne permet de remettre en cause les deux hypothèses en question exprimées en terme de classe viabilité, dans la plupart des cas il existe des croisements pour lesquels le taux de simulations viables a décru de manière significative par rapport au scénario initial. Dans ces derniers cas, l'influence du chromosome E est à approfondir.

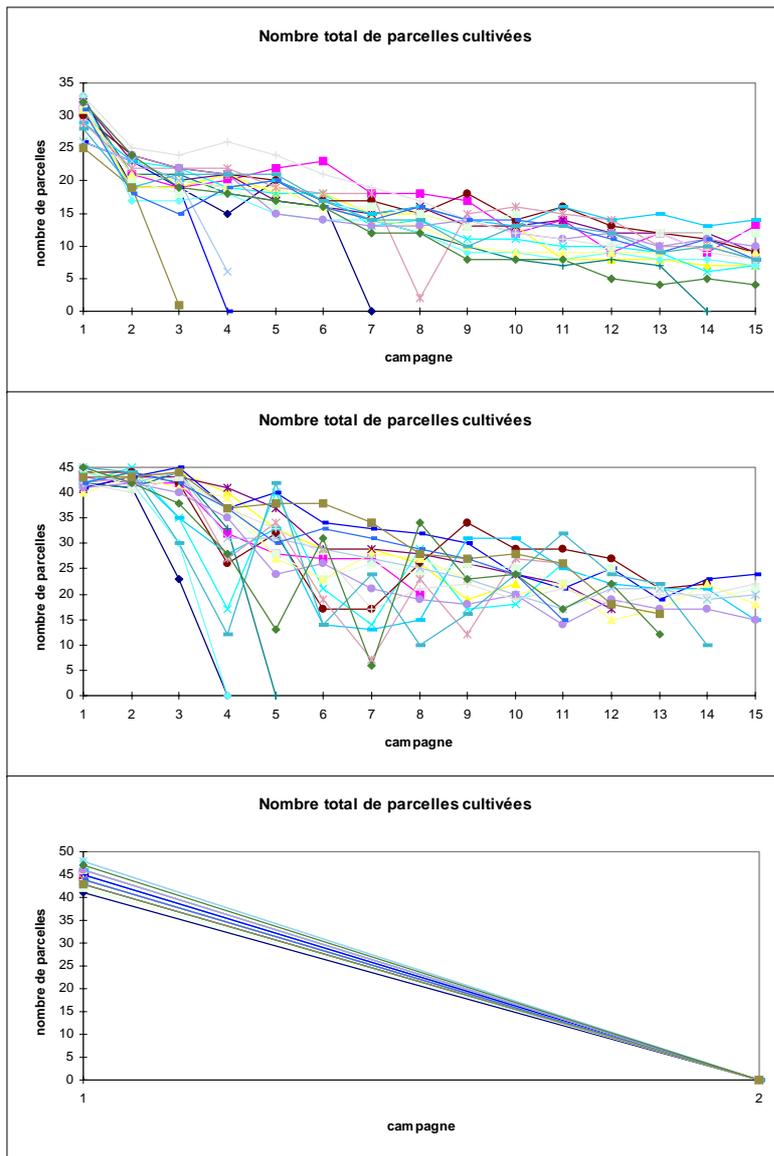


Figure 50 : viabilité d'un scénario croisement de type S_{c12} . De haut en bas, simulation de l'intensité culturale de S_1 , S_2 et S_{c12} . S_1 et S_2 comportent un nombre important de simulations durant 15 campagnes avec une intensité culturale assez élevée, alors qu'aucune simulation de S_{c12} ne peut démarrer la deuxième campagne sur une parcelle [$S_1 = Has55$ et $S_2 = Has24$]

Ces résultats montrent que, même si elles ne sont pas infirmées, les hypothèses (H_c') et (H_i') peuvent être mises en doute : plusieurs des chromosomes I et C testés ne peuvent être considérés comme de bons ensembles de règles individuelles, respectivement collectives. Ainsi même en cas où ces hypothèses seraient en fait vérifiées, la reprise d'ensemble de "règles qui marchent" dans un système irrigué pour un autre système irrigué dans un environnement comparable semble donc une démarche assez hasardeuse, rien ne garantissant que ces "règles qui marchent" constituent un bon ensemble.

Un deuxième affaiblissement des hypothèses est donc nécessaire, par exemple en étendant la remarque relative à l'existence de mauvais ensembles de règles collectives ou individuelles rendant *non viable* tout scénario qui en comporterait un. Un ensemble de "bonnes règles" collectives, respectivement individuelles, pourrait être plus ou moins "fort" pour compenser des ensembles de règles individuelles, respectivement collectives, particulièrement "mauvais". Les hypothèses (H_c') et (H_i') deviennent alors :

(H_c'') soit $S_1 = \langle C_1, I_1, E_1 \rangle$ tel que $c(S_1) = \text{vrai}$, si C_1 est un tel ensemble de règles collectives *a priori* viable pour l'environnement E_1 , alors : $\forall I \in R_i, c(\langle C_1, I, E_1 \rangle) = \text{vrai}$.

(H_i'') soit $S_1 = \langle C_1, I_1, E_1 \rangle$ tel que $c(S_1) = \text{vrai}$, si I_1 est un tel ensemble de règles individuelles *a priori* viable pour l'environnement E_1 , alors : $\forall C \in R_c, c(\langle C, I_1, E_1 \rangle) = \text{vrai}$.

Avec R_i et R_c respectivement des ensembles de règles individuelles et collectives "raisonnables" d'où sont exclus les chromosomes I et C trop "mauvais".

Remarquons que ($I \notin R_i$) n'implique pas que $c(\langle C, I, E \rangle) = \text{faux}$, de même que ($C \notin R_c$).

Ce nouvel affaiblissement est en fait déjà une première prise en compte de l'existence d'un autre niveau d'organisation. Une telle prise en compte correspond à des méthodes souvent recommandées aussi bien à partir de points de vue construits sur la première hypothèse que sur la deuxième. Ainsi la question de la viabilité du système irrigué peut être ramenée à la recherche des bonnes règles de gestion du périmètre dans un contexte donné avec des paysans se comportant de manière "raisonnable", d'où les programmes de vulgarisation et de formation des paysans et gestionnaires. De même, l'évaluation de plusieurs programmes de transfert de la gestion d'un système irrigué à ses usagers a mis en évidence la nécessité de l'existence d'un cadre collectif au sein duquel les règles individuelles sont mises en œuvre (Vermillion, 1997).

Pour explorer ces nouvelles versions des hypothèses initiales, nous avons exploré des doubles croisements de scénario en comparant la capacité des ensembles de règles collectives, respectivement individuelles, de deux scénarios à supporter un ensemble de règles individuelles, respectivement collectives, "non raisonnables" :

soit $S_1 = \langle C_1, I_1, E_1 \rangle$ tel que $c(S_1) = \text{vrai}$ et C_1 "bon ensemble de règles collectives"

soit $S_2 = \langle C_2, I_2, E_2 \rangle$ tel que $c(S_2) = \text{vrai}$ et C_2 "bon ensemble de règles collectives"

si $c(S_{i12}) = \text{faux}$ alors $I_2 \notin R_i$ et C_2 "plus résistant" que C_1 .

si $c(S_{i21}) = \text{faux}$ alors $I_1 \notin R_i$ et C_1 "plus résistant" que C_2 .

si les deux sont faux simultanément alors il y a incohérence et C_1 et C_2 ne sont pas de "bons ensembles de règles collectives".

Le même raisonnement peut être tenu pour les ensembles de règles individuelles en observant $c(S_{c12})$ et $c(S_{c21})$.

Quelques doubles croisements de scénarios viables conduisent à rejeter des ensembles de règles collectives ou individuelles.

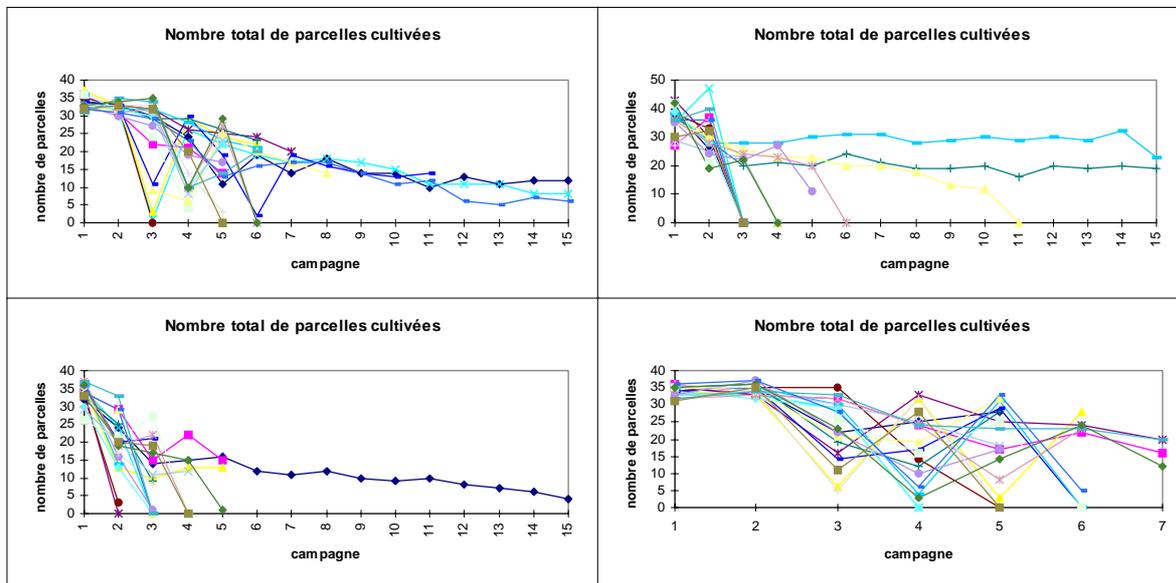


Figure 51 : les scénarios initiaux, S_1 et S_2 (ligne du haut), comportent quelques simulations viables alors que les croisements par échange d'ensembles de règles individuelles, S_{12} et S_{21} (ligne du bas), n'en comportent au mieux qu'une seule. [$S_1 = \text{Has62}$ et $S_2 = \text{Has57}$]

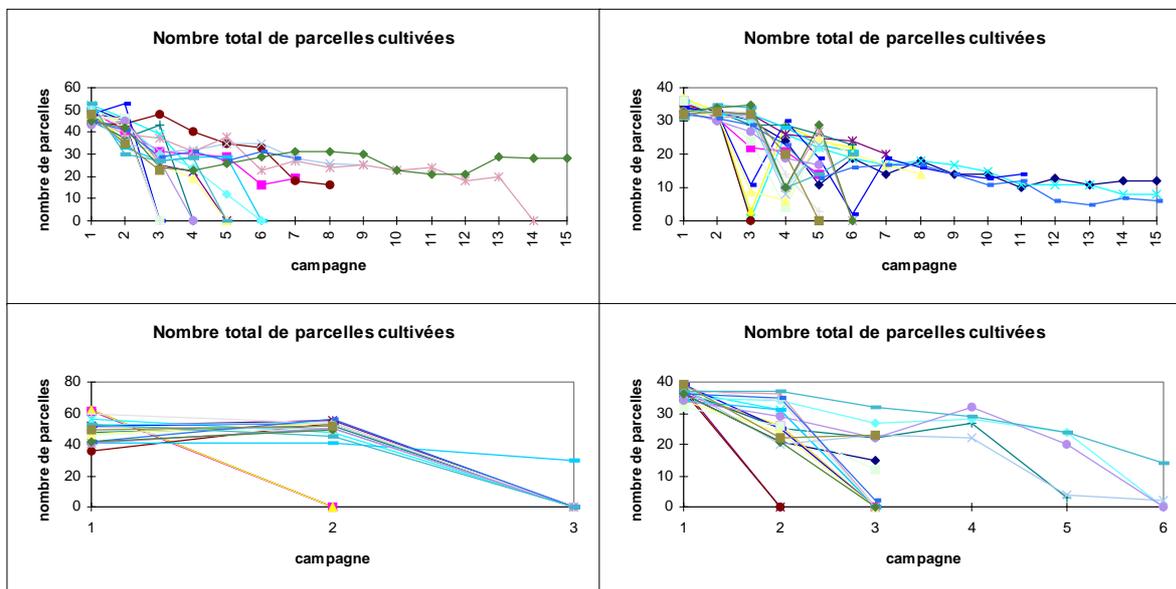


Figure 52 : scénarios initiaux, S_1 et S_2 (ligne du haut), comportent quelques simulations viables alors que les croisements par échange d'ensembles de règles collectives, S_{c12} et S_{c21} (ligne du bas), n'en comportent pas. [$S_1 = \text{Has21}$ et $S_2 = \text{Has62}$]

Les exemples de la Figure 51 et de la Figure 52 ci-dessus montrent de tels doubles croisements sur les règles individuelles ou les règles collectives conduisant dans les deux cas à une diminution de la viabilité des scénarios initiaux. Les scénarios initiaux viables

illustrent ainsi une adéquation entre les ensembles de règles collectives et de règles individuelles dans un environnement donné.

Même si ces exemples ne suffisent pas à montrer qu'il n'existe pas de "bonnes" règles collectives ou individuelles *a priori*, ils en mettent en doute la version forte initiale ainsi que sa première atténuation.

Une explication alternative de la viabilité des systèmes irrigués pourrait alors tenir dans la **cohérence entre les règles collectives et les comportements individuels**. La viabilité des systèmes irrigués viendrait de la qualité de l'ajustement de ces deux niveaux de règles, aucun des deux niveaux n'ayant un rôle primordial par rapport à l'autre : les paysans sont là au départ et leur cadre d'action collective également. Les deux niveaux d'organisation ont la possibilité d'évoluer ensemble de manière viable ou non selon la cohérence des conditions initiales. Des conditions initiales présentant une mauvaise adéquation entre les deux niveaux de règles ne permettent pas un déroulement viable des simulations en ne laissant pas le temps aux deux niveaux de se coordonner.

D'après ce qui précède, cette explication est plausible eu égard aux résultats des simulations, en particulier avec la non corrélation observée entre viabilité et valeur de certaines règles. Elle renvoie également à des théories de la société qui mettent en évidence un principe de causalité circulaire entre niveaux d'organisation et une absence de niveau d'explication ultime dans le cas de systèmes complexes (Dupuy, 1989), ainsi qu'à des travaux récents en économie qui considèrent des interactions, parmi lesquelles des échanges de type marchand, entre des individus selon une ou plusieurs structures de réseau préexistantes évoluant avec la mise en œuvre de ces interactions (Kirman, 1997). Dans le domaine des SMA enfin, même si le point de vue individuel est le plus fréquent, dans quelques cas les groupes évoluent en fonction des comportements de leurs membres qu'ils contraignent en retour (Glance et Huberman, 1995). Au niveau des structures de représentation, le méta-modèle Aalaadin met en œuvre des structures de groupes et d'agents, reliés par des rôles, ayant chacun leur existence et leur dynamique propre et co-évoluant (Ferber et Gutknecht, 1997).

5.2.3 Conséquences

Cette hypothèse de besoin de cohérence entre règles collectives et comportements individuels pour que des systèmes irrigués soient viables a plusieurs implications pour des démarches de conception ou de réhabilitation de systèmes irrigués. **Il faut prendre à la fois**

en compte le niveau collectif et le niveau individuel : aucun des deux n'est la "cause" de l'autre. Une démarche de conception ou de réhabilitation de système irrigué donnant la priorité à un niveau d'organisation sur l'autre a peu de chance de réussir. De même des travaux de l'école de Palo Alto ont mis en évidence de nombreux cas de prophéties auto-réalisatrices où cause et but se confondent (Watzlawick, 1978). Les exemples cités font intervenir un tiers, dont la parole n'est pas mise en doute, médecin, journaliste, expert, qui met en place ou explicite selon les cas ces prophéties auto-réalisatrices. Ainsi, un regard tiers, extérieur au système, serait nécessaire pour cette double prise en compte, en fait pour sortir du cercle auto-référentiel. **Un désengagement complet des systèmes irrigués serait donc illusoire, ou ne marcherait que par chance.**

Une deuxième implication, concernant les comportements individuels seuls, repose sur une hypothèse supplémentaire que l'on admettra par la suite : dans un système réel on ne peut pas connaître complètement une population de comportements individuels et la manière dont ils peuvent évoluer⁹⁸. Or dans la question de la cohérence entre règles collectives et comportements individuels, ces derniers interviennent clairement ! Une solution possible pour résoudre ce problème peut alors tenir dans l'implication des acteurs des systèmes irrigués dans toute démarche de conception ou de réhabilitation, et ce plus fortement que sur le mode participatif habituel réduisant le plus souvent la participation à des questions aux bénéficiaires potentiels analysées ensuite par un tiers pour rechercher les règles collectives cohérentes.

Une troisième implication enfin concerne la nécessité d'un cadre collectif initial. La démarche de conception ou de réhabilitation implique l'existence d'une structure collective, d'un référentiel commun permettant d'initier la discussion. Il peut s'agir de groupes déjà constitués autour de questions relatives ou non à l'irrigation comme il peut s'agir d'un objet reconnu par tous et dont la reconnaissance est savoir commun : il faut un "objet médiateur" (Bousquet, 1994 ; Weber, 1995) permettant de poser la question de la cohérence des règles mises en œuvre entre les différents niveaux d'organisation. Par défaut le périmètre constitue *a priori* cet objet médiateur.

Enfin la politique d'aménagement hydro-agricole a le plus souvent une origine extérieure. Des interlocuteurs pour lesquels l'aménagement est l'unité de référence, tels que les bailleurs de fonds et à travers eux la puissance publique, sont impliqués dans ces démarches de conception ou de réhabilitation de systèmes irrigués. Ces interactions avec

⁹⁸ à moins peut-être de constituer une société de clones... mais peut-on alors encore parler de système réel ?

l'extérieur du système passent en grande partie par les groupements et leurs responsables. C'est pourquoi ces derniers, en tant que représentants du niveau collectif, doivent également être inclus dans tout processus de négociation pour une démarche de réhabilitation ou de conception de système irrigué.

Ces trois implications amènent à une démarche déjà utilisée dans des domaines voisins de la conception ou la réhabilitation de systèmes irrigués tel que l'aménagement du territoire : la démarche patrimoniale (Ollagnon, 1989). Cette démarche repose sur le principe d'une négociation dans un premier temps autour du problème à résoudre et de la définition d'objectifs communs à très long terme⁹⁹ et dans un deuxième temps des scénarios à mettre en œuvre pour aller dans cette direction (de Montgolfier et Natali, 1987 ; Weber, 1996). Cette négociation se fait *via* l'intervention d'un médiateur à la fois caution et "accoucheur" de l'accord (Henry, 1987 ; Andriatahiana et al., 1996). On retrouve ainsi bien les trois points déduits précédemment de la nécessité de prise en compte simultanée des niveaux d'organisation collectif et individuel : passage par un tiers ayant un rôle de médiateur, implication tout au long du processus des individus concernés et l'existence d'un objet médiateur légitime, le problème à résoudre.

Cette démarche donne en particulier la possibilité de prendre en compte les interactions entre des individus ayant des critères et des objectifs différents et différents niveaux d'organisation pour la gestion de biens communs (Barouch, 1989). Or nous avons vu que c'est là l'une des caractéristiques observées des systèmes irrigués et qu'elle pourrait être une cause de problèmes de coordination ayant un effet négatif sur la viabilité des systèmes irrigués.

Une place primordiale y est également donnée à la négociation entre différents scénarios, celle-ci devant déboucher sur des règles de comportement pour les différents niveaux d'organisation étant *savoir commun* pour les différentes parties intéressées. L'objet de la négociation porte bien sur la définition de règles et non sur un échange (Godard, 1989). Remarquons pour la suite que cette notion d'exploration de scénarios est bien en cohérence avec l'usage qui a été fait jusque là du modèle : les simulations ont permis de tester plusieurs moyens vers un objectif particulier, la continuité de l'exploitation du système irrigué par les paysans actuels.

⁹⁹ pour les questions relatives à l'aménagement du territoire il s'agit de 20 à 30 ans. Ce sont donc des objectifs concernant les enfants de ceux qui négocient, d'où le terme de "patrimonial".

Ainsi les différentes parties prenantes sont incluses dans le processus de conception ou de réhabilitation ce qui augmente les chances de cohérence entre les règles collectives émises et les comportements individuels de chacun. Ceci ne prouve cependant pas qu'il y aura cette cohérence. Une telle démarche, dont l'objectif est, pour résumer, d'éviter que ce ne soient les bailleurs qui pompent ou que les pompes ne baillent, apparaît intéressante parce qu'elle est en phase avec les observations faites sur les simulations et qu'elle peut prendre en considération des problèmes observés sur le terrain.

Il reste encore la question de sa mise en œuvre pratique et de la nécessité d'éventuels outils pour faciliter le travail du médiateur. Ceci nous renvoie au modèle réalisé, puisque des parallèles fréquents ont pu être faits entre cette démarche et le monde des SMA aussi bien au niveau des questions posées que des usages.

6. Retour sur la méthode utilisée

Cette question d'outils pour une démarche patrimoniale renvoie au SMA mis en place pour représenter les systèmes irrigués, support de notre travail jusqu'à présent. Plus largement, il s'agit de s'interroger maintenant sur l'ensemble de la démarche mise au point et utilisée, non seulement pour la modélisation, mais aussi sur la méthode d'analyse des observations sur le terrain présentée au deuxième chapitre. Cette discussion de la méthode utilisée comporte également une comparaison avec les autres méthodes dont les limites pour le traitement de la question de la viabilité des systèmes irrigués ont été présentées au chapitre 2.

6.1 Au sujet de la modélisation

Un parti pris méthodologique important de notre démarche concerne l'usage de la modélisation et en particulier d'un système multi-agent. Ceci a résulté dans la mise au point d'un outil, un système irrigué virtuel, pour lequel diverses questions se posent : quelle est sa validité par rapport à ce qu'il représente ? peut-il représenter plus que ce à partir de quoi il a été construit ? outre l'exploration de questions de recherche quels autres usages sont possibles pour ce type d'outils ?

6.1.1 Question de la validation de ce genre d'outil

La méthodologie de la modélisation comprend classiquement une étape de vérification du modèle comprenant un travail de validation (Pavé, 1994). Ce dernier consiste le plus souvent en une confrontation de résultats de simulations aux observations réelles sur le monde réel. On s'intéresse ici aux différences éventuelles dues à l'utilisation du modèle et non pas dues à la réalisation de ce dernier, c'est-à-dire que, en prenant l'exemple d'un modèle informatique, on suppose qu'il n'y a pas d'erreurs de programmation, celles-ci ayant été éliminées lors de la phase de vérification du modèle. En d'autres termes, il s'agit de se poser la question du niveau d'erreur commis en remplaçant des valeurs observées par des valeurs simulées : "on tente de s'assurer que l'ensemble construit représente bien le monde réel" (de Marsilly, 1997).

Cette démarche de vérification / validation est surtout d'actualité dans le domaine de l'ingénierie du logiciel, elle l'est encore assez peu en pratique pour ce qui concerne le monde de la simulation en général (Whitner et Balci, 1989). En ce qui concerne les SMA et les autres méthodes de modélisation de systèmes complexes, elle l'est encore moins. Ainsi dans un ouvrage issu du deuxième colloque "Simulating societies" (Gilbert et Conte, 1995), une seule communication aborde un peu cette question (Drogoul et al., 1995). De même dans une communication récente sur l'art de la simulation en sciences sociales, la question

de la validation, appelée "externe" dans ce cas, est explicitement "non considérée" (Axelrod, 1997). Dans ce contexte que veut dire une telle démarche pour un modèle comme SHADOC ?

En fait outre la difficulté inhérente à la complexité du système représenté, la question de la validation ne se pose pas dans les mêmes termes pour cette dernière catégorie de modèles, sans parler de la possibilité d'observer ou non les résultats à valider. L'objectif de ces modèles n'est souvent pas le même. Quand certains modèles ont pour objectif de fournir des résultats prêts à être utilisés, d'autres cherchent à comprendre les interactions entre les différentes composantes du système représenté.

Dans tous les cas, il n'est pas nécessaire que le modèle soit entièrement validé : même si il s'agit d'un modèle dont l'objectif est de fournir des résultats prêts à l'emploi, certains calculs intermédiaires peuvent être faux du moment que le résultat obtenu donne satisfaction. Par exemple un modèle à qui il est demandé d'évaluer des débits peut estimer des hauteurs d'eau erronées. La validation d'un modèle est en fait toujours partielle et multidimensionnelle (Mullon, 1988 ; Shannon, 1992).

La validation dépend à la fois des sorties observées des simulations et de l'usage qui en est fait : prédiction, compréhension, aide à la décision, illustration... Historiquement les modèles informatiques et mathématiques ont été beaucoup utilisés pour répondre à des questions, ils se devaient d'être précis et fiables. Ce ne sont cependant pas les seuls modèles à avoir été utilisés. Le dilemme du prisonnier est par exemple un modèle ayant été beaucoup utilisé depuis l'article de Hardin sur la "tragédie des communs" (Hardin, 1968). Jusqu'à sa comparaison avec des jeux de rôles contrôlés en laboratoire en économie expérimentale (Ostrom et al., 1994)¹⁰⁰, sa seule validation était sa capacité à produire des théories paraissant pertinentes aux yeux de ceux qui les produisaient pour expliquer leurs observations. Faut-il sous prétexte que l'on passe à des modèles informatiques devenir plus difficile quant à la validation du modèle ? tout dépend si cela s'accompagne d'un glissement quant à l'usage qui en est fait...

Si la validation consiste à se poser la question de la pertinence des résultats des simulations vis-à-vis de leur objectif, c'est-à-dire de confiance dans le modèle, elle implique de "faire tourner" celui-ci. La validation dépend alors également de la personne qui utilise le modèle. Si cette dernière est inconnue et occasionnelle, elle voudra probablement des résultats

¹⁰⁰ qui sont en fait eux mêmes une autre forme de modèle.

garantis, la validation devra déjà avoir eu lieu car son expérience ne lui permet pas de prendre du recul sur les résultats. Si par contre celle-ci est régulière, si elle a éventuellement participé à la conception du modèle, la validation peut également être vue comme un processus d'apprentissage au fur et à mesure des simulations : à chaque usage d'un modèle jugé satisfaisant pour un objectif donné, la crédibilité accordée à celui-ci est augmentée. C'est donc bien une participation à un processus de validation tel qu'il est présenté classiquement, c'est-à-dire un accroissement de la crédibilité et de la légitimité du modèle (Law et Kelton, 1991).

Quant au cas particulier de SHADOC, pour les usages exploratoires qui en ont été faits jusqu'à présent, la question de la validation concerne justement un tel processus d'apprentissage, ici appelé modélisation d'accompagnement (Bousquet et al., 1997), et destiné à comprendre un processus. Pour cet objectif, même si l'essentiel de la validation repose sur la pertinence des nouveaux points de vue sur les systèmes irrigués qui en découlent, la production de ces nouveaux points de vue a nécessité d'accorder un minimum de crédibilité aux résultats des simulations. Cette dernière repose sur plusieurs éléments.

Tout d'abord un travail de vérification du modèle a été mené :

par l'observation de grandeurs simulées de valeurs connues par ailleurs. Il s'agit d'une vérification sur des cas particuliers et/ou sur des valeurs intermédiaires.

par l'observation des processus en œuvre au moyen d'interfaces graphiques sur l'évolution des agents d'une part, comme les niveaux d'eau des parcelles ou les cagnottes des paysans, ou sur les communications entre les agents d'autre part, en adaptant un observateur de liens réalisé dans un autre travail (Proton et al., 1997) qui permet de voir de manière dynamique les différentes communications entrant dans le processus d'évolution du système irrigué.

par des relectures croisées du code.

A cette vérification des résultats du modèle, s'est ajouté un travail de confrontation à des données observées sur le terrain telles que la consommation de gasoil et à des dires d'experts pour les processus, tels que la modification des rapports sociaux résultant de la place importante prise par le facteur économique comme il a été mentionné au § 5.1.1. Il s'agit là d'une validation par confrontation (Coquillard et Hill, 1997) partielle puisqu'elle ne porte pas sur l'ensemble du modèle d'une part et que tous les experts n'ont pas nécessairement le même avis. En particulier un travail de restitution des simulations reste à faire auprès des paysans. Ce travail, dont l'objectif premier est de rendre compte de ce qui a été fait avec les informations recueillies au cours des entretiens, entrera également dans le

processus de validation et de modélisation d'accompagnement selon les réactions que cette restitution suscitera. Les résultats d'une telle confrontation permettent de s'assurer que les résultats du modèle ou des résultats intermédiaires supposés importants dans la formation des éléments tirés du modèle sont raisonnables. Il s'agit de garde-fous.

La validation par confrontation ne porte pas seulement sur des observations ou des "dires d'experts". Elle peut également être étendue à d'autres travaux théoriques sur les systèmes irrigués. Il s'agit alors d'une confrontation par étude de la cohérence entre deux modèles, ou deux explications de phénomènes observés. Les résultats analysés au § 5.1 ont montré une certaine cohérence avec d'autres travaux n'utilisant pas cette méthode pour travailler sur les systèmes irrigués dans les questions soulevées par les simulations, telles que pour la prise en compte des structures sociales dans la constitution des groupements propres à un système irrigué. Ces travaux antérieurs ont même parfois servi à l'interprétation des résultats des simulations. Ces travaux étant reconnus par ailleurs, la crédibilité du modèle est renforcée.

Enfin l'analyse de sensibilité faite au chapitre 4 participe aussi à cette crédibilité en montrant que les scénarios peuvent être séparés du point de vue de leurs résultats. La variabilité observée dans les simulations n'est pas seulement due aux facteurs aléatoires inclus dans le modèle.

De nouvelles simulations seraient nécessaires pour bien comprendre le comportement du modèle. Les résultats présentés ont déjà tracé des pistes pour de telles nouvelles simulations. Il s'agirait d'avancer dans la connaissance du modèle au travers de guides constitués de questions. Une autre voie possible pour accroître la connaissance et la crédibilité du modèle est de créer du bruit autour de quelques uns des scénarios initiaux en testant des suites de scénarios dont le premier élément initial est un des scénarios déjà testés et chacun des autres éléments de la suite reprend tous les paramètres de l'élément précédent en en modifiant un de manière aléatoire. L'idée sous-jacente est alors de tester la robustesse du modèle à des erreurs dans l'écriture des scénarios.

Toutes ces nouvelles voies de scénarios restent à explorer pour améliorer notre connaissance du comportement du modèle et notre compréhension de la viabilité des systèmes irrigués, maintenant que cette méthodologie utilisant un SMA comme système irrigué virtuel a été testée, ce qui était l'objectif de ce travail. Une autre question se pose cependant pour que cette amélioration de la connaissance du comportement du modèle corresponde réellement à une amélioration de la compréhension de la viabilité des systèmes irrigués : celle de sa généralité.

6.1.2 Question de la généralité du modèle

Tous les éléments constituant le modèle SHADOC sont issus des terrains étudiés dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal ou de recommandations faites dans la littérature. Les questions qui en découlent intéressent *a priori* les seuls systèmes irrigués de la vallée du Fleuve Sénégal. Dans quelle mesure ces résultats sont-ils également pertinents dans d'autres contextes ? Le modèle mis en place peut-il représenter d'autres systèmes irrigués ou risque-t-on de se retrouver dans la même situation que le touriste du sketch de Coluche perdu dans Dakar avec son plan de Paris ?

Il s'agit là en fait d'un cas particulier de la question de la validation discutée précédemment, pour un usage en extrapolation. On se retrouve dans la même situation que la plupart des modèles classiques qui ne sont validés que sur une plage donnée de paramètres et sont utilisés en dehors de cette plage (de Marsilly, 1997). Pour un usage exploratoire du même type que celui exposé précédemment, la question de la validité de l'usage de ce modèle pour d'autres sites se pose en fait de la même manière qu'elle se posait pour les sites à partir desquels il a été construit. L'amorce du processus de modélisation d'accompagnement n'est plus une connaissance du terrain et des questions sur celui-ci comme dans le premier cas mais cette version du modèle et ses enseignements comme illustré par la Figure 53 ci-dessous reprise de la figure 11.

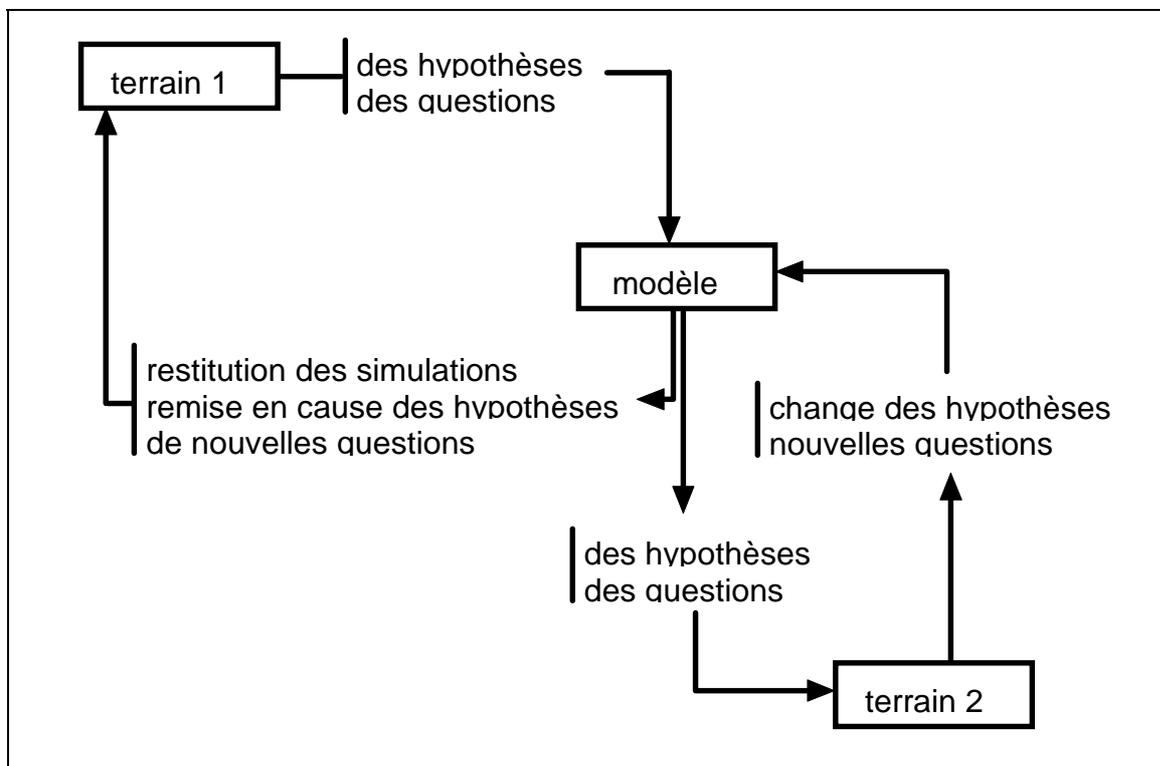


Figure 53 : modélisation d'accompagnement et généralité du modèle

Le niveau de généralité du modèle s'évalue alors en fonction des modifications demandées par cette mise à l'épreuve d'un deuxième terrain et leur pertinence pour le terrain initial. En ce qui concerne SHADOC, ce travail reste à faire. Cependant la généralité de la définition initiale et la lecture d'études de cas, même si elles ne se rapportent généralement pas à la même question permettent d'être assez confiant. Les différents éléments et processus représentés sont étudiés dans la plupart des études de cas, en particulier ce qui concerne les règles d'accès à l'eau (Gilot, 1994) et la redevance hydraulique (Svendsen et Changming, 1990), pour ces processus quelques modalités peuvent manquer le cas échéant mais être facilement ajoutées vu la structure du modèle. Cependant certaines études de cas mettent l'accent pour l'étude de la dynamique de l'usage des systèmes irrigués sur des éléments qui ne sont pas ou peu représentés dans SHADOC : gestion des intrants dont les produits de traitement (Batchelor et McClendon, 1992), droits fonciers et droits d'eau (Le Cour Grandmaison, 1984 ; Hecht, 1990), choix de culture (Burton, 1994 ; Layton et al., 1994) ou encore questions d'entretien et de maintenance (Lou et Hou, 1988). D'un autre côté peu s'intéressent aux questions d'apprentissage. Ceci ne remet en cause ni notre représentation ni les études de cas, même s'il s'agissait de représentations élaborées pour la même question, mais implique un travail complémentaire sur la généralité du modèle.

La généralité peut également être vue à différents niveaux. Imposer comme condition que le modèle issu des terrains sénégalais puisse être utilisé tel quel dans d'autres sites pour lui accorder un caractère générique revient *a priori* à répondre par la négative : cela revient au même que de se poser la question de la possibilité de représenter Dakar avec un plan de Paris. Par contre, un plan de Dakar et un plan de Paris ont des éléments en commun : ils sont tous les deux constitués de rues, de places et d'ensembles d'habitations. Les plans de deux villes proches et de taille semblable, telles que deux villes moyennes des Etats-Unis par exemple, auront les mêmes points communs avec en plus un quasi recouvrement des noms de rue utilisés. La généralité doit en fait être recherchée dans ces exemples au niveau des cadres de représentation.

C'est un des résultats auquel on peut également s'attendre d'une étude de la généralité de SHADOC au travers des études de cas ou des terrains secondaires. La question qui se pose est alors, à quel "méta-niveau" trouve-t-on la généralité ? Jusqu'où faut-il remonter pour avoir un cadre de représentation générique ? Un des objectifs d'un prolongement sur des terrains secondaires devrait être la mise au point d'un méta-modèle dédié à la représentation de systèmes irrigués. Il ne s'agit pas d'arriver à un gros modèle comportant tous les processus rencontrés dans différents terrains afin que tous ceux-ci soient pris en

compte : un tel modèle risquerait fort d'être inutilisable et de s'avérer incomplet devant un nouveau terrain. Il s'agit plutôt, sur l'exemple du simulateur générique de dynamique de population de poisson MobiDic (Le Page et Ginot, 1997), de constituer un méta-modèle dont pourraient être dérivés différents modèles de systèmes irrigués dépendant des terrains représentés et des questions posées. Une évolution vers un tel méta-modèle générique pourrait prendre la forme d'un outil contenant une bibliothèque de processus représentés parmi lesquels l'utilisateur choisit ceux dont il fait l'hypothèse qu'ils sont importants pour la dynamique du système dans le cadre de la question posée, ainsi qu'un canevas pour ajouter de nouvelles modalités à ces processus et / ou de nouveaux processus.

6.1.3 Quels autres usages du modèle sont envisageables ?

Enfin SHADOC a jusqu'à présent été utilisé seulement en recherche, pour explorer des scénarios et comprendre les liens entre les modes de coordination entre les paysans et la viabilité des systèmes irrigués. On a vu qu'un tel type de modélisation permet d'obtenir à ce niveau des résultats intéressants pour avancer dans la compréhension des différents processus en œuvre *via* les interactions entre les acteurs de ces systèmes. Il donne aussi des pistes en termes d'action pour la viabilité des systèmes irrigués, au moins dans la vallée du Fleuve Sénégal. Pour un autre modèle du même type sur la pêche dans le delta central du Niger, cette utilisation exploratoire débouche actuellement sur la mise en place d'un observatoire de l'évolution du système (Morand et Bousquet, 1998), les résultats des simulations ont permis de constituer le protocole des observations à mettre en œuvre.

Il ne s'agit cependant là que d'un seul des usages possibles des modèles. Depuis ces simulations exploratoires jusqu'à des simulations prédictives, selon la classification de Troitzsch (Troitzsch, 1997), quels autres usages peut avoir ce type de modèles et à quelles conditions ? Les simulations exploratoires de scénarios peuvent également avoir pour objectif d'aider à la compréhension de processus, ce sont alors des expériences dynamiques sur un système artificiel, ou de proposer des solutions, on se rapproche là des systèmes experts, ou encore d'explorer les conséquences de choix maintenant pour donner une gamme de futurs possibles, c'est-à-dire un usage en prospective.

L'usage en recherche pour la compréhension de la dynamique d'un système n'est ainsi pas le seul usage exploratoire possible. Un tel modèle pourrait également être utilisé en formation sur la gestion et l'aménagement de systèmes irrigués de même que sont parfois utilisés des jeux, eux-mêmes modèles de systèmes irrigués (Burton, 1989b). Cet usage du modèle en formation est en fait très proche de l'usage du jeu dans ce contexte : il s'agit de mettre en situation les étudiants, qu'ils fassent "comme si", et explorent les conséquences de choix qu'ils pourraient être amenés à faire s'ils étaient en situation réelle (Mauriras-

Bousquet, 1984). Le protocole d'un tel usage reste à définir, mais on peut déjà imaginer qu'il servirait à concevoir des systèmes irrigués possibles dans différentes hypothèses de comportements individuels et de contexte. La variabilité des évolutions induites par cette diversité est bien mise en évidence. Ceci permet également d'apprendre sur des cas virtuels et non à partir de cas réels dont les "bénéficiaires" payent les pots cassés qu'ils n'ont pas nécessairement demandés.

Dans les deux cas précédents, les simulations sont, sans ambiguïté, sans portée prédictive. Elles ne portent *a priori* sur aucun cas concret. Ce n'est pas le cas d'un troisième usage possible, d'où la nécessité d'un approfondissement complémentaire de sa mise en œuvre éventuelle. Il s'agit dans la suite de la discussion du chapitre 5 sur l'intérêt de démarches patrimoniales de s'intéresser à l'usage de ce type de modèles comme objet médiateur, comme support de négociation.

Cet usage d'un modèle comme objet médiateur n'est pas si nouveau... même quand il n'est pas prévu pour ça. Ainsi, dans le cas de modèles d'aide à la conception en génie industriel, les modèles ayant quitté le laboratoire pour une utilisation industrielle n'ont pas toujours été utilisés en tant qu'outils d'aide à la conception, certains n'ont pas servi en tant que tel mais comme support de discussion entre les différentes entités participant à un projet¹⁰¹ ! En ce qui concerne SHADOC, son utilisation demande d'écrire un scénario de conditions initiales. Ceci participe à la définition d'une représentation commune du système irrigué. Dans cette perspective, le modèle demande comme on l'a vu un complément de validation puisque de nouveaux usagers du modèle sont impliqués et qu'ils peuvent y poser de nouvelles questions. Ce retour sur un processus de validation, même s'il reste encore à en définir le protocole, participe également à la définition d'une représentation commune aux différents acteurs du système en leur demandant de discuter les hypothèses mises dans le modèle. Cette première étape débouche donc sur deux éléments importants d'une démarche patrimoniale : constituer une représentation commune du système et de son évolution d'une part et se constituer un "langage commun", une "cité" (Boltanski et Thévenot, 1991), pouvant servir dans la discussion sur des avènements souhaités pour le système. Le modèle peut alors servir, s'il y a un accord autour de cet objet médiateur, pour explorer les différents scénarios proposés par les acteurs du système et ainsi donner des éléments complémentaires dans la négociation.

¹⁰¹ "anecdote" racontée par O. Garro lors de la présentation de sa communication aux Journées Françaises d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents de 1996 (Garro, 1996).

Le modèle peut aussi servir à constituer un objet médiateur : l'aspect boîte noire du modèle, la nouveauté de l'outil informatique par exemple peuvent constituer dans certains contextes des barrières à l'emploi du modèle lui-même comme objet médiateur. Dans ce cas le modèle peut être traduit sous une autre forme ou servir à la constitution d'un autre objet médiateur, tel que, par exemple un jeu de rôles, comme il a déjà été envisagé de le faire pour la restitution de SHADOC (Bousquet et al., 1997).

Les parallèles entre jeu de rôles et problèmes rencontrés pour la gestion de l'environnement en font un outil intéressant pouvant appuyer une démarche patrimoniale (Mermet, 1992). L'utilisation d'un jeu de rôles dans ce cadre a déjà été testée de manière satisfaisante, par exemple pour le développement d'une zone rurale dans le Massif Central (Piveteau, 1994). Dans ce cas, le jeu joue le rôle d'un objet médiateur en constituant la cité dans laquelle se retrouvent les joueurs le temps du jeu. Cependant, Piveteau relève des limites à cette pratique en particulier dans le temps nécessaire à sa conception, la phase d'analyse des résultats et la mise en commun de différents points de vue dans sa constitution. Ajoutons qu'un jeu est aussi limité par la taille des effectifs et des processus qu'il peut mettre en œuvre par rapport à la complexité des systèmes représentés (Mermet, 1992). C'est pourquoi Piveteau propose de le compléter par d'autres méthodes de prise en compte de la complexité (Piveteau, 1994).

Les SMA pourraient être une de ces méthodes en identifiant joueur et agent : jeu simulé dans la machine ou SMA animé dans un jeu ? "Le modèle peut aussi bien être un ensemble de rôles et de règles pouvant être joués par des acteurs humains qu'un ensemble de lignes de code informatique"¹⁰² (Hanneman, 1995). Des simulations dans la phase de conception d'un jeu devraient permettre sinon d'accélérer cette phase, au moins d'en explorer plus facilement les différentes évolutions possibles, et ainsi d'améliorer la question du changement d'échelle. En phase de jeu ou de simulation avec un objectif expérimental ou exploratoire, le contrôle et l'analyse ultérieure du déroulement ainsi que la reproductibilité de l'expérience sont également plus aisés dans le contexte informatisé. Ceci, associé à la question d'échelle pouvant être mise en œuvre, fait du SMA un outil potentiellement intéressant pour cadrer et analyser les résultats de jeux. De son côté, le jeu a aussi beaucoup à apporter aux SMA. La pratique du jeu est en effet bien plus ancienne, selon certains le jeu serait le propre de l'homme (Huizinga, 1951), et pourrait constituer une forme plus adaptée pour la communication d'une représentation sous forme de SMA ainsi que de

¹⁰² "The model can be either a set of roles and rules to be played by human actors or a set of a computer code" (trad. personnelle).

résultats de simulations. De telles simulations par le jeu pourraient à leur tour enrichir les représentations à la base du modèle.

6.2 Au sujet de la méthode utilisée pour l'analyse des observations de terrain

Le modèle discuté ci-dessus est en fait un élément de la démarche employée pour traiter la question de la viabilité des systèmes irrigués. Il a lui-même résulté d'une méthode d'analyse du terrain particulière, présentée au § 2.3.1, basée sur la compréhension des interactions entre les différentes entités d'un système irrigué et la dynamique de celles-ci. Cette démarche a notamment fait appel aux concepts de modes d'appropriation, ensemble des relations entre une société et son environnement, et les processus de décision, dynamique de cet ensemble de relations. Revenons sur ce choix d'un travail sur les interactions, issu de l'analyse des autres démarches existant sur les systèmes irrigués.

6.2.1 Implications de cette démarche

Ce choix des interactions, comme guide dans l'abord des terrains étudiés et dans leur analyse, oriente le travail vers la dynamique des systèmes irrigués. Ceci correspond bien à la question posée initialement mais est également susceptible de limiter la portée des résultats à ces aspects dynamiques. En effet, si l'on admet avec la théorie de la viabilité le principe d'inertie selon lequel les variables d'état d'un système ne changent de valeur que si elles y sont contraintes (Aubin, en préparation), la dynamique du système passe nécessairement par les interactions. Ceci n'est en fait qu'une extension de la dynamique des systèmes en physique selon laquelle toutes les forces sont issues d'une interaction. Cette démarche paraît ainsi bien adaptée à une étude dynamique mais va également orienter les résultats vers tout ce qui est lié à la dynamique du système : processus, évolution. Il ne faut pas en attendre *a priori* une trop grande fiabilité pour ce qui est des résultats relatifs à des "tranches de vie", c'est-à-dire à des états du système à un moment donné.

Cette focalisation sur les interactions est à relier à d'autres courants de recherche récents en sciences sociales qui permettent de réduire le dualisme souvent posé entre, pour être bref, approches holiste et individualiste, entre une vision du monde reposant sur des normes sociales déterminant les comportements des individus et une vision du monde où ces comportements dépendent de la rationalité individuelle de chacun et construisent éventuellement des comportements collectifs. Ces deux visions du monde ont évolué vers une analyse des modes de coordination (Thévenot, 1995) : analyse des structures d'interactions comme éléments de base des structures sociales (Hinde, 1976) d'une part et modèles de coordination et non plus d'action d'autre part. Ces démarches récentes s'appuient notamment sur le rôle du jugement et des interprétations à travers des références communes (Thévenot, 1995) : les interactions se font *via* une interprétation du comportement observé d'autrui par un ensemble de significations lui-même savoir commun :

ce peut être par exemple un langage verbal ou non verbal, un "savoir vivre" réglant les relations entre les gens. Ceci nous renvoie à la notion de représentation mise en avant dans la modélisation.

Le passage par des simulations informatiques a permis en outre de s'affranchir de la nécessité d'une trop grande réduction de la variabilité tout en gardant la possibilité d'explorer la dynamique. Cette méthode de description et d'analyse combine ainsi la plupart des avantages d'une part des travaux monographiques, qui permettent bien de rendre compte d'une variabilité observée mais plus difficilement d'en percevoir les conséquences d'un point de vue dynamique, et d'autre part des avantages de méthodes de modélisation plus classique, telle que la modélisation mathématique, plus formalisées mais au réalisme plus limité en particulier en ce qui concerne la variabilité propre aux systèmes. Le type de modélisation utilisé est intermédiaire comme représenté sur la Figure 54 ci-dessous. Or la variabilité est au cœur de la représentation de nombreux processus en cours dans des systèmes où l'homme est présent (Weber, 1992).

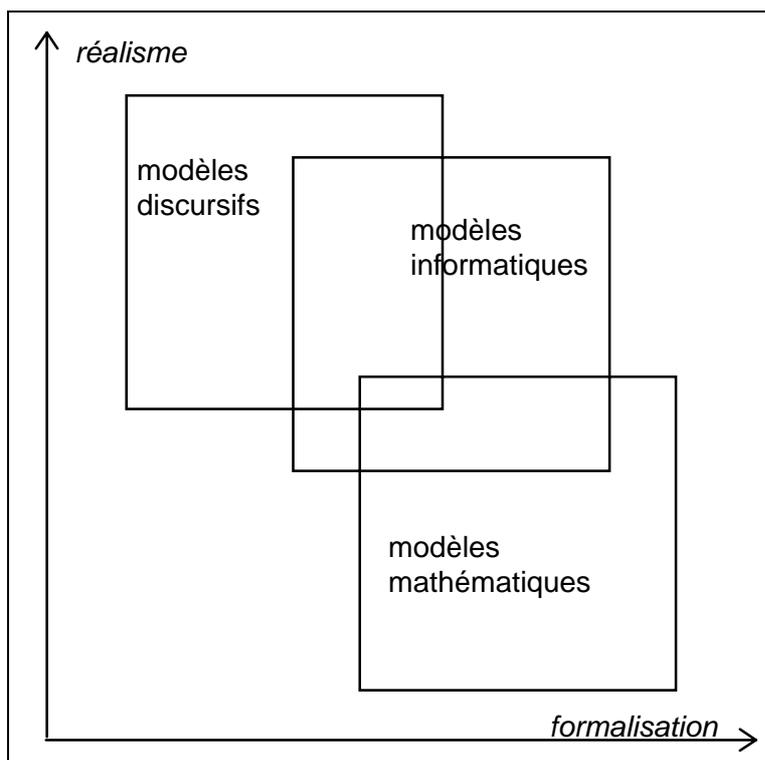


Figure 54 : représentation de diverses formes de modélisation

Par le choix de cette démarche reposant sur les interactions et leur dynamique explorée au moyen de simulations, ce travail reprend à son compte les travaux théoriques qui la supportent et permet, à la lumière d'une application à un type de système particulier, de voir

dans quelles mesures les conséquences théoriques des hypothèses de départ sont vérifiées et si des résultats complémentaires sont obtenus.

6.2.2 Conséquences de cette démarche

Tout d'abord cette démarche s'est révélée pertinente pour la compréhension de la viabilité des systèmes irrigués dans la mesure où elle a permis de soulever de nouvelles questions et de proposer de nouvelles méthodes pour la conception ou la réhabilitation de systèmes irrigués¹⁰³. Ceci n'est pas vraiment une surprise car, d'une part le système irrigué est défini comme un lieu d'interactions et, d'autre part la viabilité est une notion liée à la dynamique d'un système. Il subsistait néanmoins le risque de pouvoir effectivement observer des interactions et leur dynamique mais que celles-ci n'aboutissent à rien pour la compréhension de la viabilité du système : la part d'aléatoire incluse dans la représentation des systèmes étudiés et leur complexité induite par le nombre de paramètres et la multiplicité des voies d'interaction auraient pu ne pas permettre à cette démarche de déboucher sur ces résultats.

Le chapitre 5 a mis en évidence l'importance des points suivants pour la viabilité des systèmes irrigués :

- une prise en compte simultanée des différents niveaux d'organisation.
- un minimum de diversité au sein de la population du système.
- la variabilité de l'effet de l'apprentissage.
- les processus dans lesquels les réseaux sociaux interviennent.

Ces résultats sont pour l'essentiel une confirmation des hypothèses théoriques sous-jacentes. Ainsi l'absence de trace d'existence de bonnes règles collectives ou de bons comportements individuels indépendamment les uns des autres est une traduction de la réduction du dualisme entre individualisme et holisme liée à la prise en compte des modes de coordination : un seul point de vue ne pourrait expliquer la viabilité d'un système irrigué qui viendrait de la cohérence et des relations entre les deux. La variabilité de l'effet des processus d'apprentissage est à relier au caractère non prévisible de ces systèmes complexes (Weber, 1992). Enfin l'importance des réseaux sociaux pour les processus dans lesquels ils interviennent se trouve bien dans le fil d'une approche privilégiant les interactions et donc selon les hypothèses, une approche centrée sur la dynamique du système.

¹⁰³ nouvelle dans le cas des systèmes irrigués.

Ces résultats vont même plus loin sur certains points que les hypothèses théoriques présentées ci-dessus, en particulier pour ce qui concerne la prise en compte de la variabilité. Non seulement la méthode employée permet bien de prendre en compte la variabilité, mais en plus indique que cette variabilité, si elle est modérée, est positive pour la viabilité du système. Elle semble montrer en effet que la simple prise en compte de la variabilité, qui pourrait aussi l'être par des simulations se basant sur des distributions représentatives de cette variabilité, n'explique pas cet effet positif sur la viabilité : c'est l'activation de cette diversité par les interactions entre les différents acteurs au sein du système qui serait explicative de cet effet de la variabilité sur la viabilité, par exemple *via* une spécialisation des acteurs.

Ainsi, outre l'apparition de questions nouvelles sur les systèmes irrigués pour traiter de leur viabilité, ces résultats, par leur cohérence avec les hypothèses théoriques de la démarche employée, accroissent la crédibilité de celle-ci. Dans d'autres contextes on dirait qu'ils participent à sa "validation".

Quelques questions restent cependant en suspens : certains paramètres structurels, tels que ceux relatifs à la taille du périmètre ou des différents groupements ainsi qu'à l'homogénéité de ceux-ci, habituellement considérés comme importants à prendre en compte pour la viabilité des systèmes irrigués ne paraissent pas avoir un effet à l'issue de ces simulations. Il pourrait être tentant de remettre en question ce résultat issu d'une démarche centrée sur la représentation des coordinations et les aspects dynamiques. Il s'agit plutôt de le relativiser : si l'on accepte ce principe de donner plus d'importance à la dynamique pour étudier la viabilité d'un système irrigué, alors la question de la prise en compte de ces paramètres structurels n'est plus primordiale.

6.2.3 situation par rapport à d'autres démarches ?

Le choix de cette démarche a été motivé par les limites observées des méthodes habituellement utilisées pour l'étude des systèmes irrigués dans le contexte de la question de la viabilité. Il s'agit ici de comparer *a posteriori* la démarche utilisée avec les autres démarches : quelles différences et quels points communs ? en quoi cette nouvelle démarche a-t-elle permis de dépasser les limites observées pour les autres ?

La caractéristique essentielle de cette démarche par rapport à toutes celles présentées aux § 2.1 et 2.2 est son parti pris de commencer par considérer les interactions et leur dynamique dans toute représentation d'un système irrigué. Le recours à la modélisation et aux simulations à des fins exploratoires dans le processus même de la démarche est une

autre particularité, rarement présente dans les autres cas. Même si les autres approches sont pour la plupart loin d'être étrangères à l'usage de modèles, il s'agit le plus souvent d'un usage *ex post*, en valorisation du travail de compréhension du fonctionnement du système irrigué.

Cette démarche ne permet pas d'aller aussi loin que les autres dans l'approfondissement de connaissances particulières sur les systèmes irrigués. Elle peut par contre mettre en évidence des voies d'approfondissement pour l'une ou l'autre de ces approches. Pour ce qui concerne SHADOC, la nécessité de tels approfondissements n'est pas apparue car les connaissances correspondantes étaient présentes dans la littérature. Notre démarche s'appuie sur ces différentes méthodes et constitue un outil de dialogue entre elles.

Cette démarche satisfait bien aux besoins mis en valeur suite aux limites observées sur les démarches existantes pour traiter de la question de la viabilité des systèmes irrigués. Elle est par construction interdisciplinaire puisqu'elle cherche à représenter les différentes interactions en œuvre entre la société locale et l'aménagement. La question de la compatibilité de données générées ne se pose pas comme dans les approches par couplage de modèles car le SMA est conçu autour de ces interactions. Par contre la question de la diffusion des erreurs déjà observée pour ces modèles n'a pas été plus traitée dans ce cas. Le problème se pose cependant moins dans le cadre de l'usage actuel du modèle en exploration de scénarios et rejoint la question de sa validation, déjà traitée. Enfin, toujours par rapport aux approches de couplage des modèles pour lequel se posait un peu la question de la représentation de la variabilité des interactions, ce problème a disparu.

En ce qui concerne les méthodes issues des approches systémiques et intégrées, la question de la lourdeur de la mise en œuvre n'est pas à proprement parler résolue dans cette approche. Rien n'interdit en suivant la démarche proposée de passer par une représentation où l'on s'attache à décrire finement un grand nombre de paramètres afin de reproduire au mieux des systèmes irrigués existant. Tout dépend de l'usage qui est fait du SMA mis en place. Cependant par rapport à des approches telles que celles basées sur des jeux de simulation, la reproductibilité et le contrôle des expériences sont plus aisés. Pour ce groupe de méthodes les limites principales mentionnées concernaient le traitement du "multi" (Rey, 1996), or les systèmes irrigués sont des systèmes multi-acteurs, multi-objectifs et multi-ressources. Nous avons vu que la possibilité de prendre en compte cet aspect "multi" des systèmes irrigués constitue un des moyens d'expliquer la viabilité des systèmes irrigués.

Cette démarche est bien en phase avec les autres méthodes : la discussion sur l'importance relative des différents paramètres des scénarios sur la viabilité a fait appel à de nombreuses références issues de pratiques de recherche ou de développement utilisées par ou issues de ces méthodes. Elle a pu s'appuyer dessus, au sujet de la place des statuts sociaux dans la vie du système irrigué par exemple, ou leur apporter un nouvel éclairage, par exemple à propos de la formation de "paysans modèles".

Enfin, le traitement de la complexité n'aboutit pas à une reproduction la plus fidèle possible mais à une exploration des différents chemins d'évolution d'un système irrigué qu'elle autorise et une exploitation d'au moins une partie de la variabilité présente. ***Il s'agit en fait de représenter une partie de la complexité suffisante pour comprendre le fonctionnement du système irrigué pour laquelle la représentation qui en résulte reste manipulable.*** Le choix de cette partie a été fait ici au cours d'une modélisation d'accompagnement propre à un contexte de terrain particulier. Il s'agit maintenant d'explorer les conséquences de ce choix sur d'autres terrains pour éventuellement changer de mode de prise en compte de la complexité tout en restant dans un même cadre de représentation.

CONCLUSION

L'observation de l'état et de l'évolution des systèmes irrigués dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal, en concordance avec l'état et l'évolution des systèmes irrigués dans de nombreux autres endroits du monde, nous a amené à poser la question de la viabilité des systèmes irrigués. La viabilité d'un système irrigué est ici définie comme sa capacité à continuer à fonctionner avec une proportion non négligeable de parcelles mises en culture, pour des conditions initiales particulières et dans un contexte donné. Afin de prendre en compte des caractéristiques propres à l'étude des systèmes irrigués, interdisciplinarité et points de vue sur plusieurs niveaux d'organisation, nous avons choisi d'aborder cette problématique à partir de l'étude des modes d'organisation et de coordination en œuvre dans les systèmes irrigués.

Ceci nous a conduit à nous poser la question des méthodes et des outils permettant de comprendre et représenter des dynamiques d'interactions. A partir d'exemples de travaux sur la gestion de ressources renouvelables, nous nous sommes orientés vers la mise en place d'une démarche constituée d'une méthode d'appréhension du terrain et d'une méthode de modélisation et de simulation. La mise en place de cette démarche et le test de sa pertinence pour la question des liens entre modes de coordination entre paysans et viabilité des systèmes irrigués ont constitué le corps de ce travail. Celui-ci a néanmoins également permis d'avancer ou d'ouvrir quelques voies d'approfondissement notamment sur le fonctionnement des systèmes irrigués ou sur l'usage de modèles tel que celui qui a été utilisé.

Mise au point de la démarche et exemple d'utilisation

La démarche mise au point se compose de trois étapes :

acquisition de connaissances sur les terrains étudiés.

modélisation de ces connaissances de terrain.

simulations sur le modèle qui en résulte.

L'acquisition des connaissances s'est appuyée sur les concepts de mode d'appropriation et de processus de décision. Un système irrigué est vu comme un lieu d'interactions entre une société et un aménagement. Un état de ces interactions à un moment donné constitue un mode d'appropriation, leur dynamique constitue les processus de décision. Le système irrigué étant ainsi décrit, il restait à trouver un moyen d'en simuler la dynamique. Pour cela nous nous sommes tournés vers la construction d'un modèle.

La modélisation a consisté en la constitution d'un système multi-agent représentant un archétype des systèmes irrigués rencontrés dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Un système multi-agent est une méthode de modélisation issue de l'Intelligence Artificielle Distribuée mettant en scène des agents, entités informatiques autonomes dotées de capacités de représentation et de perception partielle de leur environnement et des autres agents et agissant en fonction de modifications de leur perception, de leurs représentations ou de messages reçus de la part des autres agents. Ce type de modélisation par des agents autonomes permet de bien représenter les interactions et d'explorer différentes hypothèses de modes de coordination.

Le troisième volet de la démarche mise au point et utilisée consiste dans l'établissement d'un plan d'expériences de simulations sur le modèle constitué préalablement. Il s'agit de décrire des scénarios de règles de comportement des différents agents représentés pour explorer des questions particulières sur le modèle. Ce troisième volet constitue en particulier un moyen de revenir de la modélisation vers le terrain à travers les résultats des simulations, dans un processus de modélisation d'accompagnement de la recherche : les résultats des simulations induisent une remise en cause des hypothèses faites sur le fonctionnement du système à l'issue du terrain précédent et posent de nouvelles questions demandant de nouvelles connaissances sur le terrain, enclenchant ainsi un nouveau cycle.

Au cours de ce travail nous avons réalisé deux cycles de ce processus {terrain, modélisation, simulation}. Un système irrigué virtuel, SHADOC¹⁰⁴, a été réalisé et utilisé pour un jeu de simulations en plusieurs étapes :

Connaissance du comportement du modèle débouchant sur un critère de partition des scénarios en classes de viabilité.

Recherche de corrélations éventuelles entre paramètres et viabilité d'un scénario.

Test de l'effet de la représentation des réseaux d'affinité sociale extérieurs au système irrigué sur la viabilité de ce dernier.

Test de l'importance de la représentation des processus d'apprentissage dans la viabilité des scénarios.

La mise en œuvre de cette démarche nous a permis d'obtenir de premiers résultats ou au moins des tendances sur la compréhension de la dynamique et la viabilité des systèmes irrigués.

¹⁰⁴ Simulateur Hydro-Agricole Décivant les modes d'Organisation et de Coordination

Une nouvelle démarche pour l'étude de la viabilité des systèmes irrigués

Ainsi, en faisant abstraction *a priori* du concept de décideur pour le remplacer par des processus de décision en tant que dynamique d'interactions, nous avons mis en place une démarche qui, tout en restant en phase avec les autres méthodes existant pour la compréhension du fonctionnement des systèmes irrigués, permet d'aller plus loin en traitant effectivement des systèmes irrigués comme de systèmes complexes.

L'alternance de phases de terrain avec des phases de modélisation et de simulation a permis de constituer un outil d'exploration de scénarios possibles d'évolution des systèmes irrigués avec différents cadres d'hypothèses sur le fonctionnement du système irrigué : prépondérance des règles liées à l'accès à l'eau, importance des règles relatives au crédit, prise en compte des mécanismes d'apprentissage. Chaque étape de simulation a renvoyé à de nouvelles questions sur le terrain.

L'utilisation de cette démarche pour les systèmes irrigués de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal a apporté quelques indications et voies d'approfondissement sur les liens entre modes de coordination et viabilité, ces indications et voies d'approfondissement sont détaillées au paragraphe suivant. Ces premiers résultats montrent que cette démarche semble pertinente pour aborder cette problématique et qu'il est intéressant de la poursuivre.

Au sujet de la viabilité des systèmes irrigués

Au sein des systèmes irrigués, au moins dans la moyenne vallée du Sénégal où la ressource en eau n'est actuellement pas limitante, les interactions pertinentes pour expliquer la dynamique en œuvre ne concernent pas uniquement l'eau. Celles relatives au crédit, à l'accès à une information fiable ou aux pratiques mises en œuvre ont une importance au moins égale pour ce qui concerne la viabilité du système irrigué¹⁰⁵. Ces différentes interactions sont importantes pour la viabilité car elles permettent de faire vivre la diversité propre à ces systèmes et de s'en servir comme moteur de la dynamique du système : sans la variabilité des agents, les interactions n'apportent rien pour la viabilité, de même que, sans l'existence des interactions, la variabilité est figée et n'a plus d'influence sur la viabilité. Ainsi l'effet positif d'un peu de diversité dans les comportements des paysans peut s'expliquer par une spécialisation de ceux-ci suivie d'échanges.

Ces interactions ne sont pas le seul fait de paysans individuels communiquant et échangeant deux à deux selon leur rationalité propre et en fonction de besoins momentanés.

¹⁰⁵ définie comme le nombre de campagnes que le système peut enchaîner avec un nombre minimum de parcelles mises en valeur sans intervention extérieure.

Des cadres collectifs institués, issus de processus collectifs ayant leur source hors du système irrigué et le "traversant" ou induits par l'existence d'entités partagées au sein du système tels que la pompe et le réseau de canaux, sont le lieu de ces interactions. Ceux-ci mettent en œuvre leurs propres règles et interagissent également si nécessaire avec les individus qui les composent. Tous les exemples de scénarios de règles collectives et de comportements individuels testés vont dans le sens d'une nécessité de cohérence entre les règles collectives et les comportements individuels en œuvre au sein des systèmes irrigués. Aucun des deux niveaux ne paraît avoir de préséance particulière sur l'autre.

Parmi ces "cadres collectifs institués", le contexte local induit différentes partitions en réseaux d'affinité sociale qui laissent des traces dans la dynamique du système irrigué. Les scénarios testés semblent montrer que ces réseaux sont importants pour la viabilité des systèmes irrigués à travers les processus dans lesquels ils interviennent et en particulier l'évolution des règles des paysans. Ceci amène à faire l'hypothèse que ce ne serait pas la constitution des groupements propres au système irrigué par rapport à ces réseaux d'origine externe qui serait importante, mais l'existence même de ces réseaux, quels qu'ils soient, pour les processus qui y font appel. Pour cela des simulations complémentaires seront cependant nécessaires.

Ces résultats, et notamment la nécessité d'une cohérence entre règles collectives et comportements individuels, nous ont amené à proposer d'essayer des démarches de type patrimonial pour des opérations de conception ou de réhabilitation de systèmes irrigués. En effet, elles permettent de bien prendre en compte les comportements individuels dans un cadre collectif en faisant appel à un tiers médiateur. Ainsi n'a plus cours une problématique telle que "initialement quel est le niveau d'organisation qui explique le comportement de l'autre ?". Si la viabilité des systèmes irrigués repose bien sur l'adéquation entre les processus mis en œuvre aux différents niveaux d'organisation, cette méthode, qui prend en compte la complexité sociale sans obligation de la connaître parfaitement (Weber, 1996), paraît alors bien adaptée.

Au sujet de la méthode employée

Dans la lignée d'autres travaux récents ou en cours sur la gestion de ressources en propriété commune, une forte composante de la méthodologie utilisée repose sur la modélisation et en particulier un système multi-agent jouant le rôle d'un système irrigué virtuel, support d'expériences pour explorer les conséquences de divers scénarios de règles collectives et individuelles. Dans ce travail, la modélisation et les simulations ont eu uniquement un usage en terme de recherche. Celui-ci est complètement imbriqué dans la constitution même du modèle : il s'est agi d'une modélisation d'accompagnement de la

recherche (Bousquet et al., 1997) : les observations sur le terrain ont orienté la constitution du modèle, cette dernière ainsi que des simulations ont réorienté la façon d'aborder le terrain.

Ce ne sont pas *a priori* les seuls usages possibles de ce type de modèle. La formation ou l'appui à la négociation peuvent également être envisagés. Le modèle doit cependant être remis en question pour chacun de ces usages, en particulier parce que les exigences en termes de validité du modèle ne sont pas les mêmes d'un couple usage / utilisateur à un autre.

Cette question de la validation encore rare pour les SMA, d'un point de vue théorique aussi bien que sur des cas particuliers, a été abordée ici à travers différents moyens :

une vérification du modèle et du déroulement de simulations.

une confrontation à quelques données observées quand cela avait un sens.

une confrontation à des dires d'experts.

Enfin, une analyse de sensibilité a permis de montrer que les résultats des simulations d'un ensemble de scénarios permettaient de ranger ceux-ci en différentes classes de viabilité. Ceci permet d'augmenter la confiance que l'on peut avoir dans les résultats des simulations qui ont été faites pour produire une explication de la viabilité des systèmes irrigués. Il s'agit maintenant de reprendre ces résultats à la lumière de nouveaux travaux sur le terrain.

La modélisation, si elle a occupé une place centrale dans la méthodologie employée, n'est pas le seul élément de celle-ci. La méthode d'analyse et d'interprétation du terrain s'est orientée sur les aspects dynamiques : interactions entre paysans, entre paysans et groupements, entre paysans et parcelles, évolution des règles et comportements. Cette approche par les interactions et leur dynamique donne une explication cohérente de la viabilité des systèmes irrigués, qui reste cependant à être mise en œuvre. Ce travail a donc permis d'accroître la confiance dans les théories sous-jacentes à cette démarche, elle aussi issue de la gestion des ressources en propriété commune, au moins du point de vue de leur capacité à traiter de la viabilité d'un système complexe. Cependant, comme les aspects liés à la dynamique sont privilégiés, des explications relevant de paramètres structurels, tels que la taille de l'aménagement et la composition des groupements, ne peuvent être rejetées.

Perspectives

Ce travail a aussi ouvert plusieurs voies qui mériteraient d'être approfondies pour aller plus loin dans la compréhension de la viabilité des systèmes irrigués de la moyenne vallée du

Sénégal. Ces voies d'approfondissement potentielles concernent également la perspective d'une extension vers des questions relatives à la gestion de l'eau d'une manière plus large.

L'utilisation présentée de la démarche proposée constitue en fait une étape dans le processus de compréhension de la viabilité des systèmes irrigués dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Au cours de la discussion des résultats, quelques retours à la modélisation et plusieurs nouvelles séries de scénarios sont apparus comme intéressants à explorer pour améliorer la compréhension du modèle tel qu'il existe actuellement et affiner les hypothèses émises sur la viabilité des systèmes irrigués. Ces nouveaux scénarios concernent en particulier le choix et le rôle des chefs éventuels des groupements, l'effet d'une superposition des différents lieux de coordination, l'intérêt d'une souplesse dans l'allocation de l'eau en relation avec la diversité des paysans et les questions relatives à l'apprentissage.

Les simulations déjà faites et celles présentées ci-dessus font apparaître un ensemble de nouvelles questions à traiter sur le terrain. Il s'agit surtout de trouver une ou plusieurs formes de restitution de ce travail, dont par exemple un jeu de rôles, pour confronter d'une part notre représentation des processus en œuvre et d'autre part les hypothèses induites par les simulations avec l'expérience des acteurs représentés et ayant servi à constituer ce modèle mais aussi avec les points de vue d'autres acteurs locaux proches des systèmes irrigués et en ayant une bonne connaissance, tels que les responsables de la SAED ou d'ONG locales. Ces restitutions devraient amener à remettre en cause éventuellement cette représentation et poser à son tour de nouvelles questions au modèle.

Une première voie d'extension possible de ce travail concerne sa reprise pour d'autres terrains, voire d'autres problématiques. Même s'il a déjà permis d'apporter de nouveaux éléments dans la réflexion sur la viabilité des systèmes irrigués, il serait intéressant que l'outil mis en place puisse servir dans d'autres contextes que celui de la viabilité dans les systèmes irrigués autour de Podor.

La confrontation du modèle réalisé à de nouveaux terrains est une première étape. Dans ce cas l'objectif est que ce simulateur permette d'aborder la problématique de la viabilité des systèmes irrigués et que les hypothèses qu'il induit puissent s'appliquer à différents contextes. Il s'agit de mettre au point une plate-forme générique dédiée à la création de modèles de systèmes irrigués, tels que SHADOC, en différents lieux et pour différentes questions. L'objectif serait alors que la distance entre cette plate-forme et les modèles qu'elle permet de créer, en termes de quantité de travail à faire, soit la plus petite possible.

Cette confrontation peut se faire par le biais d'une étude approfondie de monographies sur des cas particuliers en prolongeant celle-ci par une discussion avec son auteur et / ou avec d'autres personnes connaissant bien ces cas, elle peut se faire aussi par l'utilisation du modèle SHADOC ou d'un modèle généré par la plate-forme visée comme point de départ d'une démarche de modélisation d'accompagnement sur de nouveaux terrains.

Une deuxième voie d'extension concerne les usages de ce type de modèle. Dans le prolongement d'une extrapolation de la modélisation pour représenter d'autres sites, il peut s'agir notamment d'un approfondissement de la notion proposée d'usage en aide à la négociation, en support d'une démarche patrimoniale. Ceci vient également en complément du travail de restitution des résultats déjà mentionné. Une telle utilisation peut poser différents problèmes, parmi lesquels l'aspect boîte noire du modèle dans la machine n'est pas nécessairement le moindre. Il se pose en particulier la question de la crédibilité du modèle pour ses nouveaux usagers et de sa validité pour les interprétations éventuelles qu'ils en feront. Cette question se pose de la même manière pour toute forme dérivée du modèle dont l'objectif serait d'éviter l'aspect boîte noire mentionné précédemment.

Cette voie d'extension pourrait dans un premier temps se faire sur des terrains déjà étudiés en vue d'une extrapolation du modèle, permettant de travailler sur ces questions dans un contexte favorable où la constitution du modèle aura au moins partiellement été vue par ces nouveaux usagers. Ces terrains auront cependant la limite de ne pas être nécessairement le lieu d'une problématique particulière à traiter...

Cette extension relative aux autres usages de ce type de modèle concerne aussi des usages en formation pour faire appréhender la complexité des systèmes irrigués. Il s'agit là surtout de travailler sur le protocole d'un tel usage : le modèle peut servir directement de support à la formation ou à la construction de tels supports. Son intérêt serait de multiplier les exemples possibles et de pouvoir simuler la variabilité des conséquences de choix de "scénarios de gestion".

Nous avons choisi de représenter le système irrigué à partir de l'aménagement et non à partir des différentes activités des paysans pratiquant la culture irriguée. Ce choix de représentation, qui est aussi celui qui préside le plus souvent à la mise en place des aménagements, a eu un certain nombre de conséquences au long de ce travail. La dépendance importante et variée à l'environnement qui a été observée est peu prise en compte et l'est de manière très réductrice du point de vue du nombre de canaux d'échange mis en œuvre. Les échanges au sein du système irrigué peuvent avoir des contreparties en

dehors du système irrigué, sur un autre aménagement ou dans un autre domaine que l'irrigation, ces contreparties ne peuvent alors être prises en compte. C'est probablement une raison pour laquelle une moindre viabilité a été observée quand la population d'un système est constituée en majorité de nobles. De plus, dans une perspective de recherche de généralité du modèle, les cas observés dans la vallée du Sénégal sont assez favorables : les aménagistes ont imposé ce point de vue en cherchant à séparer nettement les activités dans l'espace, la riziculture est un peu parquée et, à l'aval de la pompe, l'usage de l'eau est, en volume, quasi exclusivement réservé à l'irrigation. Un système avec mono-usage de l'eau aux limites claires peut être défini.

Ce n'est pas le cas partout : l'irrigation peut être imbriquée avec d'autres usages de l'eau, c'est notamment fréquemment le cas dans des deltas, c'est aussi le cas général à l'échelle du bassin versant. Dans ces cas les négociations ne concernent plus seulement la coordination entre des agriculteurs avec des objectifs et des pratiques différents mais aussi des besoins et des usages différents. Une extension de la méthode utilisée à des questions relatives à la gestion des externalités entre usagers dans un bassin versant est un vaste programme, devant prendre en compte des usages de l'eau variés, mais se pose comme une suite pouvant prendre en compte certaines des limites observées.

Index des termes vernaculaires

cuballo (pl. subalBe)	classe des pêcheurs.
falo	pente du bourrelet de berge, cultivé au début de la décrue.
fedde	classe d'âge.
foyre	unité de consommation.
galle	unité de résidence, par extension chez certains auteurs, segment de lignage.
jeeri	partie de la vallée la plus éloignée du fleuve, assez sableuse.
jom leydi	chef de terre, maître de l'accès à la terre.
jom ngesa	maître du champ, de l'usage de la terre.
laam	titre nobiliaire élevé. Le laam Tooro est un des personnages dont le statut est le plus élevé au Fuuta Tooro.
leñol	lignage.
macudo (pl. macuBe)	captif, utilisé maintenant pour les descendants de captifs.
pullo (pl. fulBe)	éleveur.
rem peccem	mode de faire valoir indirect d'une parcelle où la production nette est partagée entre l'attributaire de la parcelle et l'exploitant.
toorodo (pl. tooroBe)	dignitaire musulman.
waalo	cuvette de décrue, plutôt argileuse.

Table des sigles et abréviations

AVD	Association Villageoise de Développement
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CORMAS	Common-pool Resources and Multi-Agent Systems
CMED	Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement
CNCAS	Caisse Nationale de Crédit Agricole du Sénégal
ENGREF	Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FED	Fonds Européen de Développement
GIE	Groupement d'Intérêt Economique
GMP	Groupe Moto-Pompe
IAD	Intelligence Artificielle Distribuée
IASCP	International Association for the Study of Common Property.
IIMI	International Irrigation Management Institute
ILRI	International Institute for Land Reclamation and Improvement
IPTRID	Base de données internationale sur la recherche en irrigation et en drainage
ISRA	Institut Sénégalais de Recherche Agronomique
OFADDEC	Office Africain pour le Développement et la Coopération
OMT	Technique de Modélisation par Objets
OMVS	Organisation de Mise en Valeur du fleuve Sénégal
ONG	Organisation Non Gouvernementale
ORSTOM	Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement et la Coopération.
PIV	Périmètre Irrigué Villageois
SAED	Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et de la vallée du fleuve Sénégal et de la Falémé
SHADOC	Simulateur Hydro-Agricole Décivant les modes d'Organisation et de Coordination.
SMA	Système Multi-Agent
UAI	Unité Autonome d'Irrigation
UJAK	Union des Jeunes Agriculteurs de Koyli Wirnde.

Bibliographie

Adams W.M. (1992). *Wasting the rain, Rivers, people and planning in Africa*. Earthscan, Londres.

Affholder F. (1996). Couplage de modèles biophysiques et socio-économiques : quelques questions posées par un agronome. In: *Couplage de modèles en agriculture*, actes du séminaire 14-15 juin 1995, éd. F.-N. Reyniers et M. Benoît-Cattin, collection colloques, Cirad-CA, pp. 22-27.

Aguilera Klink F. (1995). Economie, eau et environnement : quelques facteurs d'interdépendance. *Cahiers "Options méditerranéennes"*, Vol. 9, Agriculture, durabilité et environnement.

Andriatahiana V., B. Rakotomandimby, J. de Montgolfier et M. Razafindrabe (1996). *Les médiateurs environnementaux de Madagascar : cadre institutionnel, système de formation et conditions réglementaires d'exercice professionnel*. Office national de l'environnement et CIRAD-Madagascar, polygr.

Antona M., F. Bousquet, C. Le Page, J. Weber, A. Karsenty et P. Guizol (1998). *Economic theory and renewable resource management*. Communication à l'atelier Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation (MABS). Accepted in: *Lecture Notes in Computer Sciences / Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer.

Attonaty J.-M., C. Laporte, F. Papy et L.-G. Soler (1989). *Vers de nouveaux modèles d'aide à la décision en agriculture*. Annales des Mines, série gérer et comprendre, 15 : 38-48.

Aubin J.-P. (1997). *Dynamic economic theory*. Springer.

Aubin J.-P. (en préparation). *La mort du devin, l'émergence du démiurge ; essai sur la contingence et la viabilité des systèmes*.

Axelrod R. (1997). Advancing in the art of simulation in the social sciences. In: *Simulating social phenomena*, éd. R. Conte, R. Hegselman et P. Terna, *Lecture Notes in Economics and mathematical systems*, Springer, pp. 21-40.

Ba O. (1977). *Le Foûta Tôro, au carrefour des cultures*. L'Harmattan.

Bakam I., A. Takforyan, H. Proton, F. Bousquet et J. Weber (1997). *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.

- Balman A. (1997). Farm-based modelling of regional structural change : a cellular automata approach. *European review of agricultural economics*, 24 (1) : 85-108.
- Barouch G. (1989). *La décision en miettes, systèmes de pensée et d'action à l'œuvre dans la gestion des milieux naturels*. L'Harmattan.
- Barreteau O. (1994). *Des pratiques de gestion à la consommation d'eau d'un périmètre irrigué, le cas du périmètre de Nianga au Sénégal*. Mémoire de DEA d'hydrologie, ENGREF, Montpellier.
- Barreteau O., F. Bousquet et J. Weber (1997). Modes de gestion et viabilité de périmètres irrigués : questions de représentation. In: *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, coord. F. Blasco, pp. 153-159. Elsevier.
- Batchelor W.D. et R.W. McClendon (1992). A blackboard approach for resolving conflicting irrigation and insecticide scheduling recommendations. *Transactions of the ASAE*, 35 (2) : 741-747.
- Baume J.-P., H. Sally, P.-O. Malaterre et J. Rey (1993). *Development and field installation of a mathematical simulation model of irrigation management*, IIMI's series: research paper.
- Bédoucha G. (1987). *L'eau, l'amie du puissant*. Lhomond.
- Bélières J.-F. et M. Faye (1994). Développement des aménagements privés dans le Delta du Fleuve Sénégal. *Les Cahiers de la Recherche-Développement*, 38 : 49-64.
- Belouze P. (1996). *Un modèle intégré d'un système irrigué par la prise en compte de phénomènes hydrauliques, économiques, et hydro-pédologiques*. Mémoire du DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, ENGREF, Montpellier.
- Berkes F., D. Feeny, B.J. McCay et J.M. Acheson (1989). The benefits of the commons. *Nature*, 340 : 91-93.
- Biswas A.K. (1988). Systems analysis for water management for developing countries : constraints and opportunities. *ICID bulletin*, 37 (1) : 13-22.
- Blanchard de la Brosse V. (1989). Riz des femmes, riz des hommes au Guidimaka (Mauritanie). *Etudes rurales*, 115-116 : 37-58.
- Blower S.M. et H. Dowlatabi (1994). Sensitivity and uncertainty analysis of complex models of disease transmission: an HIV model, as an example. *International statistical review*, 62 (2) : 229-243.
- Boivin P., I. Dia, A. Lericollais, J.-C. Poussin, C. Santoir et S.M. Seck (1995a). *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*. ORSTOM éditions.

- Boivin P., D. Brunet, C. Gascuel, P. Zante et J.-P. N'Diaye (1995b). Les sols argileux de la région de Nianga-Podor : répartition, caractéristiques, aptitudes et risques de dégradation sous irrigation. In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, éd. P. Boivin et al., ORSTOM éditions, pp. 67-81.
- Boltanski L. et L. Thévenot (1991). *De la justification, les économies de la grandeur*. Gallimard.
- Bos M.G. et J. Nugteren (1990). *On irrigation efficiencies*. 4th edition. Wageningen : ILRI publications.
- Bousquet F. (1994). *Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents. Le cas de la pêche au Niger*. Thèse de doctorat Université Claude Bernard Lyon I.
- Bousquet F., O. Barreteau et J. Weber (1996). Systèmes multi-agents et couplage des modèles bio-physiques et socio-économiques. In: *Couplage de modèles en agriculture*, actes du séminaire 14-15 juin 1995, éd. F.-N. Reyniers et M. Benoît-Cattin, collection colloques, Cirad-CA, pp. 91-98.
- Bousquet F., I. Bakam, H. Proton et C. Le Page (1998). *Cormas : common-pool resources and multi-agent systems*. Communication à 11th IAEE conference, Barcelone, 1-4 juin 1998. A paraître dans *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer.
- Bousquet F., O. Barreteau, C. Mullon et J. Weber (1997). Modélisation d'accompagnement : systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables. In: *Actes du Colloque international "Quel environnement au 21^{ème} siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie"*, GERMES, Paris, France, sous presse.
- F. Bousquet, Y. Duthoit, H. Proton, C. Lepage et J. Weber (1996). *Tragedy of the commons, game theory and spatial simulation of complex systems*, communication au Colloque Ecological Economics, Saint-Quentin en Yvelines, 23-25 mai 1996, 8p.
- Boussard J.-M. et J.-J. Daudin (1988). *La programmation linéaire dans les modèles de production*. Masson. 127 p.
- Boutillier J.-L. et J. Schmitz (1987). Gestion traditionnelle des terres (système de décrue / système pluvial) et transition vers l'irrigation. Le cas de la vallée du Sénégal. *Cahiers des sciences humaines*, 23 (3-4) : 533-554.
- Bruderer E. (1993). *How strategies are learned*. PhD dissertation, University of Michigan, Ann Arbor.

- Burton M.A. (1989). Putting theory into practice, simplified scheduling procedures for smallholder irrigation schemes. In: *Irrigation, theory and practice*, éd. J.R. Rydzewski et C.F. Ward, Pentech Press, pp. 514-526.
- Burton M.A. (1989b). Experiences with the Irrigation management game. *Irrigation and drainage systems*, 3 : 217-228.
- Burton M.A. (1994). A simulation of water allocation policies in times of water shortage. *Irrigation and drainage systems*, 8 : 61-81.
- Callon M. (1989). *La science et ses réseaux*. La Découverte.
- Cambier C. (1994). *SIMDELTA, un système multi-agent pour simuler la pêche sur le Delta Central du Niger*. Thèse de doctorat Université Paris VI.
- Carruthers I. et C. Clark (1981). *The economics of irrigation*. Liverpool University Press.
- Cernea M.M. (1991). *Putting people first*. 2nd édition, Oxford University Press.
- Ceuppens J., M.C.S. Wopereis et K.M. Miézan (1997). Soil salinization processes in rice irrigation schemes in the Senegal River Delta, *Soil Science Society of America Journal*, 61 : 1122-1130.
- Chakravorty U., E. Hochman et D. Zilberman (1995). A spatial model of optimal water conveyance, *Journal of environmental economics and management*, 29 : 25-41.
- Chambers R. (1981). In search of a water revolution : questions for canal irrigation management in the 1980's, *Water supply and management*, 5 : 5-18.
- Chattoe E. et N. Gilbert (1997). A simulation of adaptation mechanisms in budgetary decision making. In: *Simulating social phenomena*, éd. R. Conte, R. Hegselman et P. Terna, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer, pp. 401-418.
- D. Chessel, J. Thioulouse, S. Dolédec and J.-M. Olivier (1997). *ADE-4, variables instrumentales*, <http://biomserv.univ-lyon1.fr/ADE-4.html>, Université Lyon 1.
- Cleaver F. et D. Elson (1995). *Women and water resources : continued marginalization and new policies*. IIED, Gatekeeper series N° SA49. 16 p.
- CMED (1989). *Notre avenir à tous*. Ed. du Fleuve, Canada.
- Conte R. et C. Castelfranchi (1994). Mind is not enough : the precognitive bases of social interaction. In: *Simulating societies*, éd. N. Gilbert et J. Doran, UCL Press, pp. 267-286.
- Conte R. et C. Castelfranchi (1995). Norms as mental objects, from normative beliefs to normative goals. In: *From reaction to cognition*, éd. C. Castelfranchi et J.P. Muller, Springer, pp. 186-196.

- Coquillard P. et D.R.C. Hill (1997). *Modélisation et simulation d'écosystèmes*. Masson.
- Costanza R. (1995). What is ecological economics ? In: *Maximum power, the ideas and applications of H.T. Odum*, éd. C.A.S. Hall, University Press of Colorado, pp. 161-163.
- Coward E. W. Jr. (1979). Principles of social organization in an indigenous irrigation system, *Human organization*, 38 (1) : 28-36.
- Coward E. W. Jr. (1991). Planning technical and social change in irrigated areas. In: *Putting people first*, éd. M.M. Cernea, 2^{nde} édition, Oxford University Press, pp. 46-72.
- Crousse B., P. Mathieu et S.M. Seck (1991). *La vallée du Fleuve Sénégal : évaluation et perspectives d'une décennie d'aménagements*. Karthala, France.
- Crozier M. et E. Friedberg (1977). *L'acteur et le système*. Le Seuil.
- de Coster K. et E. de Nys (1996). *Studie van het waterbeheer en de irrigatiekost van twee rijstperimeters in de Senegalvallee*. Katholieke Universiteit Leuven.
- Dedrick A.R., W. Clyma et J.D. Palmer (1989). A management improvement process to effectively change irrigated agriculture. In: *Planning for water shortages*, éd. J. Schaak, D.S. Wilson et S.S. Anderson, UCID, 1989 regional meetings, pp. 45-58.
- de Marsilly G. (1997). De la validation des modèles en sciences de l'environnement. In: *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, coord. F. Blasco, Elsevier, pp. 375-382.
- Demazeau Y. (1995). *From cognitive interaction to collective behavior in agent-based systems*, communication à European conference on cognitive science, St Malo, France
- de Montgolfier J. et J.-M. Natali (1987). *Le patrimoine du futur, approches pour une gestion patrimoniale des ressources naturelles*. Economica.
- de Moraes Cordeiro Netto O. (1995). *Contribution à la réflexion sur l'évaluation de projets d'aménagements fluviaux : le cas du choix du site d'un grand barrage-réservoir dans le bassin de la Garonne*. Thèse de doctorat Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Dent J.B., G. Edward-Jones et M.J. McGregor (1995). Simulation of ecological, social and economic factors in agricultural systems. *Agricultural systems*, 49 (4) : 337-351.
- Dhillon G.S. et T.C. Paul (1988). Water delivery models for irrigation projects. *Irrigation and drainage systems*, 2 : 43-52.
- Diawara M. (1990). *La graine de la parole*. Franz Steiner Verlag.

Diemer G., B. Fall et F.P. Huibers (1991). *Vers une approche paysanne de l'irrigation : enseignements des périmètres irrigués villageois de la vallée du Fleuve Sénégal*. Overseas Development Institute, cahier n°1, Londres.

Diemer G. et F.P. Huibers (1991). *Gestion paysanne de l'irrigation dans la vallée du Fleuve Sénégal : implications pour la conception des aménagements hydro-agricoles*. Rapport de fin de projet, ADRAO / Université Agronomique de Wageningen, Projet Gestion de l'eau. S^t Louis, Sénégal, et Wageningen, Pays-Bas.

Diemer G. et F.P. Huibers (1996). Introduction. In: *Crops, people and irrigation*, eds. G. Diemer et F.P. Huibers, Intermediate technology publications, pp. 1-10.

Diemer G. et J.J. Speelman (1990). *Conception dans la perspective du paysan, réflexions sur le développement hydro-agricole dans la vallée du Sénégal*. Contribution à l'atelier international "conception viable d'aménagements hydro-agricoles paysans en Afrique subsaharienne". Wageningen, Pays-Bas. 27 p.

Doorenbos J. et A.H. Kassam (1979). *Réponse des rendements à l'eau*. FAO, Bulletin d'irrigation et de drainage n°33. Rome, Italie.

Doran J., M. Palmer, N. Gibert et P. Mellars (1994). The EOS project: modelling upper palaeolithic social change. In: *Simulating societies*, eds. N. Gilbert et J. Doran, UCL Press, pp. 195-221.

Drogoul A., B. Corbara et S. Lalande (1995). MANTA: new experimental results on the emergence of (artificial) societies. In: *Artificial societies*, eds. N. Gilbert et R. Conte, UCL Press, pp. 190-211.

Drogoul A. et J. Ferber (1994). Multi-agent simulations as a tool for studying emergent processes in societies. In: *Simulating societies*, eds. J. Doran et N. Gilbert, UCL Press, pp. 127-142.

Droy I. (1991). La réhabilitation des petits périmètres irrigués à Madagascar : une réponse aux importations de riz ? *Cahiers Sciences Humaines*, 27 (1-2) : 117-127.

Dupuy J.-P. (1989). L'autonomie du social. De la contribution de la pensée systémique à la théorie de la société. *Encyclopédie philosophique universelle, tome 1 "L'Univers philosophique"*, PUF, pp. 254-265.

Eco U. (1988). *Pastiches et pastiches*. Messidor, trad. B. Guyader.

Eilander T. (1996). Rehabilitation of a farmer managed system in Izucar de Matamoros (east bank) : two interpretations of technical concepts. In: *Crops, people and Irrigation*, eds. G. Diemer et F.P. Huibers, Intermediate technology publications, pp. 90-100.

- Favereau O. (1991). Irréversibilité et institutions : problèmes micro-macro. In: *Les figures de l'irréversibilité en économie*, éd. R. Boyer, B. Chavance et O. Godard, éditions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, pp. 69-96.
- Ferber J. (1994). La kénétique : des systèmes multi-agents à une science de l'interaction. *Revue internationale de systémique*, 8 (1) : 13-27.
- Ferber J. (1995). *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. InterEditions.
- Ferber J. et O. Gutknecht (1997). *Aalaadin : a meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems*. Laboratoire d'Informatique, de robotique et de micro-électronique de Montpellier, rapport de recherche n°97189, <http://www.lirmm.fr/~gutkneco/aalaadin/>.
- Ferber J. et L. Magnin (1994). Conception de systèmes multi-agents par composants modulaires et réseaux de Pétri. In: *Actes des journées du PRC-IA*, éd. Y. Demazeau et A. Collinot, CNRS, Montpellier.
- Ferrand A. (1997). La structure des systèmes de relations. *L'année sociologique*, 47 (1) : 37-54.
- Flap H. (1997). The conflicting loyalties theory. *L'année sociologique*, 47 (1) : 183-215.
- Forsé M. et S. Langlois (1997). Présentation. Réseaux, structures et rationalité. *L'année sociologique*, 47 (1) : 27-35.
- Franchesquin N. (1995). *Modélisation des négociations aboutissant à une prise de décision collective au sein d'une assemblée communautaire*. Mémoire de DEA, Paris 9 Dauphine.
- Friedberg E. (1993). *Le pouvoir et la règle*. Le Seuil.
- Garro O. (1996). Conception distribuée de l'industrie... à l'industrie. In: *Actes des 4^{èmes} JFIADSMA'96, Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, éd. J.-P. Müller and J. Quinqueton, Hermès, pp. 7-20.
- Gascon A. (1994). Les enjeux des aménagements hydro-agricoles en Ethiopie et en Erythrée. *Cahiers de la Recherche Développement*, 38 : 33-48.
- Gaunt J.L., J. Riley, A. Stein et F.W.T. Penning de Vries (1997). Requirements for effective modelling strategies. *Agricultural systems*, 54 (2) : 153-168.
- Gilbert N. et R. Conte (1995). *Artificial societies*. UCL Press.
- Gilot L. (1994). *L'eau des livres et l'eau des champs ; des règles de distribution à leur mise en pratique : principes généraux et analyse du cas d'Urcuqui*. Thèse de l'ENSAM. Editions Orstom, TDM n° 155.

Glance N.S. and B.A. Huberman, 1995, Organizational fluidity and sustainable cooperation, in: *From reaction to cognition*, éd. C. Castelfranchi and J.P. Muller, Springer, pp. 89-103.

Gleizes M.-P., Glize P. et S. Trouilhet (1994). Etude des lois de la conversation entre agents autonomes. *Revue internationale de systématique*, 8 (1) : 39-50.

Glick T.F. (1970). *Irrigation and society in medieval Valencia*. Cambridge, Mass. : Harvard University Press.

Godard O. (1989). Jeux de natures : quand le débat sur l'efficacité des politiques publiques contient la question de leur nécessité. In: *Du rural à l'environnement, la question de la nature aujourd'hui*, éd. N. Mathieu et M. Jollivet, ARF éditions / L'Harmattan, pp. 303-342.

Godard O. (1992). La relation interdisciplinaire : problème et stratégies. In: *Sciences de la nature, sciences de la société : les passeurs de frontières*, éd. M. Jollivet, CNRS éditions, pp 427-456.

Goldsmith E. (1996). Quand les firmes transnationales imposent leur loi : une seconde jeunesse pour les comptoirs coloniaux. *Le Monde Diplomatique*, avril 1996, pp. 18-19.

Guilmoto C. Z. et P. D. Diouf (1995). Irrigation et économie domestique dans la moyenne vallée du Sénégal : premiers enseignements de l'enquête. In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, éd. P. Boivin et al., ORSTOM éditions, pp. 407-428.

Goldsmith H. et J.W. Makin (1989). Canal lining : from the laboratory to the field and back again. In: *Irrigation, theory and practice*, éd. J.R. Rydzewski et C.F. Ward, Pentech Press, pp. 356-365.

Haddadi A. (1995). Towards a pragmatic theory of interactions. In: Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems, éd. V. Lesser, AAAI Press / MIT Press, pp. 133-139.

Haddadi A. (1996). *Communication and cooperation in agent systems: a pragmatic theory*. Springer.

Hall C.A.S. (1995). Introduction : the contributions of H.T. Odum to Ecology. In: *Maximum power, the ideas and applications of H.T. Odum*, éd. C.A.S. Hall, University Press of Colorado, pp. 1-2.

Handshumacher P., G. Hébrard, O. Faye, J.-M. Duplantier, O.T. Diaw et J.-P. Hervé (1995). Risques sanitaires et aménagements hydro-agricoles : un couple inséparable ? l'exemple du périmètre de Diomandou. In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, éd. P. Boivin et al., ORSTOM éditions, pp. 117-131.

- Hanneman R. (1995). Simulation modeling and theoretical analysis in sociology. *Sociological perspectives*, 38 (4) : 457-462.
- Hanneman R. et S. Patrick (1997). On the uses of Computer-assisted simulation modeling in the social sciences. *Sociological Research Online*, 2 (2) : <<http://www.socresonline.org.uk/2/2/5.html>>
- Hardin G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*, 162 : 1243-1248.
- Haton J.-P. (1989). Panorama des systèmes multi-agents. In: *Architecture avancée pour l'intelligence artificielle*, éd. J.-P. Haton, EC2 édition.
- Hatzius T. (1994). Decision support for irrigation projects based on LP-models : experience from Peru. *Quarterly journal of agriculture*, 33 (3) : 294-316.
- Hecht R. (1990). Land and water rights and the design of small scale irrigation projects: the case of Baluchistan. *Irrigation and drainage systems*, 4 : 59-76.
- Hegmon M. (1989). Risk reduction and variation in agricultural economies : a computer simulation of Hopi agriculture. *Research in Economic Anthropology*, 11 : 89-121.
- Henry C. (1987). *Affrontement ou connivence : la nature, l'ingénieur et le contribuable*. Polygr. Ecole Polytechnique.
- Hill D.R.C. (1993). *Analyse orientée objets et modélisation par simulation*. Addison-Wesley.
- Hill R.W. et R.G. Allen (1996). Simple irrigation scheduling calendars. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 122 (2) : 107-111.
- Hinde R.A. (1976). Interactions, relationships and social structure. *Man*, 11 (1) : 1-17.
- Hochman Z., H. Hearnshaw, R. Barlow, J.F. Ayres et C.J. Pearson (1995). X-Breed : a Multiple domain Knowledge Based System integrated through a blackboard architecture. *Agricultural systems*, 48 : 243-270.
- Horie T., M. Yajima et H. Nakagawa (1992). Yield forecasting. *Agricultural systems*, 40 : 211-236.
- Horowitz M.M. et Salem-Murdock M. (1994). Synthèse. In: *Les barrages de la controverse, le cas de Vallée du Fleuve Sénégal*, éd. M. Salem Murdock et al., pp. 11-62.
- Huizinga J. (1951). *Homo ludens, essai sur la fonction sociale du jeu*. Gallimard, coll. Tel, trad. C. Seresia.
- Hunt R.C. (1989). Appropriate social organization ? water user associations in bureaucratic canal irrigation systems. *Human organization*, 48 (1) : 79-90.

- Hunt R.C. (1992). Determinants of management form in canal irrigation. In: *Irrigators and engineers, essays in honor of Lucas Horst*, éd. G. Diemer et J. Slabbers, Thesis publishers, Amsterdam. pp. 203-214
- Hutzler G., B. Gortais et A. Drogoul (1997). Le Jardin des Hasards, peinture abstraite et IAD réactive. In: *Actes des 5^{èmes} JFIADSMA'97, Intelligence artificielle et Systèmes Multi-Agents*, éd. J. Quinqueton, M.-C. Thomas et B. Trousse, Hermes, pp. 295-306.
- IPTRID (1996). *Base de données internationale sur la recherche en irrigation et drainage*. Cemagref éditions, <<http://www.cemagref.fr/iptrid/>>.
- Jamin J.-Y. (1995). Evolution des recherches agronomiques dans la vallée du Fleuve Sénégal. In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, éd. P. Boivin et al., ORSTOM éditions, pp. 139-151.
- Janssen W. et P. Goldsworthy (1996). Multidisciplinary research for natural resource management : conceptual and practical implications. *Agricultural systems*, 51 : 259-279.
- Jean M.R. (1997). Emergence et SMA. In: *Actes des 5^{èmes} JFIADSMA'97, Intelligence artificielle et Systèmes Multi-Agents*, éd. J. Quinqueton, M.-C. Thomas et B. Trousse, Hermes, pp. 323-341.
- Jensen K. (1992). *Coloured Petri Nets : Basic concepts, analysis method and practical use (vol. 1)*. EATC monographs on theoretical computer science. Springer Verlag.
- Jensen M.E. et J.M. Lord (1990). Information systems and irrigation institutions. In : *Management of farm irrigation systems*, éd. G.J. Hoffmann, T.A. Howell et K.H. Solomon, pp. 900-913
- Jollivet M. et A. Pavé (1993). L'environnement : un champ de recherche en formation. *Natures Sciences Sociétés*, 1 (1) : 6-20.
- Karsenty A. (1993). *Les avatars d'un schéma d'aménagement "rationnel" en périmètre irrigué (Maroc)*. Communication au séminaire "Innovations et sociétés", 13-16 septembre 1993, Montpellier - France, CIRAD-ORSTOM.
- Kauffman S.A. (1989). Principles of adaptation in complex systems. In *Lectures in the Sciences of Complexity, SFI studies in the Sciences of Complexity*, éd. D. Stein, Addison-Wesley Longman, pp. 619-713
- Khouzam R.F. (1995). *Reinventing the commons : transfer of irrigation management, an experience and an assessment*. Communication à la 5^{ème} conférence de l'IASCP, Bodo, Norvège, 24-28 mai 1995.

- Kirman A. (1997). The economy as an evolving network. *Journal of Evolutionary Economics*, 7 : 339-353.
- Kleijnen J. et W. van Groenendaal. (1992). *Simulation, a statistical perspective*. Wiley.
- Kremer J.N. et J.S Lansing (1995). Modeling water temples and rice irrigation in Bali : a lesson in socio-ecological communication. In: *Maximum power, the ideas and applications of H.T. Odum*, éd. C.A.S. Hall, University Press of Colorado, pp. 100-108.
- Kuper M. (1997). *Irrigation management strategies for improved salinity and sodicity control*. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 239 p.
- Laloë F. et J. Weber (1987). Les unités d'observation dans l'étude des milieux ruraux : région cacaoyère du Sud-Cameroun et pêche artisanale sénégalaise. In: *Les unités d'observation*, AMIRA, brochure n°49, pp. 117-131.
- Lam W.F. (1996). Improving the performance of small scale irrigation systems : the effects of technological investments and governance structure on irrigation performance in Nepal. *World development*, 24 (8) : 1301-1315.
- Lamacq S. (1997). *Coordination entre l'offre et la demande en eau sur un périmètre irrigué. Des scénarios, des systèmes et des hommes...* Thèse de doctorat en Sciences de l'eau, ENGREF, Montpellier, France.
- Langton C.G. (1988). Artificial life. In: *Artificial life*, éd. C.G. Langton, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of complexity, vol. VI, pp. 1-47.
- Lansing J.S. (1991). *Priests and programmers : technologies of power in the engineered landscape of Bali*. Princeton University Press.
- Lansing J.S. et J.N. Kremer (1994). Emergent properties of Balinese water temple networks : coadaptation on a rugged fitness landscape. In: *Artificial Life III*, éd. C.G. Langton, Addison Wesley, pp. 201-223.
- Lavigne-Delville (1993). Les paradoxes du désengagement : les périmètres irrigués villageois du fleuve Sénégal. In: *Politiques agricoles et initiatives locales : adversaires ou partenaires ?*, éd. C. Blanc-Pamard, pp. 217-238.
- Law A.M. et Kelton W.D. (1991). *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill.
- Layder D. (1994). *Understanding social theory*. Sage Publications.
- Layton J.J., F.A Santopolo et M. Naguib (1994). Social power, water control and irrigation systems : the egyptians farmer's ability to obtain irrigation water. *Irrigation and drainage systems*, 7 : 291-304.

- Le Cour Grandmaison C. (1984). L'eau du vendredi, droits d'eau et hiérarchie sociale en Sharqîya (Sultanat d'Oman). *Etudes Rurales*, 93-94 : 7-42.
- Lenay C. (1996) Coopération et intentionnalité. In: *Actes des 4^{èmes} JFIADSMA'96, Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, éd. J.-P. Müller and J. Quinqueton, Hermès, pp. 265-271.
- Lee Brown F. et H.M. Ingram (1996). El valor comunitario del agua : consecuencias para los pobres de las zonas rurales del sudoeste. In: *Economía del agua*, 2^{nda} edición, éd. F. Aguilera Klink, edita Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion, pp. 79-107.
- Legoupil J.-C. et A. Sene (1994). *La culture irriguée de la canne à sucre à Richard Toll (Vallée du fleuve Sénégal) : un succès technique incontestable menacé par le contexte économique*. polygr.
- Le Moigne J.-L. (1977). *La théorie du système général, théorie de la modélisation*. PUF, Paris.
- Le Page C. et V. Ginot (1997). Vers un simulateur générique pour la dynamique des peuplements piscicoles. In: *Actes des 5^{èmes} JFIADSMA'97, Intelligence Artificielle et Systèmes Multi-Agents*, éd. J. Quinqueton, M.-C. Thomas et B. Trousse, Hermes, pp. 189-209.
- Lericollais A. (1989). Risques anciens, risques nouveaux en agriculture paysanne dans la vallée du Sénégal. In: *Le risque en agriculture*, éd. M. Eldin et P. Milleville, ORSTOM, coll. A travers champs, pp 429-436.
- Lericollais A. et A. Sarr (1995). Histoires de périmètres. In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, éd. P. Boivin et al., pp. 5-36.
- Lescuyer G. (1998). *Evaluation économique et gestion viable d'un écosystème forestier tropical humide*. Thèse de doctorat de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- Lomborg B. (1994). Game theory vs. multiple agents : the iterated prisoner's dilemma. In: *Artificial social systems, 4th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, MAAMAW'92*, éd. C. Castelfranchi et E. Werner, Springer, pp. 69-93.
- Lou P. et L. Hou (1988). The rehabilitation of an irrigation system along the yellow river. *Irrigation and drainage systems*, 2 : 9-20.
- Magistro J., M. Niassé et C. Nuttal (1994). Organisation sociale et facteurs de transition. In: *Les barrages de la controverse, le cas de Vallée du Fleuve Sénégal*, éd. M. Salem Murdock et al., pp. 93-113.

- Malhotra S.P. (1982). *The warabandi and its infrastructure*. Central Board of irrigation and power, publication n°157, New Delhi, Inde.
- Manig W. (1994). Situation specific management in water distribution. *Quarterly journal of international agriculture*, 33 (3) : 243-259.
- Manly, B.F.J. (1991). *Randomization and Monte Carlo methods in biology*. Chapman and Hall, London. 1-281.
- Martin E.D. et R. Yoder (1988). A comparative description of two farmer-managed irrigation systems in Nepal. *Irrigation and drainage systems*, 2 : 147-172.
- Mathieu P. (1992). Irrigation, appropriation et stratégies d'acteurs, propositions pour l'analyse des enjeux fonciers dans les aménagements hydro-agricoles en Afrique Sub-saharienne. In: *La mobilisation de la terre dans les stratégies de développement rural en Afrique noire francophone*, éd. E. Le Roy, Paris APREFA-LAJP, pp. 151-171.
- Mathieu P. (1995). Social relationships and effective irrigation projects : two sahelian experiences. *Irrigation and drainage systems*, 9 (1) : 39-58.
- Mauriras-Bousquet M. (1984). *Théorie et pratique ludiques*. Economica.
- Mazoyer M. et L. Roudart (1997). *Histoire des agricultures du monde, du Néolithique à la crise contemporaine*. Le Seuil.
- Meijer T.K.E. (1989). The size of a tertiary unit and its importance in the design of canal irrigation systems. In: *Irrigation, theory and practice, Proceedings of the international conference held at the University of Southampton, 12-15 september 1989*, éd. J.R. Rydzewski et C.F. Ward, Pentech Press, pp. 547-555.
- Meinzen-Dick R. (1995) Timeliness of irrigation. *Irrigation and drainage systems*, 9 : 371-387.
- Mermet L. (1992). *Stratégies pour la gestion de l'environnement, la nature comme jeu de société ?* L'Harmattan.
- Meublat G. & J. Inglès (1997). L'éternel retour d'une politique de grands projets : l'aménagement du fleuve Sénégal en perspective. In: *Regards Interdisciplinaires sur les Politiques de Développement*, coord. J.-F. Baré, L'Harmattan éditeur.
- Milleville P. (1989). Risque et pratiques paysannes : diversité des réponses, disparité des effets. In: *Le risque en agriculture*, éd. M. Eldin et P. Milleville, coll. à travers champs, ORSTOM, pp. 179-186.
- Mintzberg H. (1982). *Structure et dynamique des organisations*. Les éditions d'organisation.

- Montginoul M. (1997). *Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : des instruments, de l'information et des acteurs*. Thèse de doctorat de Sciences Economiques de l'Université de Montpellier 1.
- Molle F. et T. Ruf (1994). Eléments pour une approche systémique du fonctionnement des systèmes irrigués. In: *Actes du symposium international Recherches-systèmes en Agriculture et Développement Rural*, Montpellier, Novembre 1994, pp. 114-118.
- Morand P. et F. Bousquet (1998). Que peut apporter un modèle à la gestion des pêches continentales ? In: *Dynamique et usages des ressources renouvelables*, éd. C. Chaboud, éditions ORSTOM, à paraître.
- Morin E. (1977). *La méthode I : la nature de la nature*. Le Seuil.
- Müller J.-P. (1996). *The design of intelligent agents, a layered approach*. Springer.
- Mullon C. (1988). Rhétorique de la modélisation. In: *Séminfor 2. La modélisation : aspects pratiques et méthodologie*, Séminaire ORSTOM, 26-28 septembre 1988, pp. 371-383.
- Murray-Rust D.H. et E.J. Vander Velde (1994). Changes in hydraulic performance and comparative costs of lining and desilting of secondary canals in Punjab, Pakistan. *Irrigation and drainage systems*, 8 : 137-158.
- Nakamura R. et H. Tsukiyama (1992). Analysis by an expert system of initial irrigation canal renovation project planning. *Water resources management*, 6 : 223-233.
- Nederlof M. et E. van Wayjen (1996). Religion and local water rights versus land owners and state. In: *Crops, people and irrigation*, éd. G. Diemer et F.P. Huibers, Intermediate technology publications, pp. 73-89.
- Niasse M. (1991). Les périmètres irrigués villageois vieillissent mal ; les paysans se désengagent-ils en même temps que la SAED ? In: *La vallée du Fleuve Sénégal : évaluation et perspectives d'une décennie d'aménagements*, éd. B. Crousse et al., Karthala, pp. 97-115.
- Nowak M. et R. May (1993). The spatial dilemmas of evolution. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 3 : 35-78.
- OCDE (1994). *Gérer l'environnement : le rôle des instruments économiques*. OCDE, Paris.
- Olivier de Sardan J.-P. (1995). *Anthropologie et développement*. Karthala.
- Ollagnon H. (1989). Une approche patrimoniale de la qualité du milieu naturel. In: *Du rural à l'environnement, la question de la nature aujourd'hui*, éd. N. Mathieu et M. Jollivet, L'Harmattan, pp. 258-268.

- Olson M. (1966). *Logique de l'action collective*. PUF. Trad. M. Levi, 1978.
- Onta P.R., R. Loaf et M. Banskota (1995). Performance based irrigation planning under water shortage. *Irrigation and drainage systems*, 9 : 143-162.
- Oorthuizen J. et W.H. Kloezen (1995). The other side of the coin : a case study on the impact of financial autonomy on irrigation management performance in the Philippines. *Irrigation and drainage systems*, 9 (1) : 15-37.
- Ostrom E. (1990). *Governing the commons : the evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
- Ostrom E. (1992). *Crafting institutions for self governing irrigation systems*. ICS press.
- Ostrom E. et P. Benjamin (1993). Design principles and the performance of Farmer Managed Irrigation Systems in Nepal. In: *Performance measurement in Farmer Managed Irrigation Systems*, éd. S. Manor et J. Chambouleyron, IIMI, pp. 53-62.
- Ostrom E., R. Gardner et J. Walker (1994). *Rules, games and common-pool resources*. The University of Michigan Press.
- Park J. et R.A.F. Seaton (1996). Integrative research and sustainable agriculture. *Agricultural systems*, 50 (1) : 81-100.
- Passet R. (1979). *L'économie et le vivant*. Payot.
- Pavé A. (1994). *Modélisation en biologie et en écologie*. Aléas.
- Paz Betancourt B. (1997). *Un modèle multi-agent pour simuler les accords de réciprocité dans les Andes boliviennes*. Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard Lyon 1.
- Péreira L.S. (1987). *Modernization of irrigation systems : a case of research orientated to design in Sorraia valley, Portugal*. In: 13th congress of ICID, Rabat, Maroc.
- Pérennès J.-J. (1993). *L'eau et les hommes au Maghreb : contribution à une politique de l'eau en méditerranée*. Karthala.
- Petit-Singeot F. et T. Fuhs (1994). *Simulate negociation for common farm equipment with cognitive replicators*. Communication à Cognitive science in Industry '94.
- Phelan S.E. (1997). Innovation and imitation as competitive strategies: revisiting a simulation approach. In: *Simulating social phenomena*, éd. R. Conte, R. Hegselman et P. Terna, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer, pp. 385-400.
- Piveteau V. (1994). *L'avenir à long terme des zones rurales fragiles, approche par le jeu prospectif d'une question complexe*. Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Paris 1.

- Plant R.E. (1997). A methodology for qualitative modeling of crop production systems. *Agricultural systems*, 53 : 325-348.
- Poirier J., S. Clapier-Valladon et P. Raybaut (1993). *Les récits de vie : théorie et pratique*. PUF, coll. Le sociologue, 240 pp., 3^{ème} édition.
- Poussin J.-C. (1995). Gestion technique de la riziculture irriguée. In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, eds. P. Boivin et al., ORSTOM éditions, pp. 153-170.
- Proton H., F. Bousquet and Ph. Reitz (1997). Un outil pour observer l'organisation d'une société d'agents, le cas d'une société d'agents chasseurs agriculteurs. In: *Actes des 5^{èmes} JFIADSMA'97, Intelligence artificielle et Systèmes Multi-Agents*, eds. J. Quinqueton, M.-C. Thomas et B. Trousse, Hermes, pp. 159-172.
- Quiggin J. (1988). Private and common property rights in the economics of environment. *Journal of economic issues*, 22 (4) : 1071-1087.
- Raes D., J. Deckers et A.M. Diallo (1995). Water requirements for salt control in rice schemes in the Senegal River Delta and Valley. *Irrigation and drainage systems*, 9 : 129-141.
- Raes D. et B. Sy (1993). *Détermination des besoins en eau, zone de la vallée du Fleuve Sénégal*. SAED, Projet Gestion de l'eau, Bulletin technique N°7. S¹ Louis, Sénégal, 35 p.
- Rao A.S., M.P. Georgeff et E.A. Sonnenberg (1992). Social plans : a preliminary report. In: *Decentralized AI 3*, eds. E. Werner et Y; Demazeau, Elsevier.
- Rao P.S. (1993). *Review of selected literature on indicators of irrigation performance*. Colombo : IIMI.
- Reenberg A. et B. Paarup-Laursen (1997). Determinants for land use strategies in a sahelian agro-ecosystem - anthropological and ecological geographical aspects of Natural Resource Manangement. *Agricultural systems*, 53 : 209-229.
- Requier-Desjardins M. (1997). *L'accès aux pâturages : une approche économique de la mobilité*. Communication au colloque Méga-Tchad, 15-17 octobre 1997, Orléans.
- Rey J. (1996). *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.

- Robert V., P. Gazin et P. Carnevale (1989). De la difficulté de prévoir les répercussions sanitaires des aménagements hydro-agricoles : le cas du paludisme dans la rizière de la vallée du Kou. In: *Le risque en agriculture*, eds. M. Eldin et P. Milleville, ORSTOM éditions, pp. 541-543.
- Robinson J.B. (1991). Modeling the interactions between human and natural system. *International Social Science Journal*, 130 : 629-647.
- Romagny B. (1996). *Développement durable, bio-économie et ressources renouvelables : réflexions sur les modes d'appropriation et de gestion de ces ressources*. Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Nice - Sophia Antipolis.
- Rosegrant M.W. (1992). The impact of irrigation on production and income variability : simulation of diversion irrigation in the Philippines. *Agricultural systems*, 40 : 283-302.
- Rosegrant M.W. et Shetty S. (1994). Production and income benefits from improved irrigation efficiency : what is the potential ? *Irrigation and drainage systems*, 8 (4) : 251-270.
- Rouchier J., O. Barreteau, F. Bousquet et H. Proton (1998). Evolution and co-evolution of individuals and groups in environment. In: *Proceedings of the Third International Conference on Multi-Agent Systems*, AAAI Press, à paraître.
- Ruf T. et J.-L. Sabatier (1992). La gestion sociale de l'eau. *Chroniques du Sud*, 8 : 75-79, éditions de l'ORSTOM.
- Rumbaugh J., M. Blaha, F. Eddy, W. Premerlani et W. Lorensen (1995). *OMT, modélisation et conception orientées objet*. Edition française revue et augmentée, Masson, Paris.
- Ruth M. et B. Hannon (1997). *Modeling dynamic economic systems*, Springer.
- Salem Murdock M., M. Niasse, J. Magistro, C. Nuttal, M.M. Horowitz et O. Kane (1994). *Les barrages de la controverse, le cas de la vallée du Fleuve Sénégal*. L'Harmattan, Paris.
- Sall N. (1995). Union des Jeunes Agriculteurs de Koyli Wirnde (UJAK). In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, eds. P. Boivin et al., ORSTOM éditions, pp. 487-495.
- Scheer S.H. (1996). *Communication between irrigation engineers and farmers : the case of project design in Senegal*. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Pays-Bas.
- Schilizzi S.G.M. et L.P. Apedaile (1994). Integrating agroecological and socio-economic rural dynamics : theoretical framework and application. In: *Actes du symposium international Recherches-systèmes en Agriculture et Développement Rural*, Montpellier, Novembre 1994. pp. 39-45.

- Schlager E. et E. Ostrom (1992). Property regimes and natural resources : a conceptual analysis. *Land economics*, 68 (3) : 249-262.
- Schmitz J. (1993). Anthropologie des conflits fonciers et hydropolitique du fleuve Sénégal (1975-1991). *Cahiers des Sciences Humaines*, 29 (4) : 591-623.
- Schmitz J. (1994). Cités noires : les républiques villageoises du Fuuta Tooro. *Cahiers d'études africaines*, 133-135 : 419-460.
- Sebillote M. et L.-G. Soler (1990). Les processus de décision des agriculteurs. In: *Modélisation systémique et systèmes agraires*, eds. J. Brossier, B. Vissac et J.-L. Le Moigne, éditions INRA, pp. 93-101.
- Seck S.M. (1990). Gestion et organisation des aménagements irrigués en exploitation paysanne dans la vallée du Sénégal. *Revue de géographie de Lyon*, 65 (1) : 38-45.
- Séguis L. (1995). Hydrologie d'une cuvette du lit majeur du Sénégal : exemple de la cuvette de Nianga. In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, eds. P. Boivin, pp. 49-66.
- Séguis L. et G. Dubée (1994). *Cuvette de Nianga, rapport hydrologique, hivernage 1992 et Contre-Saison 1992-1993*. ORSTOM, Dakar, 30 p. et annexes.
- Sengupta N. (1991). *Managing common property, Irrigation in India and the Philippines*. Sage publication, New Delhi, India.
- Sengupta N. (1993). *User-friendly irrigation designs*. Sage publications.
- Shannon R.E. (1992). Introduction to simulation. In: *Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference*, eds. J.J. Swain, D. Goldsman, R.C. Crain et J.R. Wilson, pp. 65-73.
- Shnaydman V.M. (1993). The influence of climate variation on an irrigation water resources system performance strategy. *Water resources management*, 7 : 39-56.
- Small L.E. et A. Rimal (1996). Effects of alternative water distribution rules on irrigation system performance : a simulation analysis. *Irrigation and drainage systems*, 10 (1) : 25-45.
- Smith L.E.D. (1989). The Wye College Irrigation Game. *Irrigation and drainage systems*, 3 : 255-264.
- Steenhuis T.S., R.L. Oaks, R. Johnson, R. Sikkens et E.J. Vander Velde (1989). Irrigation Rehab : a computer aided learning tool for system rehabilitation. *Irrigation and drainage systems*, 3 : 241-253.
- Strosser P. (1997). *Analysing alternative policy instruments for the irrigation sector*. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Pays Bas. 243 p.

- Strosser P. et T. Rieu (1993). *A research methodology to analyse the impact of water markets on the quality of irrigation services and agricultural production*. IIMI, internal paper.
- Svendsen M. et L. Changming (1990). Innovations in irrigation management and development in Hunan province. *Irrigation and drainage systems*, 4 : 195-214.
- Svendsen M. et L.E. Small (1990). Farmer's perspective on irrigation performance. *Irrigation and drainage systems*, 4 (4) : 385-402.
- Takforyan A. (1996). *Vers une gestion locale de la faune sauvage en Afrique ? Le cas de l'Est Cameroun*. Communication au colloque panafricain : Gestion communautaire des ressources naturelles renouvelables et développement durable, Harare, Zimbabwe, 24-27 juin 1996.
- Tang S.Y. (1992). *Institutions and collective action : self governance in irrigation*. ICS press.
- Tarrière-Diop C. (1995). La dynamique sociale des GIE, village de Podor (département de Podor, communauté rurale de Guédé). In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, eds. P. Boivin et al., ORSTOM éditions, pp. 339-373.
- Tchayanov A. (1924). *L'organisation de l'économie paysanne*. Trad. A. Berelovitch. Librairie du regard, Paris, 1990.
- Thévenot L. (1995). Rationalité ou normes sociales : une opposition dépassée. In: *Le modèle et l'enquête : les usages du principe de rationalité dans les sciences sociales*, eds. L.-A. Gérard-Varet et J.-C. Passeron, éditions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, pp. 149-189.
- Troitzsch K. G. (1997). Social science simulation - Origins, prospects, purposes. In: *Simulating social phenomena*, eds. R. Conte, R. Hegselmann and P. Tierna, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer, pp. 41-54.
- Tsur Y. et A. Dinar (1995). *Efficiency and equity considerations in pricing and allocating irrigation water*. World Bank, Policy Research Paper 1460. May 1995.
- Uphoff N.T. (1986). *Improving irrigation water management with farmer participation : getting the process right*. Studies in Water Policy and Management n°11. Westview Press, Boulder, Colorado.
- Van Arsdale P. et T. Lewis (1995). Triple crop rice farming in Java : implications for sustainable development. *Journal of sustainable agriculture*, 6 (1) : 5-21.
- van der Zaag P. (1992). The material dimension of social practice in water management : a case study in Mexico. In: *Irrigators and Engineers. Essays in honour of Lucas Horst*. Thesis Publishers, Amsterdam, pp. 73-83.

- Van Steenberghe F. (1992). Changing water allocation and land use and the design of small scale irrigation schemes. *Irrigation and drainage systems*, 6 : 149-159.
- Verdier J. (1995). Avenir de l'irrigation dans le monde et place de l'école française d'irrigation. *Compte-Rendus de l'Académie d'Agriculture Française*, 81 (7) : 63-82.
- Verheye W.H. (1995). Impact of climate and soil conditions on conception and implementation of irrigation schemes in the Senegal River Basin. *Agricultural Water Management*, 28 : 73-94.
- Vermillion D.L. (1994). Irrigation management turnover : the shift from agency to local control. *Quarterly journal of international agriculture*, 33 (4) : 364-379.
- Vermillion D.L. (1997). *Management devolution and the sustainability of irrigation : results of comprehensive versus partial strategies*. Technical consultation on decentralization, FAO, Rome, 16-18 décembre 1997.
- Vidal-Naquet G. et A. Choquet-Geniet (1992). *Réseaux de Pétri et systèmes parallèles*. Armand Colin.
- von Bertalanffy L. (1993). *Théorie générale des systèmes*. Dunod. Trad. J.-B. Chabrol.
- von Urrf W. (1994). Irrigation management : an important tool to solve the world food problem. *Quarterly journal of International Agriculture*, 33 (3) : 219-221.
- Wackermann J.-B. (1995). Le financement de la riziculture irriguée au Sénégal : l'exemple de la région du Fleuve. In: *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, eds. P. Boivin et al., pp. 457-486.
- Wade R. (1995). The ecological basis of irrigation institutions : east and south Asia. *World development*, 23 (12) : 2041-2049.
- Wane Y. (1969). *Les Toucouleur du Fouta Tooro*. IFAN, Dakar.
- Watzlawick P. (1978). *La réalité de la réalité*. Le Seuil.
- Watzlawick P., Helmick Beavin J., Jackson D.D. (1972). *Une logique de la communication*. Le Seuil.
- Weber J. (1992). Environnement, développement et propriété : une approche épistémologique. In: *Environnement, développement, éthique*, eds. J. Prades et G. Vaillancourt, éditions Fides, Montréal.
- Weber J. (1993). Common property conference. *Natures, Sciences, Sociétés*, 1 (1) : 81-83.
- Weber J. (1995). *Gestion des ressources renouvelables : fondements théoriques*. Document de travail, CIRAD-GREEN, Montpellier.

- Weber J. (1996). *Conservation, développement et coordination : peut-on gérer biologiquement le social*, Communication au colloque panafricain : Gestion communautaire des ressources naturelles renouvelables et développement durable, Harare, Zimbabwe, 24-27 juin 1996.
- Weber J., J.-M. Betsch et P. Cury (1990). *A l'interface hommes-nature : les ressources renouvelables*. Rapport introductif au Colloque National Recherche et Environnement, Strasbourg. CNRS, Programme Environnement, pp. 39-50.
- Weber J. et J.-P. Reveret (1993). Biens communs : les leurre de la privatisation. In: *Une terre en renaissance, Le Monde diplomatique, Collection Savoirs*, 2 : 71-73.
- Weinberg A. (1995). Les jeux de l'ordre et du désordre. *Sciences Humaines*, 47 : 16-18.
- Whitner R.B. et O. Balci (1989). Guidelines for selecting and using simulation model verification techniques. In: *Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference*, eds. E.A. McNair, K.J. Musselman et P. Heidelberger, pp. 559-568.
- Wittfogel K. (1957). *Le despotisme oriental*. Editions de minuit, trad. A. Marchand.
- Wolfram S. (1986). *Theory and applications of cellular automata*. World scientific.
- Young F.W. (1985). The informant survey as a method for studying irrigation systems. *Journal of Asian and African studies*, 20 (1-2) : 56-71.