



Mémoire de DEA, Sciences de l'Eau dans l'Environnement
Continental ; Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et
Forêts – Université Montpellier II

MODÉLISATION DE LA GESTION DE L'EAU D'IRRIGATION À L'ÉCHELLE D'UN BASSIN VERSANT ET EXPLORATION DU SYSTÈME VIA SIMULATIONS

Une approche basée sur les Systèmes Multi-Agents
Le cas du bassin versant du Mae Yam – Nord-Thaïlande

Série Irrigation «Mémoires de 3^o cycle» 2001-16 ; N° 973

Nicolas Becu

Sous la direction scientifique de : Michel Desbordes, Université Montpellier II
Claude Miller, ENGREF

Sous l'encadrement de : Olivier Barreteau, CEMAGREF
Pascal Perez, CIRAD

CIRAD
Département Cultures Annuelles
Programme Gestion des Ecosystèmes
Cultivés

Avenue Agropolis, BP 5035
34398 Montpellier Cedex 05
Tél. : 04 67 61 56 43 – Fax : 04 67 61 71 60

CEMAGREF
Département Equipements pour l'Eau et l'Environnement
Unité de recherche Irrigation

Délégation régionale du Languedoc-Roussillon
361, rue Jean-François Breton, BP 5095
34033 Montpellier Cedex 01
Tél. : 04 67 04 63 00 - Fax : 04 67 63 57 95

Octobre 2001

Remerciements

Je souhaite en premier lieu remercier les personnes qui m'ont encadré et aidé durant ce mémoire : M. Pascal Perez, M. Olivier Barreteau et M. Andrew Walker.

A Pascal, pour avoir accompagné mon travail de conceptualisation et de modélisation durant trois longs et intenses mois de travail en commun en Australie ;

A Andrew sans qui ce modèle serait resté un outil théorique et sur qui j'ai toujours pu compter pour satisfaire ma curiosité quant au terrain thaïlandais ;

A Olivier pour avoir suivi ce travail de recherche de sa phase bibliographique jusqu'à l'étape de simulation.

De plus, je voudrais remercier l'équipe du laboratoire CRES de l'Australian National University de Canberra qui m'a accueilli dans ses bureaux ainsi que le département Irrigation du Cemagref, chez qui j'ai pu poursuivre mes recherches sous le soleil montpelliérain.

Un grand merci à M. Francis Forest du département GEC du CIRAD, sans qui ce mémoire n'aurait pu voir le jour.

Mes sincères remerciements également à toute l'équipe du laboratoire ERE du CIRAD, pour m'avoir formé à la modélisation multi-agents et soutenu dans la création de ce modèle.

Enfin j'adresse toute ma gratitude aux encadrants scientifiques de mon DEA, M. Desbordes de l'Université des Sciences Montpellier II, M. Millier et M. Delacourt de l'ENGREF.

Abstract

Keywords: Multi-Agent System; Water Management; Catchment; Northern Thailand; Integrated Modelling

Due to mounting human pressure, stakeholders in northern Thailand are facing crucial natural resources management issues. Among others, the impact of upstream irrigation management on the downstream agricultural viability is a usual source of conflict. It has often both biophysical and social origins. As different ethnic groups with tense relationships are involved, appropriate solutions should only emerge from negotiation. CATCHSCAPE has been developed through a Multi-Agent System approach that enables us to describe the whole catchment features as well with farmer's individual decisions. The biophysical modules simulate the hydrological system with its distributed water balance, irrigated schemes management, crop and vegetation dynamics. The social dynamics are described as a set of resources management processes (water, land, cash, labour force). Water management is described according to the actual different levels of control (individual, scheme and catchment. Moreover, the model's architecture is presented in a way that emphasizes the transparency of the rules and methods implemented. Finally, one simulated scenario is described with its main results as well, according to different viewpoints (economy, landscape, water management).

Extrait de l'article *CatchScape : an integrated Multi-Agent model for simulating water management at the catchment scale. A Northern Thailand case study*. (N. Becu, P. Perez, A. Walker, O. Barreteau), présenté pour la conférence Modsim-Décembre 2001, Canberra.

Copie de l'article en annexe

Table des matières

Introduction

Préambule

Premier Chapitre : Du conflit de la gestion de l'eau aux solutions envisageables **3**

1	Le bassin versant du Mae Uam	3
1.1	Climat	3
1.2	Le territoire du Mae Uam	4
1.2.1	Occupation de l'espace	4
1.2.2	Typologie et cartographie des qualités de sols	6
1.2.3	Les systèmes irrigués	7
1.3	Population	8
1.3.1	Structure de la population	8
1.3.2	L'exploitation familiale : centre de décision et de gestion des ressources	9
1.4	L'agriculture locale	10
1.4.1	Productions végétales	10
1.4.2	Autres productions agricoles	11
1.5	Müang fai: le système irrigué des villages de Mae Chaem	12
1.5.1	Structure physique	12
1.5.2	Mu fai: le groupe de gestion de l'irrigation	13
1.6	La problématique	16
1.6.1	Accroissement de la population	16
1.6.2	La déforestation: un faux problème à Mae Uam	17
1.6.3	Intensification et extension des périmètres irrigués	19
1.6.4	Conclusion	19
2	Quel outil, quelle démarche ?	20
2.1	Des systèmes d'aide à la décision aux systèmes multi-agents	20
2.1.1	Les outils d'aide à la décision	20
2.1.2	Exemples d'applications	22
2.1.3	Les Systèmes Multi-Agents	24
2.1.4	Discussion	27
2.2	Démarches et méthodes	29
2.2.1	Le cadre de la modélisation	29
2.2.2	Démarches de modélisation	30
2.2.3	Cormas, une plate-forme de simulation multi-agents	33
2.2.4	Éléments de réflexion sur la représentation des agents	34

Deuxième Chapitre : Du terrain à la modélisation, description du modèle étape par étape 37

1	Représentation de l'espace	37
1.1	Une représentation schématique ...	37
1.1.1	Intérêt d'une représentation schématique	37
1.1.2	Unité de surface et taille de la grille	38
1.1.3	Un espace à plusieurs couches : les cartes du modèle	38
1.2	... mais les proportions sont respectées	41
1.2.1	Taille du bassin (et des zones)	41
1.2.2	Intersection occupation du sol / qualité de sol	41
2	Les modèles biophysiques	42
2.1	Rôle de la dynamique biophysique	42
2.2	Un modèle distribué de bilan hydrique	42
2.2.1	Un modèle préexistant mais re-formalisé et re-programmé	42
2.2.2	Distribution du modèle à l'échelle de la parcelle	46
2.2.3	Limites de l'architecture du modèle	47
2.3	Un modèle hydraulique simplifié	48
2.3.1	Un débit amont provenant d'un fichier extérieur	48
2.3.2	Distribution de l'eau dans les canaux	48
2.3.3	Des canaux aux parcelles	49
2.3.4	Conséquences de la structure du modèle	50
2.4	Validation du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant	50
2.5	Conclusion	51
3	Les acteurs du système : dynamiques, décisions et usage des ressources	53
3.1	Les agents du modèle	53
3.1.1	Types d'agents	53
3.1.2	Les catégories d'exploitations familiales	54
3.2	La gestion agricole et le choix des cultures	56
3.2.1	Représentation des activités agricoles	56
3.2.2	Le processus de décision du choix de culture	57
3.3	Les activités non-agricoles	60
3.4	Les modes de gestion de l'eau	61
3.4.1	Différents niveaux de gestion modélisés	61
3.4.2	Processus de négociation	64
3.5	La dynamique foncière et usage de la forêt	67
3.5.1	Représentation des dynamiques foncières	67
4	Architecture du modèle et déroulement d'une séquence	68
4.1	Initialisation et lancement du modèle	68
4.2	Organisation d'un pas de temps	69
4.2.1	Intérêts du séquençage choisi	69
4.2.2	Déroulement en sept étapes	69
4.2.3	Organisation des dynamiques du modèle	71
5	Modes d'utilisations de CatchScape	72
5.1	Simulations et scénarios	72
5.2	Utilisation classique	72
5.3	Utilisation de points de vue	73
5.3.1	Quelques exemples	73
5.3.2	Vers un support à la négociation	77

1	Validation interne et cohérence du modèle : simulation / terrain	79
1.1	De la validation des SMA et des modèles complexes	79
1.2	Démarche retenue pour l'accréditation	80
1.2.1	Type de validation retenue et objectifs que l'on se donne dans cette validation	80
1.2.2	Plan d'expérience et choix des indicateurs de suivis	80
1.2.3	Méthode d'analyse statistique des résultats de simulations	81
1.3	Variabilité du modèle	82
1.4	Comportement à plus long terme	88
1.5	Indicateurs de terrain et résultats de simulations	91
1.5.1	L'assolement	91
1.5.2	Les rendements	92
1.5.3	Revenu des exploitations familiales	93
1.6	Réaction du modèle à quelques scénarios extrêmes	94
1.6.1	Pic sur le prix de l'oignon	94
1.6.2	Absence de gestion collective	96
1.6.3	Scénario climatique extrême	97
1.7	Suivi de quelques individus types	100
1.8	Analyse partielle de sensibilité	102
1.8.1	Valeur initiale de l'attente du volume d'irrigation	102
1.8.2	Facteurs de nature climatique	104
1.8.3	Paramètres de la gestion de l'eau	106
1.8.4	Efficacité technique des barrages	111
1.8.5	Conclusion	112
1.9	Le modèle est-il accrédité ?	112
2	Expérimentations en laboratoire virtuel	113
2.1	Origine des inégalités retrouvées dans les simulations	113
2.1.1	Constatation d'une séparation entre le cash des riches et le cash des pauvres	114
2.1.2	Même constatation entre les différentes catégories d'exploitations	114
2.1.3	La disponibilité en eau mise en cause	115
2.2	Exploration des modes de gestion de l'eau et interaction amont – aval	117
2.2.1	Premières conclusions provenant des résultats précédents	117
2.2.2	De nouveaux scénarios exploratoires	118
2.3	Un scénario prospectif d'aménagement du territoire : Application d'une réglementation interdisant la culture des zones protégées des bassins versants thaïlandais	120
3	Exploration du système par la simulation : qu'avons-nous appris ?	122

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes

Introduction

La gestion des ressources naturelles est un facteur clé du développement durable des pays d'Asie du Sud Est mais également de nombreux autres pays. L'eau est certainement l'une des ressources les plus importantes dont l'accès et la gestion sont souvent sources de conflits. Encore récemment les Nations Unies estimaient à plus de cent le nombre de zones du monde où un conflit relatif à l'eau existait ou était latent.

A une échelle extrêmement plus réduite, un conflit sur la gestion de l'eau d'irrigation est en train de prendre forme dans le petit bassin versant du Mae Uam au nord de la Thaïlande. Durant la saison sèche, les agriculteurs des périmètres irrigués de l'aval du bassin font face, depuis plusieurs années, à un manque d'eau pour l'irrigation de leurs cultures. Ils accusent les périmètres irrigués de l'amont du bassin d'être responsables de ce manque d'eau via leur gestion des ressources et la déforestation des parties hautes du bassin. D'un autre côté, lorsque l'on regarde l'historique du bassin, on s'aperçoit que la déforestation a été minime ces dernières années. Il y a eu un accroissement important des surfaces irriguées, et donc de la demande en eau, notamment dans les parties basses du bassin, en aval.

Face à ce type de conflit et de situation, quelles peuvent être les démarches adéquates pour trouver un arrangement durable donnant satisfaction à l'ensemble des parties ? L'hypothèse qui est prise dans ce travail de recherche est que le conflit doit être résolu par les acteurs du conflit eux mêmes. Ce qui est proposé ici est une représentation du bassin versant et de son système, constituant un outil d'exploration et d'analyse du système et de scénarios prospectifs.

Au travers du modèle créé durant ce mémoire de DEA, et de son utilisation par simulation, l'objectif est de mieux comprendre comment la gestion de l'irrigation fonctionne dans le bassin, ainsi que les composantes qui lui sont reliées (choix des cultures, évolution des exploitations agricoles). Les Systèmes Multi-Agents répondent à ce type de besoins, en modélisant les usagers de la ressource (les agents) et en leur affectant des règles, des méthodes et des objectifs afin qu'ils puissent évoluer et faire des choix dans un environnement changeant. La composante principale de l'environnement dans ce cas est la dynamique de l'eau dans le bassin et dans les périmètres irrigués. En représentant une multitude d'agents interagissant entre eux, une dynamique biophysique de la ressource en eau, et les interactions entre ces deux systèmes, le modèle multi-agents tente de saisir la complexité du système.

La représentation qui est proposée ici est une vision parmi tant d'autres, néanmoins elle permet de tester des hypothèses et d'entrevoir petit à petit les interactions et les facteurs dominants de ce système. C'est cette démarche exploratoire que nous avons suivie lors de la modélisation, de la simulation et de l'analyse des résultats.

Nous présenterons tout d'abord le bassin versant étudié et la gestion de l'eau pratiquée. Puis nous étudierons les différents outils qui sont envisageables et les choix et démarches relatifs aux Systèmes Multi-Agents. Dans une deuxième partie, nous envisagerons le modèle dans chacun de ses composants ainsi que sa méthode d'utilisation. Enfin, nous présenterons les résultats de simulations au moyen desquels nous explorons le modèle. Ces résultats nous amènent à nous poser de nouvelles questions par rapport au fonctionnement du système du Mae Uam, sa gestion de l'eau et ses facteurs influents.

Préambule: Émergence d'un conflit

En avril 1998, un événement extraordinaire eut lieu dans le nord de la Thaïlande. Cinq mille paysans Thaï vivant dans les plaines du district de Chom Thong (Province de Chiang Mai) manifestaient leur colère et bloquaient l'une des routes principales. Ils demandaient la délocalisation forcée de près de 20 000 villageois des tribus vivant dans les collines, les accusant d'être responsables de grands déséquilibres écologiques : déforestation, feux de forêt et assèchement des rivières durant la saison sèche. L'incident fit la une du Bangkok Post (28 avril 1998) qui soutenait que le conflit, latent depuis deux ans, atteignait alors son point culminant. Derrière ce conflit local et ponctuel se cache en fait une problématique nationale. Avec plus d'un quart de sa superficie recouverte de forêt et une population grandissante, la Thaïlande doit faire face à une gestion de son territoire de plus en plus délicate, notamment concernant les problèmes de déforestation. De son côté, l'agriculture est en pleine expansion à la fois du point de vue des superficies cultivées qu'au niveau de son intensification. Elle génère alors des conflits d'occupation de l'espace ou de gestion de l'eau.

Le cas qui nous intéresse ici, est celui de la province de Chiang Mai située au nord de la Thaïlande. Cette province montagneuse où les équilibres écologiques entre les zones forestières, l'agriculture et la dynamique hydrologique des bassins versants sont très fragiles, est l'une des zones les plus sensibles de Thaïlande en matière de gestion des ressources naturelles.

Par ailleurs, comme le montre Lefroy (Lefroy et al., 2000), ces problèmes se rencontrent dans beaucoup de pays en voie de développement qui doivent faire face à leur croissance démographique, gérer leurs terres arables ou encore lutter contre l'érosion due à des pratiques agricoles ou forestières inadaptées. Le cas que nous étudions dans ce mémoire est donc à replacer dans une problématique beaucoup plus large.

Premier Chapitre : Du conflit de la gestion de l'eau aux solutions envisageables

1 Le bassin versant du Mae Uam

Le bassin versant du Mae Uam est situé dans le nord de la Thaïlande dans la province de Chiang Mai appartenant au bassin de la rivière Ping. Avec une superficie de 6 300 km² et une population de 290 000 habitants (1994-1995), la province de Chiang Mai est l'une des moins peuplées de la Thaïlande (moins de 50 hab./km² à Chiang Mai contre plus de 100 hab./km² en Thaïlande, 1995). Par ailleurs, comme pour l'ensemble du Nord Thaïlande, il s'agit d'une province très montagneuse, avec des crêtes escarpées et quelques plateaux. La pente moyenne est d'environ 35%. Le paysage est essentiellement forestier avec 45% de forêts et 27% de surfaces agricoles (1991). Ces dernières sont composées à plus de 50% de zones de paddy et de terres arables où l'on cultive essentiellement du maïs et du soja. Mae Uam est en fait situé dans le district de Mae Chaem. Ce district est le plus grand de la province et aussi le plus reculé. La densité de population y est encore plus faible que précédemment et la grande majorité des terres est recouverte de forêt (80%). Dans cet environnement les Thaï (Thaïlandais natifs) et les ethnies des collines cohabitent et gèrent en commun les ressources naturelles.

1.1 Climat

Le climat de la province de Chiang Mai est un climat tropical de mousson divisé en deux saisons très marquées : la saison des pluies et la saison sèche. La pluviométrie atteint en moyenne 1 260 mm par an, mais plus de 90% de cette lame d'eau sont concentrés sur une période de six mois allant de mai à octobre (Figure 1), alors que la saison sèche ne compte en moyenne que 17 jours de pluie, de Novembre à courant Avril.

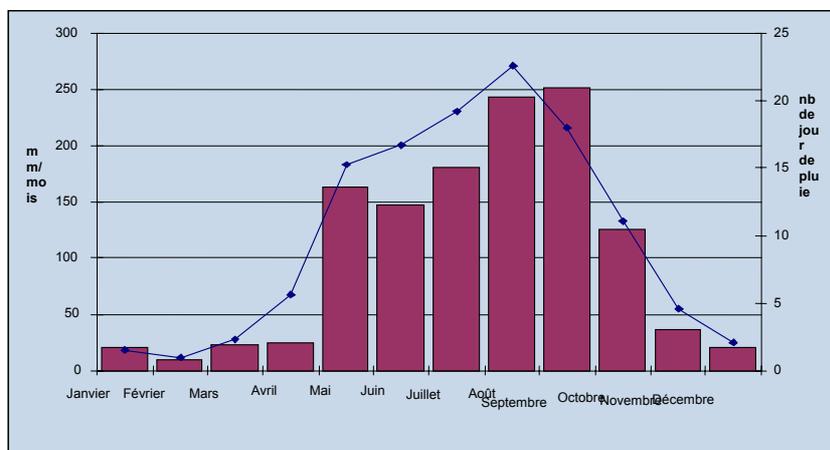


Figure 1 : Pluviométrie du bassin du Chiang Mai (1951-1980)

La température y est relativement fraîche pour une zone tropicale (en moyenne 25° Celsius) en raison de l'altitude élevée de la région (environ 1 200 mètres d'altitude pour le district de Mae Chaem). L'évapotranspiration potentielle suit l'évolution annuelle de la température et est en moyenne de 4,4 mm/jour (Figure 2). Outre le déséquilibre hydrologique entre la saison des pluies et la saison sèche, cette région est située à l'extrémité de la zone d'influence du phénomène climatique El Niño. Ainsi, lors du phénomène 97-98, plusieurs zones n'ont reçu que 50% de leur pluviométrie habituelle. Au niveau de la pluviométrie, le phénomène a été beaucoup moins marqué lors des événements antérieurs 82-83, 87-88 ainsi que les précédents. Par contre on constate une hausse de la température hivernale durant les années El Niño et une corrélation négative avec les rendements en maïs dont l'origine n'est pas encore évidente.

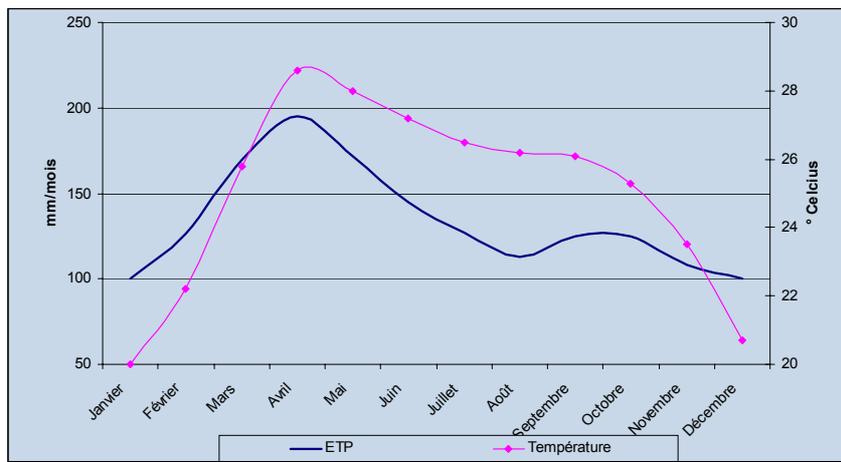


Figure 2 : ETP et température du bassin de Chiang Mai (1951-1980)

1.2 Le territoire du Mae Uam

Le Mae Uam a une superficie de 43 km² et une pente moyenne de 32%. L'exutoire est à une altitude de 480 m et son point le plus haut est à 2 410 m, près du pic de la montagne Inthanon. Le bassin présente une topologie relativement classique dans cette partie de la Thaïlande.

1.2.1 Occupation de l'espace

Beaucoup d'études ont été faites sur l'occupation de l'espace du nord de la Thaïlande. Les deux sources de données cartographiques dont nous disposons proviennent respectivement du Department of land Development de Thaïlande (DLD) et du National Research Council of Thailand (NRCT). Dans les deux cas les informations proviennent du traitement de photos satellites ou de photos aériennes, néanmoins la qualité des cartes n'a pas toujours été très satisfaisante et les missions de terrain du projet IWRAM l'a confirmé. Finalement, il a été choisi de se baser sur la carte d'occupation du sol de Février 1990 du NRCT qui a ensuite été croisée avec des observations de terrain. En effet, le NRCT classe les terrains en cinq catégories : forêt, agriculture, zone urbaine, jachère et prairies. A la suite d'observations, les zones classées agricoles se sont avérées être plus spécifiquement des zones d'agriculture irriguée, cultivées en terrasses où l'on pratique essentiellement la riziculture pendant la saison des pluies. Cette catégorie a donc été rebaptisée « paddy ». Par ailleurs les zones de paddy sont essentiellement situées dans des plaines ou des terrains peu

accidentés. La classe jachère, dont l'appellation était imprécise, correspond en fait à des zones d'agriculture pluviale, situées sur des terrains plus escarpés et parfois nouvellement conquis sur la forêt. Cette catégorie a été renommée « upland » qui, une fois traduit dans la langue de Molière, donne « agriculture pluviale » (traduction libre visant à distinguer ces zones de celles des « paddy » irrigués). Enfin la catégorie prairie est assez ambiguë. Elle est censée faire référence soit à des zones de forêt dégradée soit à des zones agricoles abandonnées. Néanmoins, la distinction n'est pas claire et cette catégorie a été soit ajoutée à la classe forêt soit éliminée de l'analyse.

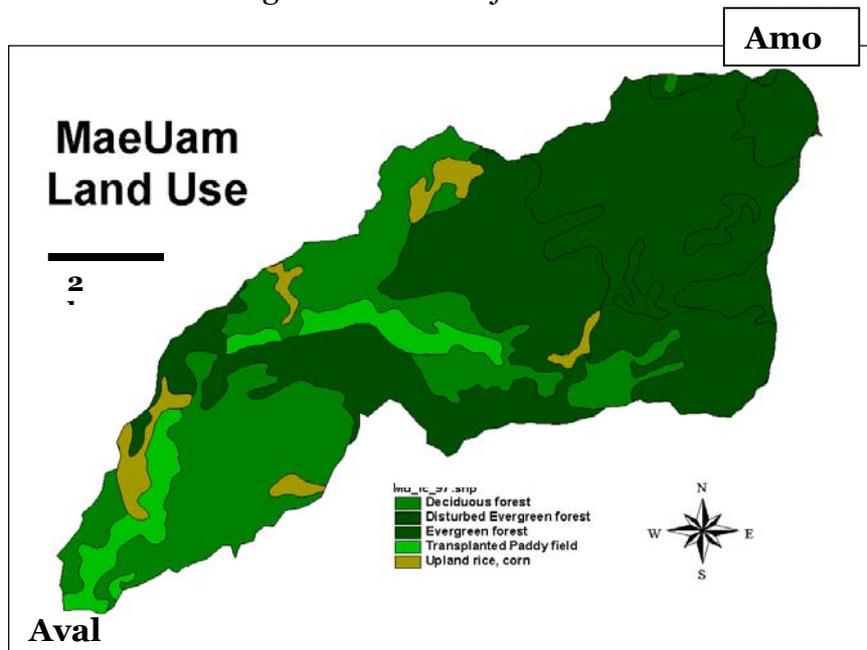


Figure 3 : Occupation du sol du Bassin Versant du Mae Uam

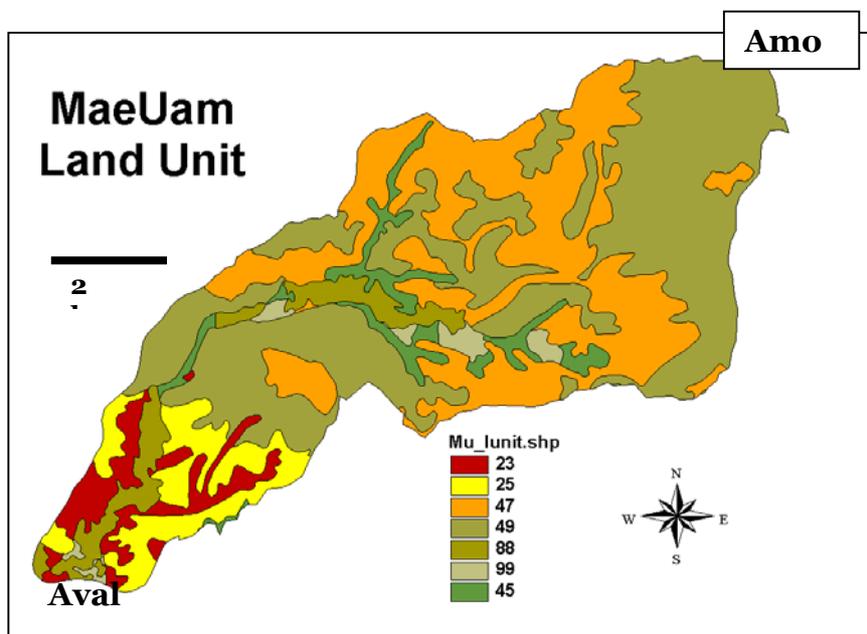


Figure 4 : Land Unit du bassin du Mae Uam (potentialité des sols)

Ainsi, trois catégories ont été retenues : forêt, paddy et agriculture pluviale (les zones urbaines dans le Mae Uam étant de petites tailles et disparates, n'apparaissent pas sur les photos satellites). D'autre part, comme nous venons de le voir, l'obtention de

ce classement n'a pas été aisée et peut sembler quelque peu hasardeuse. Il n'en reste pas moins que ces données sont les plus fiables parmi celles à notre disposition.

Comme nous le montre la Figure 3, l'essentiel du bassin est recouvert de forêts. En réalité ce sont plus de 80% des zones qui sont des zones forestières et la proportion atteint 86% dans la zone amont (au nord-est). Cela a bien entendu une grande influence du point de vue hydrologique puisque, comme on le verra dans la modélisation, c'est la zone forestière qui génère la grande majorité du débit de la rivière. Cette dernière se devine en suivant les zones de paddy qui la borde (en vert clair). Ces zones correspondent également au fond de la vallée. Enfin, on distingue également les zones d'agriculture pluviale localisées soit en bordure des paddy soit plus en retrait, formant des halos au cœur de la forêt, en raison de la présence de villages. Bien souvent, les habitations sont entourées de ces champs, où les paysans font du maraîchage ou d'autres cultures.

La zone agricole n'est donc pas très étendue. On y compte, parmi les quelques 4 300 ha du bassin, 450 ha de paddy et 400 ha d'agriculture pluviale.

1.2.2 Typologie et cartographie des qualités de sols

Les données de qualité de sol proviennent d'un classement et d'une cartographie réalisés par le DLD. La méthodologie est basée sur un système d'évaluation de la potentialité agricole des terres créé par la FAO. Les « Land Unit » ainsi définis, regroupent, entre autres, des caractéristiques pédologiques (texture, profondeur de sol), morphologique (pente) et agronomique (fertilité) dont nous nous servons dans la modélisation. A partir du croisement de l'ensemble des données initiales, le DLD a défini plus d'une centaine de catégories, chacune ayant une spécificité différente. Heureusement pour le modélisateur, lorsque l'on regarde la carte du Mae Uam, on ne retrouve plus qu'une petite dizaine de Land Unit (LU) (Figure 4). Afin d'en comprendre la lecture, les caractéristiques générales des LU sont données dans le Tableau 1.

LandUnit	Type	Depth	Slope
10	gravel	Shallow	16-35 %
23	loamy	Deep	0-16 %
25	loamy	Moderate	16-35 %
45	silty	Deep	0-16 %
47	silty	Moderate	16-35 %
49	silty	Moderate	>35 %
88	clayey	Deep	0-16 %

Tableau 1 : Land Units attributes (source: DLD, 2000)

Dans les trois quarts amont, le bassin présente un terrain très accidenté, composé de sols limoneux, de profondeur moyenne (LU 47 et 49). On distingue également dans cette zone des terrains plus plats constituant l'architecture du réseau hydrographique. Dans ces fonds de vallée on retrouve d'abord en amont des sols limoneux (LU 45), puis, en aval, des sols argileux profonds (LU 88). Le dernier quart aval du bassin est beaucoup plus plat avec, d'une part des sols limoneux-argileux sur des terrains légèrement en pente (LU 23 et 25), et d'autre part le fond de vallée, toujours constitué d'argile profonde.

On retrouve à travers cette carte le réseau hydrographique marqué par les LU à faible pente (45, 88 et 23), où l'on devine une partie amont à régime torrentiel rapide et une

partie aval plus douce, dont le fond de vallée s'élargit et où l'on retrouve certainement une rivière se rapprochant d'un régime fluvial. D'autre part, les textures des sols marquent bien trois grands types de zones rencontrées sur le bassin : les paddy sur des sols argileux et plats, l'amont du bassin sur des terrains très accidentés et limoneux et enfin une catégorie intermédiaire, en aval, formée de sols limoneux-argileux, de moyenne à faible pente.

1.2.3 Les systèmes irrigués

Le réseau hydrographique du Mae Yam est divisé en deux parties : la zone 1 située en amont du bassin (Figure 5) et la zone 2 à l'aval du bassin (Figure 6). Cette démarcation est due à une coupure dans le réseau hydrographique créée par le resserrement de la rivière à cet endroit. Ce resserrement est ensuite suivi d'une chute d'eau qui marque le début de la zone aval. De plus, la distinction du bassin en deux zones est également justifiée par ses caractéristiques morpho-pédologiques, comme nous l'avons vu précédemment.

Par ailleurs, une zone d'environ 200 ha, localisée au sud du bassin (Figure 6), vient se juxtaposer à la zone 2. En effet, bien que ne faisant pas hydrographiquement partie du bassin versant, les périmètres de cet îlot sont irrigués par la rivière du Mae Yam. Des canaux ont été construits par les paysans, plusieurs années auparavant, acheminant l'eau jusqu'aux parcelles de cette zone complémentaire.

Figure 5 : Zone 1, amont du bassin (3 308 ha)

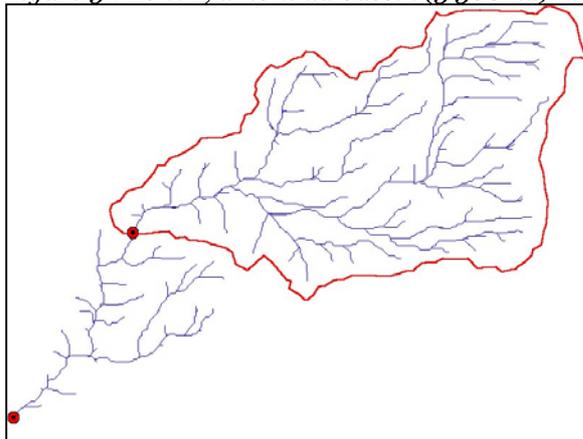
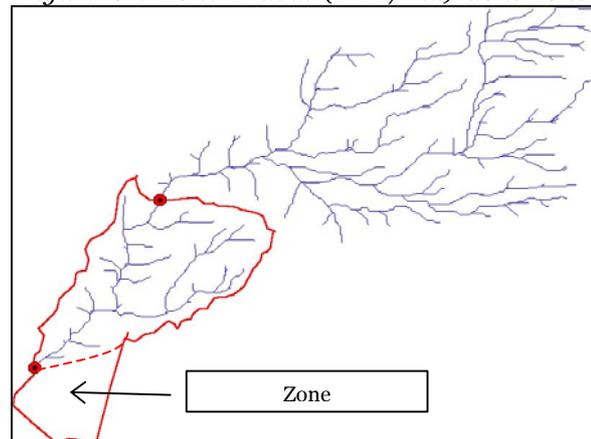


Figure 6 : Zone 2 aval (1 227 ha) dont zone



complémentaire (192 ha)

L'irrigation des périmètres irrigués, qui, rappelons le, correspondent à la zone de paddy, est une irrigation de type gravitaire (nous en reparlerons au §1.5).

Le périmètre de la zone 2 (407 ha avec la zone complémentaire) est bien connu et compte six canaux. Chaque canal est équipé d'un barrage permettant de dériver l'eau de la rivière en fonction de la demande. Les canaux sont gérés par des *mu fai* (le groupe du barrage) qui sont eux-mêmes secondés par des *luk mu fai* (l'enfant du groupe de barrage), chargés d'inspecter les prises d'eau (la gestion des canaux est détaillée au §1.5.2). Les canaux sont situés de part et d'autre de la rivière, de manière alternée lorsque l'on va de l'amont vers l'aval. Seuls les deux derniers canaux sont situés sur la même rive (rive gauche). Ils sont tout deux destinés à alimenter la zone complémentaire. Alors que la gestion des canaux se fait généralement à l'échelle d'un canal (un *mu fai* par canal), la gestion des deux derniers canaux est commune. Cela est dû au fait qu'ils sont tous deux destinés à la même zone et sont gérés par les mêmes personnes. D'ailleurs leurs prises d'eau à la rivière sont très proches l'une de l'autre.

Du point de vue des surfaces irriguées, les trois premiers canaux, irriguent une surface d'environ 90 ha chacun. Le quatrième canal est destiné à l'irrigation d'une très petite surface et n'a que très peu d'influence sur le système hydraulique dans son ensemble. Enfin, les deux derniers canaux, consacrés à la zone complémentaire, cumulent une surface irriguée de 130 ha.

Le périmètre de la zone 1, à l'amont du bassin, est moins bien connu. Nous n'avons notamment pas pu obtenir d'information sur le nombre de canaux qu'il comporte. Néanmoins nous savons que la surface irriguée totale est de 175 ha. Par ailleurs, le mode de gestion de ce périmètre est le même que celui de la zone 2 et passe par des *mu fai*. Ce système de gestion est d'ailleurs une constante du nord de la Thaïlande.

1.3 Population

1.3.1 Structure de la population

Le bassin du Mae Uam compte environ 2 600 habitants (1998), soit environ 60 habitants au km². Cette population est répartie en cinq villages dont trois sont situés en zone 1 (amont) et deux dans la zone 2. Deux des villages amont sont majoritairement habités par des Karen (85% des habitants). Le troisième village amont et les deux villages aval sont exclusivement peuplés par des Thaï. Par ailleurs, les Karen sont essentiellement chrétiens alors que les Thaï sont bouddhistes.

a) Les ethnies du Mae Chaem

Cette répartition est relativement classique dans la région. Par ordre d'importance, dans le district du Mae Chaem, les ethnies représentées sont les Karen (prédominants), les Khon Muang (les gens des plaines, ou Thaï), les Hmong, et, en très petit nombre, les Lisu et les Lawa (Narintarangkool na Ayudhaya, 1988). Selon une enquête du Public Welfare Department de Thaïlande en 1995, le district de Mae Chaem conte 266 villages, dont 84% sont occupés par des Karen, 7% par des Thaï et 5% par des Hmong.

Les Karen constituent donc l'ethnie dominante des peuples du Nord Thaïlande. Ce peuple a migré dans la zone en provenance de Birmanie durant les deux derniers siècles (Keyes, 1979). Une certaine typologie ethnique existe suivant les gradients d'altitude où ces peuples habitent. Ainsi, les Karen vivent en général à une altitude comprise entre 500 et

1 000 m. Ils cultivent du riz paddy sur des parcelles permanentes et irriguées. Ils pratiquent également un système d'abattis-brûlis, sur des terrains plus escarpés dont le temps de rotation est relativement long. D'autres activités subviennent à leurs besoins telles que les récoltes forestières hors bois, l'exploitation de jardins potagers et l'élevage.

Les Thaï sont un peuple natif des plaines de Thaïlande qui a progressivement remonté plus au nord dans le pays, et plus en altitude. Néanmoins, on les trouve généralement à une altitude inférieure à 500 m. Ils pratiquent une agriculture irriguée à l'égal des Karen mais également une riziculture pluviale dans les parties hautes avec un système de rotation des parcelles via des jachères. Ils réalisent aussi des récoltes forestières (hors bois) et pratiquent l'élevage et le maraîchage.

Enfin, les Hmong habitent les parties les plus hautes et les plus reculées des bassins, au-delà de 1 000 m d'altitude. Ils pratiquent l'abattis-brûlis: ils abattent une zone de forêt, la cultivent pendant plusieurs années, puis la laissent en friche. Le nombre d'années de mise en culture n'est pas raisonné et les parcelles sont cultivées jusqu'à

ce que la fertilité du sol soit quasi nulle. La ressource en sol étant limitée du fait des espaces de protection forestier, le gouvernement encourage les Hmong à cultiver des cultures de rente sur des parcelles fixes. Les Hmong sont également réputés pour leurs cultures d'opium. Le bassin du Mae Uam ne comporte pas de village Hmong.

Les différences ethniques constituent dans certains bassins un enjeu important dû aux différents modes de vie des ethnies concernées. Cependant, ce n'est pas le cas dans le Mae Uam ; il s'avère que les Thaï et les Karen pratiquent la même agriculture et, bien qu'il existe une réelle séparation entre les Karen à l'amont et les Thaï à l'aval, les conflits entre ces deux zones n'ont pas pour origine, et ne sont pas envenimés par cette dichotomie (selon les dires d'experts). C'est pourquoi nous ne distinguerons plus, à présent, les deux ethnies.

b) Résultats d'enquête

Selon l'enquête du projet IWRAM menée en 1998 sur 110 familles du bassin du Mae Uam, la taille moyenne des familles est de 4,2 personnes. Pratiquement un quart des personnes enquêtées ont indiqué ne pas avoir suivi d'études et 74% se sont arrêtés en classe primaire. Enfin quelques pour-cent ont suivi une formation secondaire. Les familles sont très majoritairement agricoles, avec 96% des familles ayant comme activité principale l'agriculture et 2,4 adultes par famille travaillant à plein temps dans l'agriculture (Scoccimarro et al., 1999).

La plupart des familles possèdent une source de revenu secondaire. En effet, l'agriculture est l'activité principale mais elle ne suffit généralement pas à subvenir à l'ensemble des besoins. De plus, dans certains cas l'activité agricole est uniquement une activité de subsistance, et la récolte est entièrement destinée à l'alimentation de la famille, ne subvenant donc pas aux besoins pécuniaires pour les dépenses courantes ou les intrants agricoles. Ainsi les activités non agricoles représentent en moyenne 33% du revenu des familles avec 24% pour le travail non-agricole et 9 % pour les produits provenant de la forêt (cueillette et bois). Le revenu agricole est constitué des ventes des productions végétales (56 % du revenu total moyen) et de l'élevage (11% du revenu total moyen). Concernant le travail non-agricole, il est essentiellement constitué d'emplois d'ouvrier dans les villes situées aux alentours du Mae Uam, notamment la grande ville de Chiang Mai située à plusieurs heures de route.

Le revenu brut annuel des familles était au moment de l'enquête en moyenne de 36 100 baht¹. L'écart des revenus est approximativement compris entre une borne basse de 10 000 baht et une borne haute de 60 000 baht, avec 75% des revenus des familles compris dans cet intervalle. Enfin, 11% des familles enquêtées ont déclaré posséder un pick-up, 64% une moto, 69% la télévision et 55% une radio.

1.3.2 L'exploitation familiale : centre de décision et de gestion des ressources

Dans le cadre du projet IWRAM et du développement de son système d'aide à la décision (SAD), un modèle socio-économique des exploitations familiales a été constitué sur la base du concept de RMU: Ressource Management Unit (Walker et al., 1999). Des études sociologiques ont montré que dans le bassin versant du Mae Chaem, les RMU constituent le centre de décision et de gestion des ressources naturelles des bassins. Chacune de ces unités élémentaires de gestion des ressources

¹ Au 3 septembre 2001, le franc équivalait à 6,10 baht ; au 1er septembre 1998, on échangeait 1 US\$ pour 37 baht

correspond plus concrètement à une famille liée à une exploitation agricole, qui est gérée par un chef de famille / chef d'exploitation. Différents types de RMU ont été définis suivant le niveau de ressources possédées, notamment la ressource foncière et la taille des familles, mais également en fonction de l'ethnie, des habitudes culturelles, des caractéristiques géomorphologiques des zones au sein desquelles ces familles habitent et pratiquent l'agriculture, ainsi qu'en fonction de critères économiques (revenu moyen par famille, accessibilité au marché). La structure et la répartition de ces RMU sont de bons indicateurs pour percevoir la structure de la population d'un bassin. Ci-dessous nous présentons ceux du bassin du Mae Uam (Figure 7).

<p>RMU 1 : Paddy Fields Only 13% of upstream population 50% of downstream population</p>	<p>RMU 2 : Upland Fields Only 37% of upstream population</p>
<p>Total paddy area cropped : 5 rai Average gross Income : 34,700 baht/year Wage Labour (non-agricultural): 27%of total Income Forest Production : 11% of total Income Rice Production : 2,000 kg / Hh</p>	<p>Family size : average of 5 Total upland area cropped : 4 rai Average Income : 17,700 baht/year Wage Labour (agri. & non agri. sector) + Forest Production = 53% Total Income Rice Production : 640 kg / Hh</p>
<p>RMU 3 : Paddy / Upland Fields 50% of upstream population 50% of downstream population</p>	
<p>Total upland area cropped : 3.6 rai Total paddy area cropped : 4.3 rai Average gross Income : 34,700 baht/year Wage Labour (non-agricultural): 24%of total Income Forest Production : yes, 7%of total Income Rice Production : 2,600 kg / Hh</p>	

Figure 7 : Les trois types de RMU du Mae Uam, adaptation de (Scoccimarro et al., 1999)

1.4 L'agriculture locale

1.4.1 Productions végétales

Nous avons déjà entre-aperçu les activités agricoles du Mae Uam au travers de son espace et de sa population. Ainsi, nous savons que deux grands types de production agricole végétale caractérisent le bassin : les productions de la zone de paddy et celles de la zone d'agriculture pluviale. Dans le passé l'agriculture des paysans de la zone était une agriculture de subsistance focalisée sur la production de riz pour l'alimentation. Le riz était produit à la fois sur les zones de paddy et d'agriculture pluviale. Des cultures maraîchères, ainsi que d'autres cultures alimentaires, étaient réalisées en bordure des champs de riz et dans des potagers juxtaposés aux habitations. Depuis une vingtaine d'année, les productions se sont énormément diversifiées.

Comme dans d'autres bassins voisins, il y a eu une adoption massive de la culture de soja comme culture de rente, après son introduction dans le district en 1984. D'autres cultures ont été testées mais sans grand succès. La culture du maïs a été essayée dans le village de To Rua en 1997 sur des parcelles de paddy pendant la saison sèche, mais

les rendements furent médiocres en raison d'un hiver relativement froid. De petites surfaces d'oignon, de carotte, de pomme de terre et d'autres cultures de rente sont présentes dans quelques villages mais le soja reste la culture de rente prédominante. En effet cette culture assure un revenu correct tout en ayant un coût relativement faible, contrairement à la culture d'oignon qui coûte cher à la plantation (coût des bulbes). Les données disponibles concernant l'accès au marché des autres cultures que le soja sont contradictoires et il n'est donc pas possible de savoir si le marché est un facteur limitant. Cependant la trésorerie semble le facteur limitant principal. En effet, selon l'enquête de l'IWRAM de 1998, les décisions de culture sont en grande partie fondées sur le montant d'argent disponible en début de saison de culture. A ce moment, le cash moyen disponible des exploitations est de 14 000 baht. Alors que la majorité d'entre elles est dans une situation de trésorerie positive, 35% sont en situation de déficit et 24% sont en dessous de 10 000 baht. Or la culture d'un hectare de soja coûte environ 3 000 baht et celle d'un hectare d'oignon plus de 40 000 baht. Même si les cultures de rente se sont développées sur le bassin, la culture de riz reste l'élément principal de l'assolement durant la saison des pluies (Tableau 2).

	Saison des pluies		Saison sèche	
	Riz	Soja	Soja	Rien
Zone de paddy	85%	15%	48%	52%
Zone d'agriculture pluviale	76%	24%	-	-

Tableau 2 : Utilisation des parcelles agricoles (en % de la zone considérée), enquête de l'IWRAM, 1998

Par ailleurs, on notera que les productions végétales ne sont pas possibles durant la saison sèche sur les parcelles pluviales (Tableau 2).

Les rendements obtenus dans le Mae Uam sont identiques à ceux obtenus en moyenne dans le district du Mae Chaem. Les rendements moyens de 1994 à 1998 sont de 3,4 Tonnes/ha pour le riz paddy, de 2,1 Tonnes/Ha pour le riz pluvial et de 1,4 Tonnes/Ha pour le soja.

1.4.2 Autres productions agricoles

Les cultures pérennes sont pratiquées en bordure des habitations dans des jardins/potagers. Les fruitiers les plus courants sont le tamarin (48% des fruitiers au moment de l'enquête), le bananier (19%), le manguier (15%) et le longane (10%). La surface totale de fruitiers est restreinte à 10 hectares sur l'ensemble du bassin. La production est autant utilisée pour la consommation personnelle que pour la vente.

L'élevage est également relativement limité. Toute une gamme de productions est présente, utilisées à la fois pour la consommation des familles et pour la vente : bovins mixtes (viande et lait), buffles pour les travaux des champs, cochons, canards et poulets. De manière générale, les exploitations ont toutes quelques animaux de chaque espèce. A titre d'exemple, la moyenne par exploitation dans le Mae Uam est de 3 cochons, 3 vaches, 3 buffles, 7 canards et 22 poulets ! Une poignée d'exploitations possède des ateliers d'élevage plus conséquents.

1.5 Le système irrigué des villages de Mae Chaem

1.5.1 Structure physique

Le système de *müang fai* représente un système irrigué comportant un canal, un barrage, un périmètre arrosé et un système de gestion. Parmi les trois catégories de *müang fai* que l'on trouve dans le grand bassin du Mae Chaem, les *müang fai* du Mae Uam appartiennent à la petite catégorie allant de 160 à 1 600 ha de terres arrosées par canal. Les *fai* (barrage) du bassin sont construits avec des matériaux « naturels » : des bambous, du bois, de la terre (dans d'autres bassin, on trouve des *fai* construit en béton). Ils sont construits en travers de la rivière, sur toute sa largeur, et aménagent, dans la partie plus ou moins concave de la section, l'entrée de l'eau dans le canal d'irrigation. Les *fai* sont souvent construits dans des méandres de la rivière. En réalité, il existe deux barrages par *fai*, à savoir un barrage principal amont où se trouve la prise d'eau et le début du canal et un barrage aval qui est un barrage de soutien en raison du régime très torrentiel des rivières de ces régions montagneuses. Ainsi, un plan d'eau plus calme est créé en amont du barrage aval et permet de diriger l'eau vers le canal plus facilement. Durant la saison sèche et le début de la saison des pluies, l'eau passe par une section plus étroite du *fai* qui la canalise, alors que durant la saison des pluies le *fai* est quasiment submergé. Par ailleurs, la double structure du *fai*, se justifie du fait des matériaux charriés par la rivière au moment des crues qui peuvent parfois être de gros rochers, causant, de toute évidence, de gros dégâts sur ces structures fragiles². Ainsi le deuxième barrage est aussi un barrage de « sécurité ».

Par ailleurs, ces dégâts ainsi que l'usure normale du *fai*, amènent les villageois à entreprendre des travaux de maintenance deux fois par an, à chaque entre-saison. Pendant cette période, les canaux sont fermés et tout les irrigants sont appelés pour participer aux travaux d'entretien et aux réparations. C'est un important moment de la vie du *müang fai* pendant lequel une grande partie de la main d'œuvre des villages est mobilisée³.

Le canal est construit en terre avec de l'argile lourde qui se trouve facilement dans les zones de paddy. On trouve d'importants dépôts de sédiments dans les canaux qui viennent s'accumuler dans certains endroits du canal et causent une diminution de la vitesse de l'eau jusqu'à obstruer la section. De ce fait, les périodes d'entretien des barrages sont également celles de nettoyage des canaux.

Le réseau de canaux varie d'un *müang fai* à l'autre. Suivant la taille du système on compte deux à trois niveaux de canaux. Les canaux tertiaires sont en fait souvent des canaux terminaux acheminant l'eau jusqu'aux parcelles d'un seul exploitant ; lorsque deux niveaux de canaux sont présents, il s'agit en fait de prélèvements individuels directement dans le canal secondaire, si bien que dans les deux cas (deux ou trois niveaux de canaux), la gestion des canaux primaires et secondaires est collective, et le niveau en dessous (canaux tertiaires quand ils existent) a une gestion individuelle. Entre les canaux primaires et secondaires, des planches de bois sont installées au niveau de la prise d'eau et permettent de réguler le débit dérivé. C'est l'ajustement de

² tous les 4 à 5 ans les dégâts seraient tels que le *fai* devrait être quasiment reconstruit entièrement ; ce qui par ailleurs, en diminuant instantanément le débit de l'eau dans le canal, protège ce dernier ainsi que les parcelles et les cultures qui y sont rattachées.

³ les travaux d'entretien sont souvent très importants et nécessitent des règles sociales et une gestion collective forte reposant sur des siècles d'expérience et de tradition.

cette planche qui se fait de manière collective. Au dernier niveau du réseau, un tuyau en bambou calibré (*piang*) amène l'eau directement du canal jusqu'à la parcelle (il est enfoncé au travers du bourrelet du canal).

Malgré la présence des réseaux de canaux secondaires et parfois tertiaires, toutes les parcelles n'ont pas un accès direct aux canaux. Certaines sont en fait irriguées par la parcelle "du dessus" (Figure 8) lorsque cette dernière déborde. Les parcelles du bas prélèvent alors l'eau dans les terrasses qui les précèdent. Ils s'en suit alors un jeu de distribution d'eau complexe, au sein du périmètre d'un canal, qui se fait soit via des cascades de terrasses soit par la construction de canaux secondaires acheminant l'eau directement aux parcelles du bas (Figure 9). L'organisation de ce système ne suit pas de règles bien définies et se fait de manière empirique suivant les solutions techniques envisageables, les relations existantes entre les irrigants, leurs tempéraments ainsi que d'autres paramètres sociaux ou économiques. Il est par ailleurs intéressant de constater que l'on retrouve également ce type d'organisation dans des systèmes rizicoles terrassés d'autres pays d'Asie du Sud Est comme l'Indonésie (Becu, 1999).

Figure 8 : Une distribution de l'eau complexe au sein du périmètre d'un canal principal

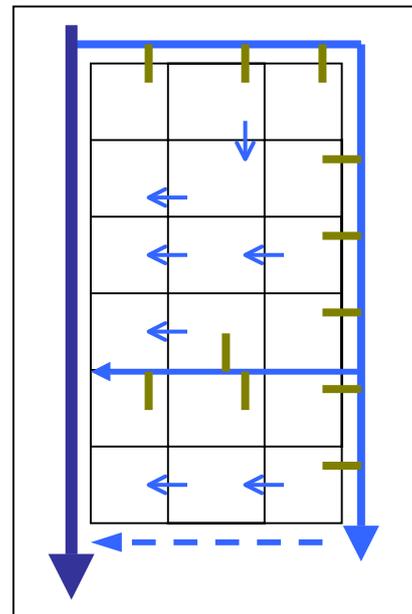
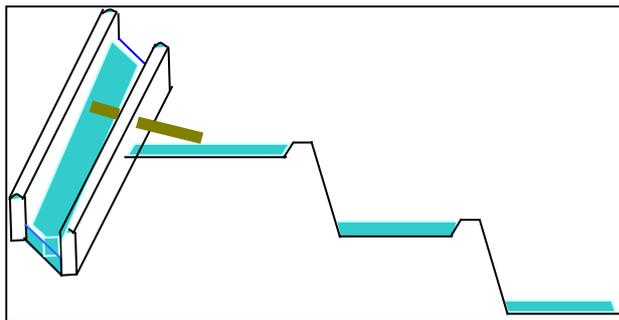


Figure 9 : Les cascades de terrasses dans les périmètres irrigués du Nord Thaïlande

Lors de la saison des pluies, l'offre en eau est bien supérieure à la demande et les irrigants ne rencontrent pas de déficit. L'eau s'écoule alors dans le réseau et est drainée vers la rivière soit au travers des cascades de parcelles soit par des canaux qui retournent vers la rivière.

Par contre durant la saison sèche, la capacité de la rivière et du réseau est largement insuffisante pour irriguer l'ensemble du périmètre d'un canal.

1.5.2 Mu fai: le groupe de gestion de l'irrigation

a) Structure et règles de fonctionnement du mu fai

Un groupe de gestion de l'irrigation, *mu fai* (le groupe du barrage), est composé de l'ensemble des irrigants⁴ d'un même *müang fai*. Alors que les aménagements initiaux des systèmes irrigués (terrassement, canaux, barrages) ont bien souvent été réalisés

⁴ le membre du *mu fai* est l'utilisateur de la parcelle et de l'irrigation et non le propriétaire.

par l'Etat, l'usage et la gestion en ont été laissés au *mu fai*. En réalité, la plupart des paysans considèrent que la structure physique d'un *müang fai* est leur propriété, gérée en commun entre l'ensemble des irrigants au travers du *mu fai*. Ce dernier gère l'ensemble des activités liées à l'irrigation, selon des règles communales. Étant donné qu'un *müang fai* dépasse souvent les limites d'une seule commune, les *mu fai* sont communs entre différents groupes villageois.

Un chef de canal, le *kae müang*, est élu par chacun des membre du *mu fai*. Il est responsable de la coordination des activités, de l'entretien et des opérations d'irrigation. Il s'agit de personnes ayant une bonne connaissance du système hydraulique, âgées de 35 à 55 ans. Il s'avère que bien souvent il s'agisse également de personnes plus ou moins influentes dans la communauté soit de par leur statut social soit en raison des surfaces qu'elles cultivent. Concernant les opérations d'irrigation, le *kae müang* organise l'allocation de l'eau entre les irrigants, résout les conflits entre les irrigants et négocie avec les autres *kae müang* du bassin (à l'amont ou à l'aval) pour organiser la gestion commune de plusieurs canaux primaires lors de la saison sèche. Il est également responsable des cérémonies religieuses du réseau de canaux, qui ont lieu lors de l'ouverture des canaux au début d'une saison d'irrigation. Le chef de canal est assisté par le *laam*, un intermédiaire qui informe les irrigants des réunions, prélève l'argent des droits d'irrigation et remplace le *kae müang* si besoin est, et par le *luk mu fai* qui inspecte les canaux et les volumes prélevés. Ces deux personnes et le *kae müang* sont rémunérés par l'ensemble des membres du *mu fai* qui payent également l'entretien du système et les frais des cérémonies religieuses. Au niveau du paiement des « droits d'irrigation » un système général existe dans les différents bassins du Mae Chaem, qui consiste à payer les droits de la saison des pluies par des sacs de riz et ceux de la saison sèche avec de l'argent liquide. Les prix varient énormément d'un canal et d'un bassin à l'autre et, malheureusement, nous n'avons pas d'informations concernant les tarifs des périmètres du Mae Uam. Il semblerait, à dire d'expert, que le système de paiement de droits d'irrigation à Mae Uam n'a pas un rôle primordial dans la gestion de l'eau et des parcelles cultivées, ou du moins n'a pas de grande influence⁵.

Lors des saisons de culture, et plus particulièrement pendant la saison sèche lorsque le manque d'eau apparaît, plusieurs systèmes de gestion de l'eau sont possibles au sein d'un canal: soit une distribution en accès libre, soit des systèmes de rotations, soit enfin un système de contrôle du niveau d'eau prélevé individuellement via la taille des *piangs* (tuyau de bambou) installés au niveau des parcelles. Ce troisième système est le plus rencontré à Mae Chaem (Tanabe, 1994) et est aussi celui pratiqué à Mae Uam.

b) Gestion lors de la saison des pluies

Ainsi, à partir du mois de mai, lorsque les réparations ont été effectuées, les canaux sont remplis à plein, les planches en bois au niveau de l'entrée des canaux secondaires retirées, et les *piangs* régulent l'eau arrivant à la parcelle. A la fin du mois d'août, les planches sont remises en place et régulent le débit dans les canaux secondaires. Cette gestion est effectuée par le *kae müang* en concertation avec les irrigants de chaque canal secondaire. Le *luk mu fai* vérifie alors que le niveau des planchettes est bien respecté. Vers septembre ces « portillons » sont souvent complètement fermés en raison de la montée des eaux et des risques d'inondations.

⁵ Dans d'autres bassins, il semblerait qu'il participe à la gestion et au contrôle du nombre de parcelles cultivées durant la saison sèche.

Le *kae müang* et le *luk mu fai* sont alors en constante alerte. Enfin vers fin novembre les canaux sont complètement fermés afin de drainer l'eau à la rivière et commencer les récoltes. Vers décembre/janvier, les canaux sont réouverts jusqu'à avril pour la deuxième saison de culture. Tout au long de la saison les piangs régulent le débit arrivant à la parcelle.

c) Gestion lors de la saison sèche

La première mesure prise pour faire face au manque d'eau durant la saison sèche est la diminution de la taille des *piangs*. Ces derniers sont calibrés et l'ensemble des irrigants utilise la même taille de piang (moins d'une dizaine de centimètres de diamètre) Le nombre de piangs par parcelle est alors très important. Par exemple, les *kae müang* considèrent souvent qu'on peut mettre un *piang* pour une surface de 3 rai⁶ et deux piangs pour une surface de 4, 5 ou 6 rai.

Lorsque le *luk mu fai* constate que le débit de l'eau dans les canaux et celui au niveau de la prise d'eau principale, deviennent insuffisant, il en informe le *kae müang*. Celui-ci peut alors décider de diviser le périmètre irrigué du canal en plusieurs groupes et réaliser un système de rotation entre ces groupes. Pour le canal du village de Baan To Rua à Mae Uam, le périmètre est divisé en trois groupes (amont, milieu, aval) et chacun reçoit l'eau pendant 3 jours et 3 nuits. Parfois certains groupes peuvent bénéficier d'un jour supplémentaire. Si la règle n'est pas respectée le groupe responsable est « puni » (selon les mots employés dans les règlements du *mu fai*) en fonction de règles ayant été préalablement définies. Lorsque ces rotations au sein d'un canal ne sont pas suffisantes pour prévenir du manque d'eau, le *kae müang* doit alors négocier avec les autres chefs de canaux pour obtenir plus d'eau. Deux systèmes classiques sont employés en cours de campagne. Le premier est une limitation du nombre de jours d'irrigation par canal (rotation), le deuxième est une limitation des volumes quotidiens prélevés.

Le cas du système de rotation s'effectue au sein d'un même groupe de canaux. En effet, les *müang fai* sont organisés par paires, l'un de chaque côté de la rivière, et ont une gestion parallèle car bien souvent il s'agit de personnes d'un même village ou groupe de villages. Les systèmes de rotation se font alors sur des périodes d'une vingtaine de jour (Vanpen, 1986) (environ 10 jours chacun) avec, comme au niveau intra-canal, des possibilités de jours supplémentaires lorsque les parcelles d'un canal le nécessitent et que l'autre peut encore attendre. Les arrangements entre les deux canaux d'une paire sont en général aisés et ne posent pas de problèmes de conflits entre les *kae müang*.

Le système de partage par limitation des volumes prélevés s'effectue entre des *kae müang* plus éloignés, appartenant à des villages différents. Il s'agit à ce niveau de demander aux canaux amont de diminuer le niveau de leurs prises d'eau dans la rivière. Ces arrangements se passent surtout en fin de saison sèche lorsque le manque d'eau est le plus fort. Les *kae müang* de l'amont ne sont pas obligés d'accepter, néanmoins une certaine entente existe entre eux et ces derniers finissent souvent par céder, si leur *müang fai* n'est pas lui même en situation de pénurie. Les arrangements dépendent également de facteurs « sociaux » qui vont faire que des *kae müang* socialement proches vont arriver à s'entendre plus facilement que si il n'existe que très peu de liens entre eux (Vanpen, 1986).

Un autre système de gestion entre plusieurs canaux existe par ailleurs. En effet, lors des réparations des barrages qui suivent la saison des pluies il peut être décidé de ne reconstruire certains barrages qu'en partie afin qu'ils ne monopolisent pas toute l'eau

⁶ 1 rai = 0,16 ha

disponible durant la saison sèche. Ce type de décision est pris lors d'accords entre les *kae müang* en fonction des résultats d'irrigation de la saison sèche précédente et de l'importance des pluies de la dernière saison des pluies, cette dernière donne une indication sur le niveau de recharge de la nappe et donc sur le débit d'étiage auquel on peut s'attendre pour la saison sèche à venir.

La saison sèche est également la période durant laquelle on voit apparaître des cas de « vol d'eau ». Il peut s'agir du non respect de règles de gestion collective, notamment dans les systèmes de rotation. Au niveau individuel un vol d'eau peut se traduire par un non respect de la part de l'irrigant de la taille ou du nombre de *piang* fixés par le *mu fai* et le *kae müang* (Tanabe, 1994). Il est du rôle du *luk mu fai* de vérifier que les règles soient bien appliquées par l'ensemble des irrigants. Il inspecte donc le canal et les prises d'eau et lorsqu'un « voleur d'eau » est repéré il en informe le *kae müang* qui prend alors des sanctions adéquates. Il s'agit soit d'une interdiction d'irriguer pendant un certain nombre de jours, soit d'une contravention payable sous forme de sacs de riz à la récolte ou d'argent liquide.

1.6 La problématique

Comme dans beaucoup de cas dans le nord de la Thaïlande⁷, on assiste dans le bassin du Mae Uam à l'émergence d'un conflit lié à la ressource en eau, entre les peuples du haut du bassin et ceux du bas. En effet, les agriculteurs de l'aval constatent un manque d'eau durant la saison sèche depuis quelques années, et n'arrivent plus à satisfaire les besoins en irrigation de leurs cultures durant cette saison. En décembre 1998, ce constat s'est traduit par une plainte de la part des agriculteurs de l'aval accusant les peuples de l'amont du bassin d'être responsables de ce déficit.

Afin de recadrer la problématique du Mae Uam dans un contexte plus général, nous présentons ci-dessous les différents aspects constituant la problématique générale de la gestion des ressources en eau et en sol dans le Nord Thaïlande. En effet, dans le cas du Mae Uam, le conflit de gestion des ressources porte sur l'eau bien que les problèmes de déforestation et leurs conséquences soient très courants dans le district de Mae Chaem. Par exemple le bassin versant du Mae Yort, situé à une dizaine de kilomètres du Mae Uam, est un cas type de problématique liée à la déforestation (Walker et al.). Par ailleurs, des questions ont été posées sur l'importance de la déforestation au Mae Uam à un moment où l'on cherchait à comprendre les causes du déficit en eau durant la saison sèche observé dans le bassin. C'est pourquoi nous aborderons ces problèmes. Mais au préalable, il nous semble important de rappeler l'un des facteurs à l'origine de ces problèmes de gestion de la ressource eau et en sol : l'accroissement de la population.

1.6.1 Accroissement de la population

Bien qu'aujourd'hui la population de la Thaïlande soit quasiment régulée, celle-ci a connu un fort accroissement durant ces dernières décennies. Le même phénomène a pu être observé dans le nord de la Thaïlande, cependant nous n'avons pu obtenir de données chiffrées de cette évolution, ni dans le district de Mae Chaem, ni pour le nord de la Thaïlande dans son ensemble.

⁷ Le cas le plus connu est celui du district de Chom Thong qui fit l'objet de nombreux débats (Renard 1994, Waranoot 1995, Waranoot et Bengtsson 1993)

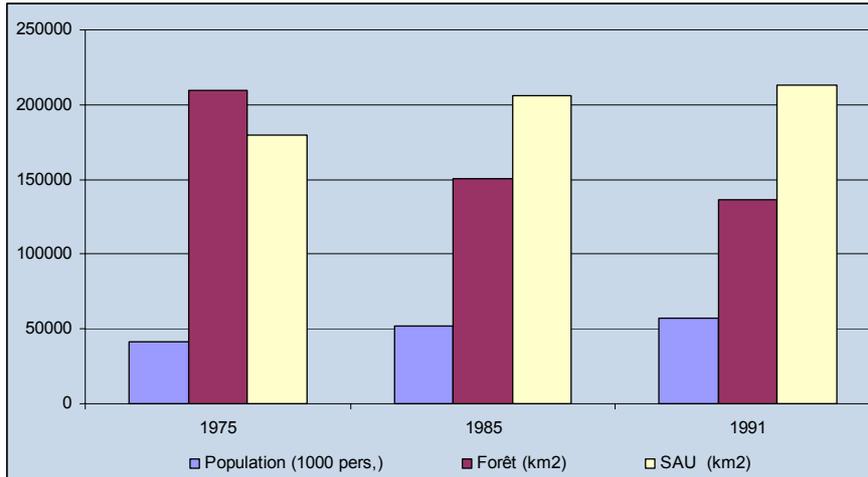


Figure 10 : Evolution de 1975 à 1991 des trois points clés de la problématique des ressources en eau et en sol, en Thaïlande

La Figure 10 donne un bon aperçu de ce phénomène à l'échelle nationale. Cet accroissement a eu comme conséquence immédiate, une augmentation de la demande alimentaire qu'il a fallu satisfaire. C'est ainsi que de grands projets d'aménagement agricole ont été réalisés autant pour augmenter les surfaces cultivées (augmentation de la SAU sur la Figure 10), et plus particulièrement les surfaces irriguées vu leur fort potentiel, que pour intensifier la production. C'est également dans ce cadre que des projets de diversification agricole ont été entrepris dans le Mae Uam (§1.4). Parallèlement à l'accroissement de la population, on peut remarquer une diminution de la surface forestière dans le pays (Figure 10). Les deux phénomènes sont liés. En effet, l'accroissement de la population rurale a poussé les agriculteurs à s'installer de plus en plus haut dans les bassins et à conquérir de nouvelles terres sur la forêt avoisinante. Enfin, une grande partie du surplus de main d'œuvre a été absorbée par les villes où la masse ouvrière est importante et encore en expansion. Ainsi, le facteur population est plus ou moins à l'origine des problèmes de gestion des ressources en eau et en sol.

1.6.2 La déforestation: un faux problème à Mae Uam

Le développement agricole de cette dernière décennie a été accompagné par une diminution de la surface forestière dans le bassin du Mae Uam. En 1985, environ 78% de la superficie du bassin était recouvert de forêt alors qu'en 1995 elle ne représentait plus que 72%, soit une perte de 2,56 km² de forêt. Selon les institutions de développement agricole du Nord Thaïlande et une majorité des ONG travaillant dans la zone, une telle diminution de la surface forestière contribue de manière significative à la diminution du débit de la rivière du bassin durant la saison sèche. Cette théorie est également reprise par les agriculteurs de l'aval du Mae Uam qui accusent les peuples de l'amont de pratiquer une déforestation importante, qui serait la cause du manque d'eau qu'ils subissent depuis plusieurs années.

Enormément d'études (Chusak et al., 1999) (Anan, 1998) et d'articles de presses (Anon, 1993) (Kanwanich, 1997) (Kanwanich, 1997) (Vorapien, 1994) ont traité cette problématique et ses conséquences sur l'équilibre environnemental des bassins versants de la zone. Le but n'est pas ici de rentrer dans le détail des processus évoqués dans ces articles mais d'en donner les grandes idées. Il est avancé que la déforestation accroît le ruissellement durant la saison des pluies du fait du taux d'infiltration inférieur d'un sol nu, d'une jachère ou d'une parcelle agricole, par

rapport à une couverture forestière. Cette diminution de l'infiltration serait alors suffisante pour diminuer significativement le stockage de l'eau dans les nappes souterraines, entraînant ainsi une diminution du débit de base en saison sèche. Par ailleurs, les auteurs estiment également que la déforestation provoque une augmentation de l'envasement des équipements (canaux et barrages) des périmètres irrigués. Cet argument est d'ailleurs repris par les agriculteurs de l'aval du Mae Yam qui constatent une augmentation des dépôts de sédiments dans les canaux, et accusent les systèmes amont d'en être responsables.

Mais ces arguments ne font pas l'unanimité dans le monde scientifique, notamment concernant les effets sur le débit de saison sèche (Bruijnzel, 1990) (Hamilton, 1987) (Ives et al., 1989). Ces auteurs soutiennent qu'au contraire la forêt, via son évapotranspiration, extrait une grande quantité d'eau du système bassin versant, et que les débits de la saison des pluies comme de la saison sèche augmentent après une déforestation massive. Ainsi, Ives et Messerli (Ives et al., 1989) estiment que la forêt doit être vue comme une « pompe » plutôt que comme une « éponge » dans l'équilibre hydrologique des bassins versants.

De son côté le Royal Forest Department soutient la première thèse et argumente : « *Everyone knows that forest is the source of water for all people who lives on Thai soil. We do not have any other source of water in Thailand ... [the forest] provides for underground water shortage, making the ground moist as a benefit for all people... The result of cutting forest is the destruction of the water source of the Thai people.* » (RFD, nd). C'est pourquoi, le Royal Forest Department a mis en place une politique d'aménagement du territoire et des zones forestières thaïlandaise. Entre 1980 et 1990 le développement d'une politique nationale forestière a fixé des priorités en matière de limitation et de régulation des territoires du pays. Ainsi, l'ensemble des bassins de Thaïlande ont été classés par le comité national de l'environnement suivant le niveau de protection dont ils doivent faire l'objet, l'objectif avancé étant de préserver et valoriser la santé hydrologique des bassins versants clés. Cette classification définit notamment les zones de repeuplement forestier, celles de forêt protégée ainsi que les activités agricoles autorisées pour chacune des catégories. Dans le cas du bassin du Mae Yam, voisin du Mae Yam, il a été décidé en 1998, que les agriculteurs originaires des zones prioritaires de protection, définies par le comité de l'environnement, ne devaient exploiter qu'une surface limitée et se maintenir sur des parcelles fixes tout en pratiquant une agriculture extensive. De plus, les agriculteurs nouvellement installés sur ces zones, doivent quitter leurs terrains et s'installer dans des zones moins sensibles. La classification du bassin du Mae Yam a également été réalisée et rentre en conflit avec le système agricole actuel. Néanmoins, pour le moment, aucune mesure n'a été prise pour mettre en application cette classification comme dans le cas de Mae Yam.

En réalité, comme l'a montré une étude réalisée dans le cadre du projet IWRAM (Scoccimarro et al., 1999), la déforestation dans le cas du bassin du Mae Yam semble être un faux problème. Les zones de déforestation citées en début de chapitre demandent à être regardées plus en détail. Alors qu'il est couramment cité que les zones de forêt sont remplacées par des parcelles d'agriculture pluviale, plus de la moitié (62%) des zones déforestées du Mae Yam entre 1985 et 1995, ont été remplacées par des zones de paddy. D'autre part, cette conversion en zone irriguée a été plus significative dans la zone aval du bassin (67%) que dans la zone amont (33%), contrairement à l'image habituelle qui considère que la déforestation est due aux peuples du haut des bassins. La conversion de forêt en parcelles d'agriculture pluviale a également été constatée, mais dans des proportions moindres que pour les

zones de paddy ; entre 1985 et 1995, elle a été de 67 ha (1,5% de la surface totale du bassin).

Ainsi, le manque d'eau durant la saison sèche émerge dans un contexte de déforestation du Mae Uam relativement modeste, avec une évolution des surfaces d'agriculture pluviale plutôt stable mais un accroissement notoire des surfaces en paddy notamment dans la zone aval du bassin.

1.6.3 Intensification et extension des périmètres irrigués

Comme nous l'avons vu au §1.4, le bassin du Mae Uam a fait l'objet de projets de diversification des productions agricoles et d'intensification dans le cadre du développement de la demande alimentaire. Il semblerait qu'en fait le point clé du problème de la ressource en eau du bassin est étroitement lié à cette intensification agricole (Scoccimarro et al., 1999). En effet, les agriculteurs du bassin ayant bénéficiés de ce développement et également de l'accroissement des zones de paddy, ont pu commencer à sortir du système d'agriculture de subsistance dans lequel il se trouvaient. L'agriculture irriguée a permis d'obtenir des rendements plus élevés et plus stables durant la saison des pluies pendant laquelle le riz est produit, permettant alors aux agriculteurs d'assurer leur sécurité alimentaire. Des parcelles irriguées ont alors pu être consacrées à des cultures de rente durant la saison des pluies. Cette évolution a été encore plus significative durant la saison sèche pendant laquelle les agriculteurs cultivent aujourd'hui d'importantes surfaces de soja, introduit par les services de développement agricole. L'apparition importante de cultures de rente durant la saison sèche est certainement également liée aux disponibilités de trésorerie accrues par les cultures de rente de la saison des pluies et le développement global du bassin. Par ailleurs l'enquête de l'IWRAM de 1998 a également montré que l'accroissement des revenus résultant de ces cultures était investi dans des projets d'intensification : accroissements du nombre de parcelles de paddy, installations de matériel d'irrigation sur les parcelles pluviales, plan d'assolement à trois cultures par an. L'intensification de l'agriculture dans la province de Chiang Mai a également été étudiée par (Cooper, 1984) (Kanok et al., 1994) (Michaud, 1997).

Par ailleurs, le développement de l'agriculture irriguée a été plus significatif dans la zone aval du bassin du Mae Uam que dans sa zone amont, le pourcentage des exploitations de l'aval ayant accès à des parcelles de paddy (83%) étant supérieur à celui de l'amont (77%).

Ainsi, le développement de l'agriculture du Mae Uam ces dernières décennies a permis aux agriculteurs de sortir en partie d'un système d'agriculture de subsistance et a entraîné le développement de cultures de rente durant la saison des pluies mais également durant la saison sèche. La demande en eau s'en est trouvée accrue ce qui pose aujourd'hui des problèmes pendant la saison sèche. Par ailleurs l'intensification et l'extension des zones irriguées se sont plus particulièrement réalisées dans la partie aval du bassin.

1.6.4 Conclusion

Tout d'abord, le manque d'eau durant la saison sèche émerge dans un contexte de déforestation du Mae Uam relativement modeste, avec une évolution des surfaces d'agriculture pluviale plutôt stable mais un accroissement notoire des surfaces en paddy. D'autre part, on note une intensification et une extension des zones irriguées dans le bassin, notamment dans la zone aval du bassin. Ainsi, contrairement à ce que

soutiennent les services de développement du Nord Thaïlande et les ONG, le manque d'eau est plutôt lié à une augmentation de la demande (de la zone aval particulièrement) qu'à une diminution de l'offre en eau via les problèmes de déforestation et leurs conséquences sur le bilan hydrologique des bassins.

Par ailleurs, le conflit qui émerge provient des agriculteurs de l'aval, soutenus par les services de développement et les ONG, qui accusent ceux de l'amont d'une mauvaise gestion de leurs surfaces forestières mais également de leur gestion de l'eau. Comme dans d'autres bassins de Mae Chaem il s'agit d'un conflit sensible qui est d'autant plus envenimé qu'il existe une dichotomie ethnique entre l'amont et l'aval, ainsi qu'une dépendance de l'agriculture irriguée de l'aval par rapport à la gestion de l'eau à l'amont qui est souvent source de désaccord et de contestation dans les systèmes irrigués gravitaires.

C'est pourquoi, il nous semble important de garder une attitude ouverte par rapport à ce conflit et de le traiter de manière objective, en restant neutre et sans a priori. Nous ne choisirons donc pas, par exemple, une problématique du type : conséquence de l'intensification de l'agriculture sur la disponibilité en eau durant la saison sèche.

La problématique que nous avons alors retenue dans le cadre de ce travail de recherche est :

Comment aider les acteurs locaux et institutionnels à gérer au mieux la ressource en eau dans un contexte conflictuel ?

2 Quel outil, quelle démarche ?

2.1 Des systèmes d'aide à la décision aux systèmes multi-agents

L'objet de ce chapitre est de présenter les différents types d'outils qui ont été développés ou qui sont en cours de développement, pouvant être utilisés pour traiter la problématique suivante : **Comment aider les acteurs locaux et institutionnels à gérer au mieux les ressources en eau et en sol dans un contexte conflictuel ?**

En premier lieu, nous présenterons les outils d'aide à la décision qui regroupent un grand nombre d'instruments variés, utilisés seuls ou en combinaison. Dans un second chapitre nous donnerons quelques exemples d'applications de ces outils. Puis, nous présenterons la modélisation par Systèmes Multi-Agents (SMA) et son utilisation dans le cadre de la gestion des ressources naturelles. Enfin nous discuterons de l'intérêt et de l'adéquation de ces outils par rapport à la problématique choisie.

2.1.1 Les outils d'aide à la décision

Les outils d'aide à la décision sont une catégorie très large d'outils de gestion et sont parfois difficiles à définir et répertorier. Aussi, avant de présenter quelques grandes catégories d'outils, il nous semble intéressant d'en voir différentes classifications.

Dupont et al. (Dupont et al., 1998) distinguent les outils d'aide à la décision des systèmes d'aide à la décision (SAD). Les premiers sont des composantes spécialisées

plus ou moins complexes reposant sur certains concepts alors que les SAD sont une catégorie transversale qui regroupe un ou plusieurs outils d'aide à la décision. Cette classification nous paraît d'autant plus importante que l'on voit apparaître de plus en plus de systèmes intégrés regroupant plusieurs modules spécifiques.

D'autre part, il est également intéressant de séparer les modèles de simulation et les modèles d'optimisation (Tennessee, 1998). La première catégorie, a pour objectif de générer des simulations à partir de scénarios préalablement conçus alors que les modèles d'optimisation génèrent un scénario optimum par rapport à des critères pré-définis. Ce sont donc deux approches différentes de l'aide à la décision et on comprendra dès à présent que dans le cadre de problématique conflictuelle où la discussion et la concertation sont des éléments clés, les modèles d'optimisation semblent peu adaptés du fait qu'ils proposent une solution unique.

a) Modèles statistiques

Les premiers outils d'aide à la décision que nous entrevoyons sont les modèles statistiques. Ces modèles donnent une estimation des paramètres du modèle de façon à ce que les résultats simulés soient les plus proches possible des données obtenues de manière empirique. La force de ces modèles est leur forte connexion aux données de terrains et la validation qu'il est possible d'en faire. Cependant cela implique d'une part d'avoir des données de qualité et d'autre part de bien les choisir afin qu'elles soient représentatives du système étudié. De plus, les processus de causalité sont parfois reliés les uns aux autres et la modélisation statistique n'arrive plus à distinguer les causes directes des causes indirectes. Globalement, ce type d'approche semble prématuré dans des cas où les processus de causalité et la manière dont ils opèrent ne sont pas encore bien connus, et où l'on ne cherche pas encore à quantifier les relations (Hanneman, 1995).

b) Système expert

Une autre catégorie d'outil qui commence à être utilisée pour la gestion des ressources est celle des systèmes experts. Ces derniers font appel au concept d'intelligence artificielle. Ils se basent sur la logique floue ou sur des règles de décision pour constituer une base de connaissances permettant au système de fournir un résultat issu de l'intégration d'informations complexes et multiples (Dupont et al., 1998). Le rôle de ces systèmes est de simuler l'expertise qui pourrait émaner d'un groupe d'experts humains. C'est pourquoi ce type d'outil, bien qu'il soit autonome par la suite, nécessite à la base une grande quantité d'informations qu'il n'est pas toujours facile d'obtenir sur le terrain. Les systèmes experts sont donc de puissants outils de diagnostic mais ils sont surtout utilisés pour de l'aide à la décision sur des thématiques très ciblées axées sur l'intervention et l'opération.

c) Modèles mathématiques

La modélisation mathématique propose une approche complètement différente et repose historiquement sur les théories micro-économiques de la rationalité des acteurs et la notion d'optimisation économique (Courbon, 1982). Contrairement aux outils statistiques, la modélisation mathématique s'intéresse à l'intérieur de la boîte noire que constitue le système. Le modélisateur adopte donc une démarche prospective où l'enjeu est de comprendre les processus et les dynamiques du système, de les formaliser à l'aide de fonctions mathématiques, puis de les simuler. Lorsque cet objectif est atteint, le modèle décrit de manière synthétique les dynamiques internes. Les résultats obtenus sont des solutions générales exactes et encore une fois synthétiques pour qui sait lire le langage mathématique.

Néanmoins, l'une des faiblesses de ce type de modèle est que certains problèmes, et notamment certaines théories sociologiques, ne trouvent pas de formalisation mathématique satisfaisante (Hanneman, 1995). Par exemple, Axelrod (Axelrod, 1997) souligne les limites de ce genre d'outils pour formaliser des agents adaptatifs. D'autre part, il arrive que certaines solutions générales ne puissent pas être résolues. Enfin, Hanneman souligne également dans la même référence que ci-dessus, que bien que les modèles mathématiques offrent des solutions élégantes et porteuses de beaucoup d'informations concernant l'état d'un système et ses changements relatifs, ils sont moins performants lorsqu'il s'agit de décrire l'historique de l'évolution d'un système ou de ses comportements. D'après lui, ces outils seraient plus efficaces pour fournir des résultats globaux et finaux plutôt que des évolutions temporelles ou des dynamiques.

d) L'analyse systémique

Enfin, une catégorie parallèle par rapports aux outils précédents est celle de l'approche systémique. Ce courant globalisant se méfie des approches de l'instrumentation gestionnaire, jugée trop analytique et considère l'organisation comme un système complexe constitué d'une multitude d'éléments de nature différente et interagissant entre eux (Moison, 1997). Cependant cette approche est plus tournée vers l'analyse des flux entrants et sortants et la description du système que sur l'aspect comportementale des interactions et l'évolution du système (Ferber, 1994). De plus, elle présente des limites lorsqu'il s'agit de prendre en compte le facteur temporel, ce qui gêne alors la représentation de dynamiques ou d'évolutions temporelles dans des problèmes de gestion des ressources.

Ainsi, nous avons vu succinctement quelques grandes catégories d'outils utilisés seuls ou en combinaison dans un SAD. Rappelons également qu'aujourd'hui, énormément de SAD incorporent des systèmes d'information géographique (SIG) permettant d'analyser et de manipuler les composantes spatiales des systèmes. Nous discuterons de l'utilisation de ces outils dans le cadre de notre problématique dans un chapitre suivant.

2.1.2 Exemples d'applications

Afin d'étayer et de donner une vue plus concrète de la mini-revue que nous venons de voir, nous donnons à présent quelques exemples d'applications utilisant certaines de ces catégories d'outils.

a) Le SAD de l'IWRAM

Dans le cadre de ses recherches sur la gestion des ressources naturelles dans le Nord Thaïlande, le projet IWRAM (Integrated Water Ressources Assessment and Management)⁸ développe un SAD regroupant deux modules principaux : un modèle bio-physique et un modèle socio-économique. Le principe est de calculer dans un premier temps l'offre en eau d'irrigation grâce à un modèle hydrologique, puis la demande en eau des exploitations agricoles par l'intermédiaire du modèle socio-économique.

Le modèle hydrologique pluie-débit IHACRES (Jakeman et al., 1990), transforme tout d'abord la pluie brute en pluie nette par une fonction de production basée sur les données de précipitations et de températures. Puis, il transforme la pluie nette en

⁸ Projet de l'ICAM (Integrated Catchment Assessment & Management Centre) de l'Australian National University

débit via une fonction de transfert. Plus précisément, IHACRES est conçu sur le concept du TOPMODEL de Beven et Kirkby (Beven et al., 1979 ; Beven et al., 1984), (Quinn et al., 1995). Ce type de modèle suppose que la contribution au ruissellement de chaque partie du bassin est proportionnelle à l'humidité du sol. (Schreider et al., 1999). Il existe alors des surfaces dites contributives et des surfaces non contributives (Desbordes, 2000).

Le modèle socio-économique est basé sur le concept de RMU: Ressource Management Unit (Walker et al., 1999). Comme nous l'avons vu au §1.3.2, les RMU correspondent dans le Nord Thaïlande aux unités élémentaires de gestion de la ressource. Le SAD distingue différents types de RMU en fonction des caractéristiques des exploitations familiales (revenu moyen par famille, taille de l'exploitation, ...). A partir de cette classification, le modèle socio-économique détermine pour chaque type de RMU les activités qui sont entreprises en fonction des ressources disponibles (eau, sol, travail et capital). Afin de simuler cette prise de décision, le modèle utilise une fonction d'optimisation du profit des RMU. Les agents RMU sont donc supposés avoir une connaissance pleine et parfaite de leur environnement et des moyens pour parvenir à un revenu maximum. Nous reviendrons sur cette approche par la suite.

b) Un modèle multi-objectifs d'occupation de l'espace

Dans le cadre de l'aménagement durable du territoire des pays européens, un outil de gestion basé sur la programmation linéaire multi-objectifs a été développé par un centre de recherche allemand en aménagement du territoire⁹ (Zander et al., 1999).

MODAM est un outil d'analyse économique. Son utilisation se déroule en trois étapes :

- A partir d'un scénario qu'il veut tester, l'utilisateur détermine les données et critères qui doivent être entrés dans le modèle ;
- MODAM calcule alors une série de solutions possibles en fonction de divers objectifs prédéfinis et présente les résultats sous forme de fonctions d'utilités et de courbes économiques synthétiques ;
- L'utilisateur dispose alors d'outils pour l'analyse lui permettant d'avoir une vision synthétique des conséquences du scénario choisi.

Le modèle comporte différents modules. Il intègre tout d'abord une large base de données correspondant aux différents systèmes de la thématique étudiée (production végétale, élevage, exploitation agricole, paramètres environnementaux, économie). Ces données et les paramètres entrés par l'utilisateur, alimentent le cœur du modèle, qui est un module de programmation linéaire multi-objectifs. Ce dernier calcule de manière séquentielle, une série de solutions optimum en utilisant la méthode des simplexes. Ces solutions correspondent en fait à l'ensemble des optimums possibles lorsque l'on fait varier le paramètre à maximiser (l'objectif). Les résultats sont présentés à l'aide de diverses courbes économiques dont notamment une courbe comparative indiquant de combien un objectif doit être sacrifié pour pouvoir satisfaire à un autre objectif (trade-off function).

L'une des forces de MODAM vient de sa rapidité de calcul. Il permet à l'utilisateur de simuler des scénarios de façon pratiquement instantanée, ce qui rend son utilisation interactive. Cet outil de gestion est donc un outil d'analyse économique ayant une grande souplesse d'utilisation et donnant des solutions quantitatives exactes. A la vue de cette raide présentation le lecteur comprendra facilement que ce type d'outil plutôt destiné à des chercheurs maîtrisant bien les concepts économiques .

⁹ Centre for Agricultural Landscape and Land Use Research (ZALF)

c) Un SAD dédié aux systèmes de cultures rizicoles Thaïlandais

Un SAD dédié à l'évaluation de scénarios de cultures de riz dans les plaines thaïlandaises a été développé par des chercheurs de l'université d'agriculture de Chiang Mai en Thaïlande (Jinrawet, 1995). Le système comporte deux modules : un modèle de culture de riz et un outil analytique permettant d'évaluer des scénarios de culture.

Le modèle de culture est un modèle mécaniste qui calcule le rendement d'une culture de riz à partir des différents choix agronomiques réalisés. Ainsi, outre les données climatiques du type pluie et ensoleillement, le modèle prend en compte des paramètres agronomiques comme la variété de riz, la date de semis, l'apport azoté, la densité du semis ou encore l'apport en eau d'irrigation. A partir de ces données le modèle de culture estime le poids de mille grains et le nombre de grains obtenus lui permettant ainsi de calculer le rendement de la culture.

L'outil analytique du SAD permet à l'utilisateur d'entrer dans un premier temps le scénario choisi. Il s'agit de scénarios du type : « quelle sera mon rendement si j'applique telle dose d'engrais ou si je réalise une pré-culture d'arachide ? ». Le module présente ensuite les résultats obtenus par le modèle de culture. Pour cela, et afin d'offrir à l'utilisateur une vue synthétique mais précise des résultats, le SAD présente les rendements obtenus en fonction de leur probabilité de distribution ou à l'aide de moyennes et d'écart types. Des outils parallèles permettent également de transcrire les rendements en quantité de biomasse ou en résultat financier. Enfin des graphiques et des diagrammes de choix (ou arbres de décisions) sont générés.

Ainsi, ce SAD très simple permet d'assister les agriculteurs dans leurs choix. Ces derniers peuvent examiner des stratégies alternatives qui demanderaient plusieurs mois si elles étaient testées au champ. Par ailleurs, l'interface du système et les différents types de présentation des résultats facilitent l'évaluation par les agriculteurs des stratégies qu'ils souhaitent tester.

2.1.3 Les Systèmes Multi-Agents

a) Définitions

Les définitions des SMA sont nombreuses et varient suivant les champs d'applications. Afin d'introduire les SMA dans un cadre relativement général, Bousquet (Bousquet et al., 1995) donne la description suivante :

«Pour modéliser des phénomènes complexes, les systèmes multi-agents représentent les agents du monde observé et leurs comportements. Élaborer un système multi-agents revient à reproduire un monde artificiel ressemblant au monde observé en ce sens qu'il est composé de différents agents, de façon à y mener diverses expériences. Chaque agent est représenté comme une entité informatique dotée d'une autonomie, capable d'agir localement en réponse à des stimulations ou à des communications avec d'autres agents et de se représenter son environnement.»

Par ailleurs, l'un des objectifs de la « kénétique », la science des organisations artificielles qui procède par construction de Systèmes Multi-Agents (Ferber, 1994), est de:

«Définir une forme de systémique qui prenne en compte l'interaction entre agents agissant comme l'élément premier pour comprendre le fonctionnement et l'évolution des systèmes ».

Ainsi, l'agent est placé au centre du système. De l'interaction entre les agents (communications, influences, négociations), et entre les agents et leur environnement, naît la complexité du système et son comportement global. C'est la notion d'émergence, qui est l'un des fondements de la modélisation individu-centré.

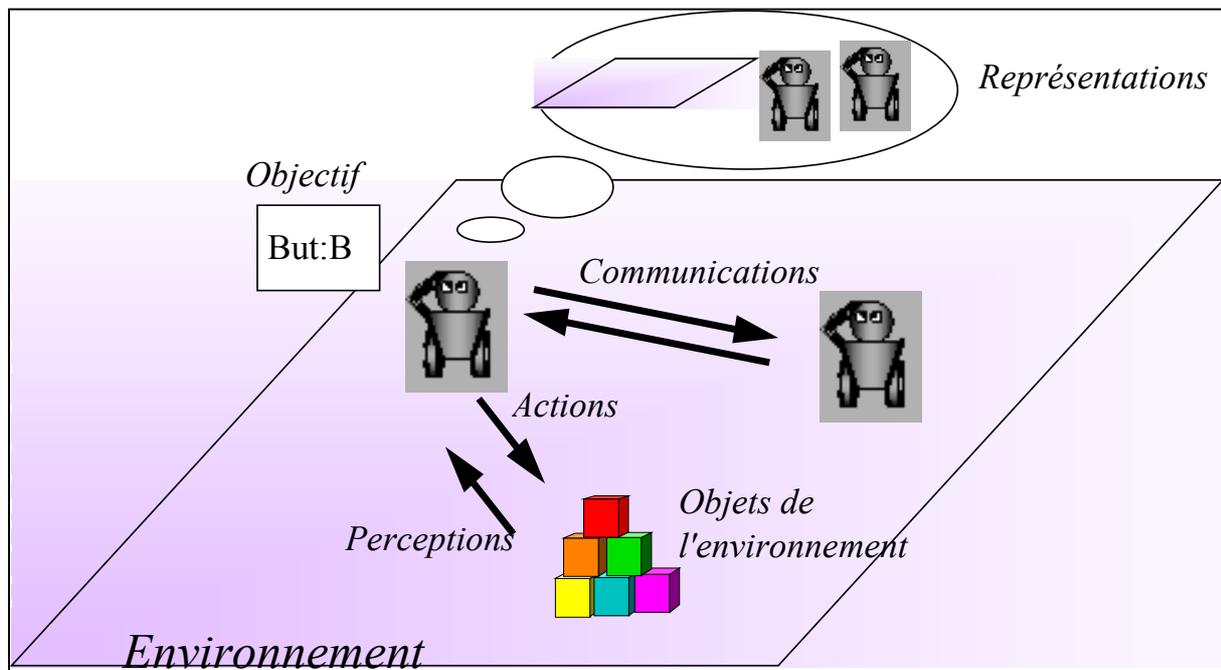


Figure 11 : Représentation imagée d'un système multi-agents (d'après Ferber, 1995)

Par rapport à la problématique qui est étudiée dans ce mémoire, l'utilisation de SMA permet donc d'étudier et de comprendre le fonctionnement de la gestion de l'eau tout en prenant en compte les interactions du système comme celles qui existent entre l'amont et l'aval du bassin. Par ailleurs, les SMA peuvent également servir à explorer l'évolution des systèmes et les conséquences de scénarios prospectifs.

La construction d'un SMA passe par une phase de conceptualisation où les composantes du système sont formalisées par les éléments suivants (Ferber, 1995) :

- Un environnement E, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
- Un ensemble d'objets o ; ces objets sont situés, c'est à dire que, pour tout objet, il est possible à un moment donné, d'associer une position dans E ; ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers, lesquels représentent les entités actives du système.
- Un ensemble de relations R qui unissent des objets et donc des agents entre eux.
- Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de o.

- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification.

b) SMA et usages des ressources naturelles

L'action d'agents peut être envisagée sous différentes formes. L'approche qui est entre autres menée par le programme Espace et Ressources du CIRAD, consiste à modéliser des agents qui perçoivent un environnement et agissent sur celui-ci après avoir délibéré (Figure 12).

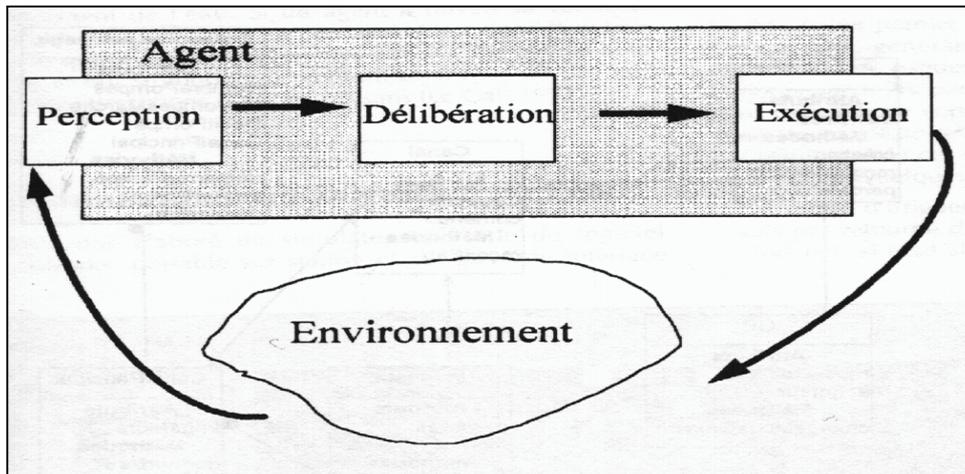


Figure 12 : Cycle perception / action d'un agent (Ferber, 1995)

L'environnement reçoit et intègre les actions des différents agents, et se modifie en fonction. Les agents perçoivent alors un nouvel état de leur environnement et le modifie à nouveau. Dans le cadre de l'application SMA à la gestion des ressources naturelles, l'environnement est représenté par une dynamique de ressources, qui influence les agents (paysans, chasseurs, ou autres) et se trouve modifiée par les actions des agents. Le plus souvent, ces ressources sont distribuées dans un espace hétérogène. On simule alors l'accès des agents à ces différentes ressources et leurs usages.

Bousquet rappelle que «l'usage des ressources renouvelables pose la question de l'interaction de dynamiques écologiques ou bio-physiques et de dynamiques sociales», (Bousquet, 1996). Ainsi, des deux composantes qui caractérisent l'usage des ressources naturelles, aucune d'elles ne peut être envisagées séparément. Dans le cas de systèmes comme celui du bassin versant de Mae Uam, la dynamique bio-physique est la composante hydrologique qui génère du ruissellement. De son côté, la dynamique sociale est constituée par les activités agricoles, la gestion des périmètres irrigués ou encore les activités liées aux travaux non-agricoles. L'approche du programme Espace et Ressource dans ce type de système est de se positionner au niveau de l'interaction des dynamiques, et ce à l'aide de SMA, considérés comme une approche interactive de la modélisation des systèmes (Ferber, 1995). Ainsi, pour revenir au cas thaïlandais, l'interaction est constituée d'une part par les usages de la ressource en eau (ceci reflète les effets de la dynamique sociale sur la dynamique bio-physique) et d'autre part par les décisions des irrigants en fonction de la disponibilité de la ressource (cela constitue l'influence de la dynamique bio-physique sur la dynamique sociale). Par ailleurs, comme le souligne la phrase précédente, « les recherches sur l'usage des ressources renouvelables, posent les problèmes de l'accès à ces ressources, des modes d'appropriation et des processus de décision », (Bousquet, 1996). En modélisant des agents dans lesquels il est possible de représenter des

processus de prise de décision et une vision de l'environnement, les SMA peuvent apporter des solutions à ces questions.

c) Dans le cadre des SAD

Afin de resituer les systèmes multi-agents dans le cadre des systèmes d'aide à la décision que nous avons vus précédemment, il est important de préciser que l'utilisateur d'un SMA possède un rôle actif dans la démarche de modélisation. Un modèle multi-agents est un laboratoire miniature dans lequel le modélisateur teste des scénarios, change des paramètres, déplace des individus. Par l'exploration du fonctionnement du modèle, l'utilisateur évolue dans sa compréhension du système réel. Ainsi, la simulation multi-agents, plus que les approches citées au §2.1.2, ne se contente pas de l'implémentation d'un modèle puis de l'analyse de la réponse de ce modèle en fonction de scénarios. Elle participe au processus de recherche du fonctionnement des systèmes naturels (Ferber, 1996). Cette démarche a d'ailleurs incité les utilisateurs des SMA à procéder à des aller-retours successifs entre le modèle et le système réel, notamment au travers de l'utilisation de jeux de rôle (Barreteau, 1998).

Par ailleurs, au même titre que les SAD, les SMA ont la capacité d'intégrer divers types d'outils comme par exemple des fonctions mathématiques du même type que celles vues au §2.1.1.

2.1.4 Discussion

Au fil des différents chapitres précédents un bref aperçu a été donné de quelques exemples de SAD utilisant diverses méthodes ou outils de calcul. Certains de ces systèmes reposent sur des hypothèses fortes n'étant pas toujours en adéquation avec les systèmes réels. Par exemple, le SAD du projet IWRAM suppose que les agents du système perçoivent leur environnement de manière pleine et parfaite, alors que ce n'est pas le cas dans la plupart des systèmes faisant intervenir les facteurs humains (Moison, 1997). Par ailleurs, d'autres SAD comme celui cité au §2.1.2c), se contentent de fournir à un modèle, une interface, parfois interactive, permettant de présenter les résultats du modèle de manière synthétique. Enfin, des modèles comme MODAM, dédiés à l'aménagement du territoire en Europe, constituent des outils puissants pour l'analyse des systèmes mais ne restent qu'à la portée d'experts ayant un bagage scientifique adéquat, et sont difficilement utilisables par les non-experts sans une initiation préalable aux champs disciplinaires concernés.

En outre, comme nous l'avons vu plus haut, chaque catégorie d'outil a une utilité propre qui peut entrer comme composante d'un SAD. Ainsi, les modèles statistiques cherchent plus à quantifier les relations qu'à les comprendre. Or, l'objectif que nous recherchons dans cette modélisation tient plus de l'exploration d'un système et de la concertation entre les acteurs locaux. C'est pourquoi cette première catégorie d'outil semble peu adaptée à notre problématique. Par ailleurs, ce même objectif de modélisation implique que notre approche sera celle des modèles de simulation et non celle des modèles d'optimisation. Nous ne cherchons pas à résoudre un problème de gestion de ressources mais à le simuler afin d'en discuter. Les systèmes experts qui sont plus dédiés aux diagnostics et à la résolution de problèmes d'expert ne nous semblent alors pas adéquats. Enfin, comme nous l'avons déjà indiqué, l'approche systémique en elle-même n'est pas réellement dédiée à la simulation puisqu'elle n'est pas dynamique.

Finalement le choix parmi les outils que nous avons présentés ici doit s'effectuer entre les modèles mathématiques et les SMA. Contrairement à ce que l'on pourrait croire dans un premier temps, les modèles mathématiques ne sont pas forcément des modèles d'optimisation. En effet, on peut les utiliser pour simuler des scénarios virtuels, puis modifier les paramètres et simuler à nouveau. Nous en avons vu des exemples dans le §2.1.2. De plus, les deux outils modélisent les processus internes d'un système.

Cependant, les paramètres d'un modèle mathématique sont parfois peu explicatifs et ne correspondent pas à une réalité de terrain. Dans ce type de cas, la modélisation mathématique n'est plus adaptée à notre travail de recherche. En effet, pour que le modèle puisse être utilisé en support à la discussion et à la négociation, il faut qu'il soit un minimum représentatif de la réalité. Et ce, afin que les acteurs puissent retrouver une image de leur système dans le modèle. Nous n'avancions pas ici le fait que le modèle est une copie de la réalité mais simplement qu'il doit être un support suffisant pour que les acteurs locaux puissent l'accepter en tant que représentation virtuelle de leur système et ainsi s'en servir pour discuter et négocier. De plus, outre la représentativité des paramètres, la rationalité des agents et la façon dont s'opère les décisions sont très importantes. Or, les modèles mathématiques et les SMA n'utilisent pas les mêmes théories en matière de rationalité et de décision. Ces questions seront traitées au §2.2.4, mais nous les utiliserons dès à présent pour effectuer notre choix entre les deux types d'outils.

Les modèles mathématiques de part leur nature, codent les processus de décisions à l'aide de fonctions mathématiques. Alors qu'il est aisé de représenter une rationalité étendue et une fonction d'optimisation de cette façon, il en va tout autrement pour des concepts de rationalité plus complexes. En effet, le langage mathématique arrive à transcrire des interactions, positives ou négatives (externalités pour les économistes), qui peuvent exister entre les différents usagers. Mais il se heurte à des concepts tels que la limite de perception d'un agent ou encore la négociation dans le choix d'un agent qui fait appel à la communication.

De leur côté, les SMA sont basés sur un langage informatique, pour la plupart orienté objet. Celui-ci permet par exemple de construire au niveau des agents différentes représentations de l'environnement qui seront des objets de ce langage. De plus, la programmation permet aux agents de s'envoyer des messages et donc de communiquer. Ainsi, les SMA arrivent à s'adapter à des notions de rationalité et de décisions assez complexes. Ce qui, par ailleurs, ne les empêche pas d'adopter des fonctions d'optimisation puisqu'ils peuvent intégrer, en leur sein, des modèles mathématiques. Néanmoins, des modèles de décisions trop complexes, peuvent également présenter certaines limites (Kirman, 1997).

Ainsi, et à la lumière des différents points évoqués plus haut, les SMA semblent être la catégorie d'outil la mieux adaptée pour modéliser le terrain d'étude et traiter sa problématique.

2.2 Démarches et méthodes

Au vu des chapitres §1.6.4 et §2.1.4, la nouvelle problématique du mémoire est :

Comment aider les acteurs locaux et institutionnels à gérer au mieux la ressource en eau dans un contexte conflictuel, à l'aide d'une démarche basée sur l'utilisation des SMA ?

Nous allons à présent donner les orientations et la méthodologie qui nous semblent être les mieux adaptées à cette problématique.

2.2.1 Le cadre de la modélisation

a) Une vision par les Acteurs

La modélisation que nous nous proposons d'utiliser pour répondre à notre problématique est orientée vers un usage auprès des acteurs du bassin versant considéré. Nous entendons ici par acteurs du bassin versant, les personnes qui vivent le conflit ou qui en sont la source. Ce sont donc les agriculteurs eux mêmes ainsi que les gestionnaires de canaux et les chefs de villages mais également les services d'extension qui côtoient quotidiennement ces acteurs et qui les conseillent.

D'autres approches comme celle du SAD de l'IWRAM, sont plus orientées vers les décideurs ou les gestionnaires de ces bassins versant. En ce qui concerne les conflits de gestion de ressources naturelles, ces personnes sont en mesure de prendre des décisions stratégiques, de donner des orientations ou de définir des règlements et des lois et de les faire appliquer (ou du moins d'essayer !).

Néanmoins, nous pensons que cette approche n'est pas la mieux adaptée dans des cadres conflictuels. Nous prenons l'hypothèse que le problème doit être résolu à sa base et que c'est aux acteurs du terrain de le résoudre. D'autres pourront certainement estimer qu'un gestionnaire, puisqu'il a une vision plus large, est mieux placé pour résoudre le conflit ou bien qu'un tiers ayant une position neutre sera plus à même de choisir une solution équitable. Cependant des exemples d'utilisation du même type de démarche que nous envisageons, ont montré que les acteurs d'un système étaient réceptifs à ce type de modèle ou à des jeux de rôle. C'est ce que nous allons voir dans le chapitre qui suit.

b) La démarche Concertation/Négociation

La démarche concertation/négociation est le prolongement de la vision par les acteurs pour laquelle nous avons opté. En effet, ayant supposé que les acteurs du terrain devaient résoudre leur conflit par eux mêmes, nous prenons une deuxième hypothèse : nous supposons que le conflit pourra être résolu au travers d'une démarche de concertation entre les acteurs, leur permettant de mieux se comprendre et de s'entendre sur les concessions à faire. Bien d'autres solutions seraient certainement envisageables, cependant c'est la voie que nous choisissons ici.

Le rôle que nous nous proposons de jouer dans cette démarche est celui d'un facilitateur proposant un outil qui permet d'aider les différentes parties du conflit à se mettre d'accord. CatchScape, le modèle créé et utilisé au cours de ce mémoire, est l'outil que nous proposons et il est dédié à devenir un outil d'aide à la négociation.

Le principe de l'aide à la négociation à l'aide de simulations multi-agents est encore à ses débuts. Néanmoins les quelques expériences qui vont dans ce sens ont permis d'en donner les contours. Tout d'abord, les SMA visant la négociation doivent

constituer des outils de médiation entre les acteurs (Bousquet et al., 1999). Plus précisément et dans le cadre de la gestion d'une ressource naturelle commune, un SMA utilisé en aide à la négociation peut être envisagé comme un objet de médiation permettant aux usagers de la ressource de se mettre d'accord sur une représentation commune du système ressource/usage, facilitant alors la communication autour de cette ressource (Barreteau et al., 2001).

Ainsi, le modèle devient un média, une clé d'entrée dans la négociation, un moyen de communication entre des acteurs n'ayant, à la base, pas la même vision de leur environnement. Ce média peut être le SMA dans sa version informatique, comme dans le cas du modèle SelfCormas qui a été utilisé au Sénégal sur une question d'allocation de l'espace mettant en conflits des éleveurs et des agriculteurs (Bousquet et al., 2001 ; Lynam et al., 2001). Mais le SMA peut également prendre la forme d'un jeu de rôle, comme c'est le cas du jeu SAMBA appliqué au Vietnam (Castella et al., 2001). Dans le cas du modèle conceptuel SHADOC, développé pour explorer la viabilité des périmètres irrigués du fleuve Sénégal (Barreteau et al., 1999), plusieurs types de média, d'artefact du modèle conceptuel, ont été utilisés. Un premier modèle informatique fut développé pour explorer et comprendre le système, puis à partir de ce modèle, un jeu de rôle a été créé afin d'ouvrir le modèle, de communiquer son contenu, aux usagers des périmètres concernés, enfin une version informatique simplifiée a été réalisée permettant aux usagers d'explorer des scénarios d'évolution ou de tester des hypothèses sur leur système (Barreteau et al., 2001).

Cependant si l'on veut qu'un SMA ou un jeu de rôle soit utilisé par des acteurs pour leurs négociations, il paraît nécessaire que l'outil soit fiable. Des oublis ou des erreurs de représentation peuvent désorienter la discussion ou fausser la vision des acteurs sur leur système ce qui peut alors aggraver le conflit au lieu de le résoudre. Il est donc nécessaire qu'un accord, entre les usagers, soit donné au préalable sur le modèle et sa représentation des dynamiques du système. Pour cela, Barreteau et al. proposent une méthodologie permettant de légitimer les modèles multi-agents à l'aide de jeux de rôle (Barreteau et al., 2001). Ces derniers servent à ouvrir la boîte noire que constitue le SMA afin d'en décrire le contenu aux utilisateurs qui pourront alors le rejeter, l'améliorer ou l'adopter. Lorsque le modèle est légitimé, il peut alors être utilisé dans le processus de négociation soit sous sa forme SMA soit sous sa forme jeu de rôle.

2.2.2 Démarches de modélisation

Trois orientations ont été données à la modélisation de CatchScape : la démarche individu-centré avec sa notion d'agent utilisée dans les SMA, une approche intégrée du système modélisé et du modèle, et enfin le choix du bassin versant comme niveau d'échelle de représentation. Étant donné que le premier point a été mentionné et justifié à plusieurs reprises lors de la présentation des SMA, nous ne l'aborderons pas de nouveau et commençons directement par la deuxième orientation.

a) Nécessité d'une représentation intégrée

Dans un ensemble (A, B et C), les sous systèmes A, B et C peuvent être en interaction les uns avec les autres. C'est pourquoi, lorsque l'on veut étudier le sous-système A, il est préférable de prendre en compte les sous-systèmes B et C. Cependant, dans certains cas, il est possible de considérer les sous-systèmes B et C comme des externalités tout en continuant à les prendre en considération. B et C sont alors des variables d'état agissant sur A aux moyen de contraintes ou de règles. Néanmoins, dans les cas où les interactions entre A, B et C deviennent complexes, nombreuses et omniprésentes, la représentation de B et C sous forme d'externalités n'est plus

suffisante. Il devient alors nécessaire de modéliser l'ensemble des sous-systèmes, dans leurs dynamiques et leurs interactions, pour n'en étudier qu'un seul. Ce dernier est d'ailleurs généralement représenté avec d'avantages d'attention et de précision étant donné que l'utilisateur du modèle se focalisera par la suite sur celui-ci. C'est cette démarche qui est utilisée dans notre approche pour définir un modèle intégré. Une représentation intégrée est alors la conceptualisation d'un système en sous-ensemble, au même titre que l'approche systémique, et la formalisation de ces sous-ensemble et de leurs liens de façon à pouvoir en étudier un ou plusieurs. Comme nous l'avons vu lors de la description du cas d'étude, la gestion de l'eau dans le Mae Uam est l'une des composantes du système dans son ensemble. Ce dernier est en effet constitué d'autres sous-systèmes comme les pratiques culturelles, l'exploitation agricole, l'élevage, ou encore les activités para-agricoles. Tous ces sous-systèmes sont en interaction les uns avec les autres ainsi qu'avec la dynamique hydrologique de la ressource en eau. Or, ces interactions sont nombreuses et complexes ce qui nous amène à choisir dans le cadre de cette recherche et pour la construction du modèle, une démarche intégrée. Ce type de situation amenant à choisir des modèles intégrés est fréquent en gestion des ressources naturelles et a été montré par bien des auteurs (Cox, 1996 ; Moisdon, 1997). Plus spécifiquement pour les problèmes de gestion de la ressource en eau, Simonovic (Simonovic, 2000) soutient également la nécessité d'adopter une approche intégrée pour la construction de modèle.

b) Représentation à l'échelle du bassin versant

Au regard des considérations du chapitre précédent, si l'on veut explorer la gestion de l'eau dans le bassin versant du Mae Uam, il est alors nécessaire de représenter l'ensemble du système. Mais quelle est l'échelle de ce système ?

Tout d'abord, il va de soi que le modèle doit représenter les périmètres irrigués du bassin. Plus précisément, il doit en représenter au moins deux, puisque nous cherchons à étudier l'interaction entre les périmètres amont et aval. Par ailleurs, puisque nous représentons les exploitations agricoles (modèle intégré oblige), il nous faut également représenter les systèmes qui entrent en interaction avec ces dernières. Le problème est alors de savoir quand s'arrête l'intégration. Bien entendu, il n'existe pas de règles universelles à ce sujet et chaque cas amène sa propre échelle de représentation. La logique veut que l'on représente les systèmes qui sont en interaction forte avec la problématique étudiée et que l'on délaisse ceux qui n'interagissent que faiblement. Mais comment mesurer et quantifier la « force » d'une interaction ? Il nous a alors fallu prendre des hypothèses sur les systèmes et leur degré d'influence sur la gestion de l'eau. Ce travail s'est par ailleurs grandement appuyé sur les connaissances de plusieurs experts du terrain considéré.

Ainsi, de par les activités des exploitations agricoles, il est apparu qu'il était nécessaire d'intégrer les zones d'agriculture pluviale comme source de revenu et consommatrice de capital et de travail. Par ailleurs, dans le cas du Mae Uam, la forêt n'a que peu d'influence sur la gestion, ou du moins elle n'en a pas encore¹⁰, alors que dans des bassins versants voisins, notamment le bassin du Mae Yort, la forêt est partie intégrante de la problématique. Ainsi, il n'apparaît pas forcément nécessaire de représenter les surfaces forestières. Néanmoins, comme nous le verrons dans la

¹⁰ La pression sur la forêt et la déforestation qui sont sources de déséquilibres hydrologiques et d'érosion, ne sont pas très importantes dans le bassin (comparativement aux bassins voisins). Cependant, une évolution vers la diminution de la surface forestière est tout de même constatée depuis une quinzaine d'années. Il se pourrait ainsi que la dynamique forestière devienne un enjeu important dans le Mae Uam à l'avenir.

section suivante, nous les avons représentées. Ce choix provient du souci de laisser au modèle la capacité d'évoluer par la suite vers des simulations intégrant les problématiques forestières, soit dans la perspective d'utilisation du modèle pour d'autres bassins versants où la forêt joue un rôle clé, soit dans le cadre de scénarios prospectifs d'évolution du Mae Uam vers des problèmes de ressource forestière. Le troisième système qui a été intégré à CatchScape est le travail non-agricole qui est une importante source de revenu pour les exploitations. De même, les marchés agricoles pour la vente des productions sont également des composantes à intégrer. Cependant, pour le travail non-agricole et les marchés d'échanges, leur intégration est relativement limitée étant donné leur interaction, tout de même, indirecte sur la gestion de l'eau. Ainsi, nous n'avons pas défini de marché du travail non-agricole, comme nous n'avons pas intégré un réel marché agricole mais uniquement une évolution prédéfinie des cours des produits vendus dans le système. Le dernier système dont l'intégration se justifie est la dynamique foncière des exploitations permettant à ces dernières de s'agrandir et de se modifier, ce qui va alors changer leur choix et leur influence sur la ressource en eau.

Les composantes du système que nous venons de décrire ne forment bien entendu pas la totalité du système bassin versant. D'autres dynamiques existent dans le bassin versant du Mae Uam, comme par exemple la cueillette, les pratiques religieuses ou encore la production fruitière. Mais ces dernières ne sont plus connectées, ou du moins pas suffisamment, à la gestion de l'eau des périmètres irrigués, et ne trouveraient pas leur place dans cette modélisation. Étant donné que tous les éléments du bassin versant ne sont pas intégrés, peut-on réellement parler d'une modélisation à l'échelle du bassin versant comme l'indique le titre de ce chapitre ? Certains diraient que l'appellation est abusive et qu'il s'agit plutôt d'une représentation étendue à l'échelle de plusieurs périmètres irrigués. La question ne se situe pas en fait à ce niveau. Par échelle du bassin versant nous entendons en fait que le modèle intègre un ensemble de systèmes que l'on trouve à l'échelle des bassins versants, et un ensemble de périmètres irrigués qui forment le réseau hydraulique du bassin versant.

Enfin, l'échelle du bassin versant du point de vue hydrologique implique que le modèle intègre les processus hydrologiques propres à cette échelle ; à savoir, la production de ruissellement à partir de la pluie brute, puis le transfert de ce ruissellement vers l'exutoire du bassin. Les modèles hydrologiques de bassin versant intègrent également, lorsque les périodes simulées sont suffisamment longues (à l'échelle du mois), les processus de drainage et de transfert lent de l'eau souterraine et des nappes vers l'exutoire. Comme nous le verrons par la suite, le modèle CatchScape dans sa version actuelle s'arrête à la fonction de production et ne comporte pas de fonction de transfert. Ainsi le processus hydrologique du bassin versant n'est représenté qu'à moitié. De ce point de vue hydrologique, dire que CatchScape fonctionne à l'échelle du bassin versant est donc abusif.

Par ailleurs, comme le modèle a une échelle spatiale, il possède également une échelle temporelle qui définit la durée simulée dans laquelle le modèle reste valide. Nous n'entrerons pas tout de suite dans les détails, cependant il est important de savoir dès à présent que l'échelle temporelle choisie est de l'ordre de la décennie.

La modélisation de la gestion des ressources naturelles à l'échelle du bassin versant n'est pas rare en elle-même. De multiples modèles fonctionnent à cette échelle dont notamment le SAD de l'IWRAM. Par contre cette même modélisation réalisée à partir de modèle individu-centré, comme les SMA, est moins fréquente. L'un des tous premiers modèles fut certainement celui développé par Lansing & Kremer (Lansing et al., 1994) sur la gestion de l'eau dans les subaks balinaïses (partie d'un bassin versant)

en Indonésie. Les agents n'étaient pas alors à proprement parler des individus-hommes mais des unités de gestion qui dans le contexte balinais et à l'échelle considérée sont des temples liés à l'eau. Le modèle SHADOC (Barreteau et al., 2000), quant à lui, représente des problèmes de gestion de la ressource en eau à l'échelle du périmètre irrigué. Par contre le modèle SINUSE (Feuillette, 2001), développé pour étudier l'usage de la ressource d'une nappe phréatique en Tunisie, fonctionne à une échelle plus large. En effet, il intègre les dynamiques de plusieurs villages et différents niveaux d'agrégation des usages de la ressource en eau. De même, un modèle multi-agents actuellement en construction par le projet européen FIRMA travaille à l'échelle de bassin de rivière¹¹. Ainsi, la recherche en matière de SMA appliquée à la gestion de la ressource en eau avance doucement vers des échelles de représentation de plus en plus larges et complexes et nous espérons, par l'apport de ce modèle, y contribuer en partie.

2.2.3 Cormas, une plate-forme de simulation multi-agents

Les travaux de l'équipe Espace et Ressource (anciennement GREEN) du CIRAD¹² ont, entre autres, abouti à une plate-forme de simulation sur laquelle il est possible de créer des modèles de simulation (Bousquet et al., 1998). Cette plate-forme intitulé Cormas, est un logiciel de simulation multi-agents appliqué à la gestion des ressources renouvelables.

Cormas créé sous l'environnement Visual-Works, est programmé en Small Talk, l'un des tous premiers langages objet. Small Talk est également le langage de programmation des modèles développés sous la plate-forme. Cormas assiste le modélisateur dans la programmation de son modèle à l'aide d'une architecture prédéfinie. La programmation des règles, des interactions et des dynamiques qui constituent le modèle est entièrement laissée au soin du modélisateur. Cela permet d'élargir les possibilités de description du système au champ des processus complexes.

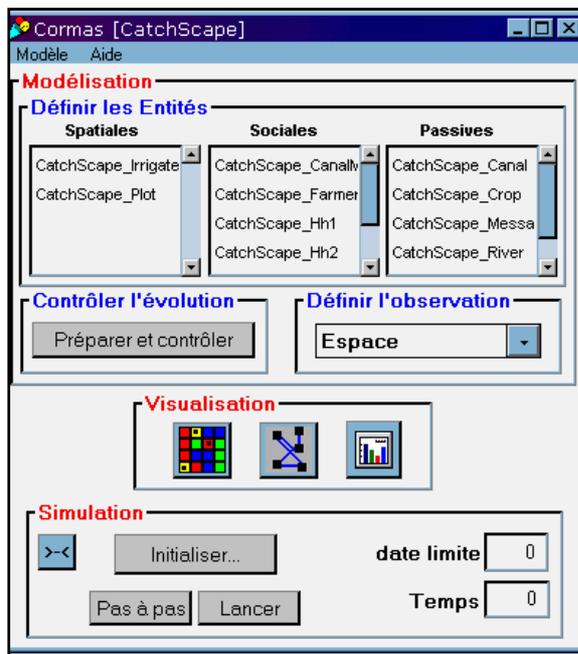


Figure 13 : Interface principale de Cormas

¹¹ voir le site électronique <http://www.cpm.mmu.ac.uk/firma/>

¹² voir le site électronique <http://cormas.cirad.fr>

L'interface du Cormas donne accès à trois modules (Figure 13) :

- Un premier module permet de définir les entités du système à modéliser, que l'on appelle des agents informatiques, et leurs interactions. Ces interactions s'expriment par des procédures de communication directe (envois de messages), et/ou par le fait plus indirect de partager le même support spatial.
- Le second module concerne le contrôle de la dynamique globale (ordonnancement des différents événements d'un pas de temps du modèle).
- Un troisième module permet de définir une observation de la simulation selon des points de vue. Cette fonctionnalité autorise l'intégration, dans le processus de modélisation, des modes de représentation.

2.2.4 Eléments de réflexion sur la représentation des agents

Il existe de multiples façons de représenter les acteurs d'un système. Nous avons pris le parti de les représenter sous la forme d'agents autonomes munis de règles, de stratégies et de protocoles de décision. Toutefois, les possibilités sont nombreuses et diverses. Afin de donner un cadre à la définition de ces agents et à leurs procédures, nous avons voulu présenter dans ce chapitre les grandes tendances des quelques éléments utilisés dans les SMA, et la modélisation individu-centré en général, pour définir les agents. Les points qui sont abordés sont ceux qui nous paraissent importants dans le cadre de cette modélisation.

a) Types et complexités des agents

Concernant les agents eux-mêmes, différents niveaux de complexité existent. On parle tout d'abord d'agents réactifs lorsque l'on considère des agents dont les actions sont conditionnées par les stimulus qu'ils reçoivent de leur environnement. Ces agents ne sont pas à proprement parler intelligents, néanmoins leurs utilisateurs montrent qu'il émerge de leurs interactions un comportement global intelligent (Deneubourg et al., 1991 ; Ferber et al., 1992). Ce type d'agent a par exemple été utilisé pour modéliser le comportement d'une fourmilière à partir de robots-fourmis (Drogoul et al., 1995). Néanmoins, lorsqu'il s'agit de représenter des humains et leurs comportements, la plupart des modélisateurs se tournent vers des agents de type cognitif.

La définition des agents cognitifs est plus délicate étant donné leur diversité. Ferber (Ferber, 1994) propose trois points qui les distinguent des agents réactifs. Tout d'abord, leur capacité à expliciter des plans et à accomplir des buts qui fait d'eux des agents intentionnels ; d'autre part leur capacité à raisonner qui leur permet d'être relativement autonomes par rapport aux autres agents ; et enfin une capacité d'anticipation et de planification qui leur permet d'optimiser leurs comportements. Dans le cas des agents cognitifs nous avons donc affaire à des décisions réfléchies. Cependant, la représentation de la cognitivité des agents peut vite devenir complexe et constitue parfois un but en soi. La limite vient alors du nombre de paramètres définissant le comportement de la dynamique sociale. Chaque nouveau paramètre rend plus difficile la compréhension du modèle et l'interprétation des simulations. C'est pourquoi Grimm (Grimm, 1999) retient comme l'un des principes de la modélisation individu-centré une représentation qui soit la plus simple possible. A ce sujet, Conte et Castelfranchi (Conte et al., 1995), proposent, pour éviter l'usage d'agents trop cognitifs dans les SMA, de mettre en place des normes sociales comme une contrainte spécifique au système, situées au niveau de l'environnement, ou d'un objet à part entière.

b) Les processus de décision des agriculteurs

La représentation d'agents cognitifs implique la simulation de processus de décision. Cette question est intimement liée à la rationalité des agents qui consiste à rendre logique et conforme à la raison, les décisions prises par les agents. La rationalité étendue (ou rationalité substantive) issue du courant de la micro-économie considère que le choix d'un agent est le résultat d'une fonction d'optimisation économique. Par ailleurs elle suppose que les agents sont omniscients et ont une connaissance pleine et parfaite de leur environnement. Celle-ci est souvent simulée à l'aide d'une fonction de maximisation du profit des agents, comme c'est le cas dans le DSS de l'IWRAM, ou encore par des fonctions d'utilité. A ce sujet, Courbon (Courbon, 1982) souligne le caractère réducteur d'une telle approche, l'illusion que constitue la notion d'optimum et sa limitation face à la complexité grandissante des problèmes rencontrés. Par la suite le développement de cette approche a donné naissance à la théorie de la rationalité limitée, ou rationalité procédurale (Simon, 1957). Les limites de la rationalité portent sur trois points: l'incertitude quant aux occurrences, l'information incomplète et les limites cognitives des agents. Ainsi, dans le cas de la rationalité substantive, on peut procéder à des prédictions à partir des seules données du modèle, les choix des agents ne pouvant être que ceux que le modérateur peut établir, alors que dans l'approche procédurale, il faut faire une distinction entre le modèle et la perception qu'ont les individus du monde réel. Dans les SMA, les agents sont souvent représentés avec une vision incomplète de leur environnement.

Bien d'autres concepts ont été proposés mais nous ne retiendrons ici que ceux qui nous paraissent importants pour notre modélisation. Par exemple, Doran (Doran, 2000) estime qu'un agent est «un mélange de rationalité calculée, de choix émotionnels et de croyance». Par ailleurs, la rationalité adaptative (Darley et al., 1997) considère que les agents font des prédictions sur l'évolution de leur environnement à partir desquelles ils adaptent leurs choix. La décision peut aussi être liée à des processus d'apprentissage. Par exemple, la théorie du «garbage can» (Cohen et al., 1972) suppose que la décision résulte de l'apprentissage des acteurs qui découvrent leurs préférences dans l'action. La notion d'apprentissage a été développée par de nombreux auteurs (Conte et al., 2001 ; Janssen et al., 2000 ; Petit, 1981) et constitue un champ d'étude à part entière.

Enfin, Sébillotte et Soler, (Sebillotte et al., 1990), se sont intéressés aux processus de décision chez l'agriculteur. Ils soutiennent que ces derniers changent leurs objectifs et leurs règles de décision en fonction de leurs bilans de fin de campagne. Ici, la décision se base sur une rétrospective des événements survenus, alors que dans d'autre cas elle est fondée sur une anticipation du futur. D'autres expériences montrent que l'agriculteur tient compte à la fois des résultats passés et de ses expériences et qu'il anticipe le futur par des représentations ou des éventualités. Ainsi, l'agriculteur ne procède pas réellement à des changements de règles mais effectue plutôt des ajustements perpétuels (Maton, 2001).

c) Les processus de négociations

Au même titre que l'apprentissage, la négociation est parfois intégrée au processus de décision des agents en permettant aux contraintes, sur lesquelles les agents basent leurs décisions, d'évoluer (Petit-Singeot et al., 1994). La négociation est alors vue comme un principe d'organisation efficace permettant une meilleure adaptation des agents à leur environnement. Les agents émettent des hypothèses sur leur environnement, qu'ils négocient avec les autres agents via un système de marchandage. Plus précisément, Petit-Singeot représente le protocole de

marchandage de la façon suivante : les agents font tous une proposition, puis évaluent les propositions reçues, proposent éventuellement une nouvelle offre jusqu'à ce qu'un compromis soit trouvé (Petit-Singeot et al., 1994). Les agents peuvent avoir des stratégies de marchandage différentes. Une des difficultés rencontrées dans ce type de protocole, est la grande influence du séquençage qui a été choisi.

Par ailleurs, la négociation qui nous intéresse dans cette problématique concerne la gestion de l'eau entre l'amont et l'aval. Comme le souligne Lansing, ceci est quelque chose de propre aux systèmes irrigués de ce type : « *[It is the] well-known tail-ender problem common to most irrigation systems : the farmers at the tail end of an irrigation system are at the mercy of their neighbors upstream, who control the irrigation flow* » (Lansing, 2000). Or, dans ce genre de cas peut on réellement parler de négociation étant donné que les irrigants aval n'ont rien à offrir en échange. Le processus de négociation qu'on modélise est en quelque sorte unilatéral. Dans le cas d'étude de Lansing à Bali, la négociation était en fait bilatérale car Lansing avait introduit un effet de la zone aval sur l'amont via un problème phytosanitaire sur la culture de riz.

Deuxième Chapitre : Du terrain à la modélisation, description du modèle étape par étape

1 *Représentation de l'espace*

Nous avons choisi de présenter en premier lieu, la façon dont l'espace a été représenté dans le modèle. En réalité, c'est également par cet aspect que la construction du modèle a débuté. En effet, l'espace donne un environnement à nos agents et à leurs dynamiques et il semble donc logique de débiter par là.

1.1 **Une représentation schématique ...**

La méthodologie qui a été adoptée pour construire les représentations spatiales dans le modèle est la suivante : Nous avons d'abord récupéré les informations spatiales des cartes SIG existantes sur le bassin versant du Mae Uam (Premier Chapitre : 1.2), puis ces informations spatiales ont été dégradées et transcrites dans une représentation schématique qui conserve les proportions du bassin.

1.1.1 Intérêt d'une représentation schématique

Une représentation schématique d'un espace est définie dans ce mémoire comme une abstraction traduisant les tendances et les proportions de l'espace considéré sans toutefois en représenter les niveaux de détails les plus fins. Suivant cette définition, les formes et les contours des objets spatiaux n'ont pas besoin d'être respectés. De même, les dimensions exactes ne sont pas reproduites, seules les proportions comptent dans ce type de représentations.

L'intérêt qu'offre ce type de représentation est sa capacité à représenter un environnement sous une forme qui ne trompe pas ses utilisateurs. En effet, le modèle et sa représentation spatiale doivent être perçus comme une représentation de la réalité et non comme la réalité elle-même. Or, les reproductions spatiales telles que les SIG, peuvent parfois être un leurre et ainsi être interprétées comme la réalité alors qu'elle n'en sont qu'une représentation. En ne respectant ni les formes ni les dimensions des objets spatiaux, la représentation de l'environnement devient abstraite et atteint ainsi l'objectif recherché.

Cela a d'ailleurs été démontré lors d'autres expériences. En effet, des modèles multi-agents et des jeux de rôle utilisant le même type de représentation ont déjà été créés dans des problématiques de gestion des ressources naturelles (Lynam et al., 2001), (Castella et al., 2001). Les séances de simulation et de jeu alors menées ont montré que les acteurs des systèmes représentés percevaient tout de suite la différence entre la simulation et le monde réel. Par ailleurs, Barreteau (Barreteau et al., 2001) utilise dans un modèle de périmètre irrigué au Sénégal un type de représentation encore différent. L'archétype de périmètre qu'il représente est également une représentation schématique mais elle n'est pas basée sur un périmètre en particulier mais sur un périmètre type. Ainsi, le modèle est utilisable sur plusieurs périmètres ayant une même problématique.

1.1.2 Unité de surface et taille de la grille

Afin de définir l'unité de surface qui sera représentée dans le modèle nous sommes partis de l'hypothèse que celle-ci devait être l'unité de surface homogène des parcelles du Mae Uam. En effet, comme nous le verrons par la suite, l'unité sociale représentée est l'agriculteur et sa famille, dont éventuellement des membres peuvent participer à l'activité agricole. Or, si nous voulons représenter la gestion de ces agents, il nous faut nous placer à l'échelle de leurs décisions qui se font parcelle par parcelle¹³. L'unité de surface ainsi définie a été fixée à 2 rai (soit 3,200 m²) ce qui correspond à une approximation basse de la surface moyenne des parcelles définies par l'enquête du projet IWRAM. En effet, l'enquête avait révélé une surface moyenne de 2.8 rai par parcelle ; l'écart type étant de 2 rai. Ainsi, en choisissant une surface de parcelle de 2 rai nous sommes plus précis que la surface moyenne et nous arrivons alors à représenter des grandes parcelles mais également une partie des petites parcelles (seuls 20 % des parcelles répertoriées dans l'enquête ont une surface inférieure à 2 rai).

Partant de cette unité de surface, une représentation de l'ensemble du bassin en cellules de 2 rai aurait nécessité plus de 14 000 cellules. Or, par rapport à la complexité du modèle, il n'était pas raisonnable, en termes de temps de calcul avec la plate-forme Cormas, de modéliser autant de cellules. Nous avons donc opté pour une grille à dimensions variables en représentant une partie des cellules correspondantes à la forêt à une échelle 20 fois plus grande (Figure 14). L'autre partie des cellules de forêt a été conservée avec une unité de surface de 2 rai afin que les interactions entre agents et forêt puissent se faire à la même échelle que l'unité de gestion. Ainsi, la grille du modèle représente visuellement une sorte de zoom sur l'espace interagissant avec les agents et constitue en quelque sorte la vision que pourraient se faire les agriculteurs de leur environnement qui n'entrevoient, ou du moins n'utilisent, qu'une partie de la forêt.

Néanmoins, l'application stricte de cette règle posait toujours des problèmes de temps de calcul compte tenu du nombre de cellules à représenter. C'est pourquoi, il a finalement été choisi d'appliquer un ratio de 2/5^{ème} à l'ensemble des paramètres du système. A savoir que, tout en conservant les proportions, nous n'avons représenté que 2/5^{ème} de l'espace du Mae Uam. Ce ratio a également été appliqué au nombre d'exploitations, ainsi qu'aux débits d'entrée du système (voir chapitres suivants).

La grille ainsi définie est un rectangle de 44 cellules de largeur par 45 de hauteur, dont le haut représente l'amont du Mae Uam et le bas, l'aval (Figure 14).

1.1.3 Un espace à plusieurs couches : les cartes du modèle

En dehors de l'attribut de taille, les cellules de la grille portent également des informations concernant l'occupation du sol, la qualité des sols et les périmètres irrigués. Les cartes qui suivent sont les représentations schématiques des cartes vues au Premier Chapitre : 1.2, et qui ont été transcrites dans le modèle. La Figure 15 montre la représentation de l'occupation de l'espace qui a été adoptée. En dehors du fait qu'elle respecte les proportions des différents types d'usages de l'espace (paddy, pluvial et forêt), cette carte reprend quelques caractéristiques morphologiques du bassin qui sont d'une part la forme évasée à l'aval de la zone de paddy, traduisant l'élargissement de la zone de plaine et des périmètres, et d'autre part l'organisation

¹³ Nous entendons ici par parcelle, un casier (sous entendu petit champ), ou un regroupement de casiers, géré de manière homogène dans toute sa surface tant au niveau de la culture mise en place que de la fertilisation, le désherbage et autres travaux agricoles entrepris.

spatiale des parcelles pluviales dont une partie est adjacente aux paddy et l'autre partie est disséminée dans la forêt en petits regroupements de parcelles. La distribution dans le bassin réel du Mae Um des parcelles pluviales reste toutefois beaucoup plus découpée.

Figure 14 : Taille des cellules et dimensions de la grille CatchScape

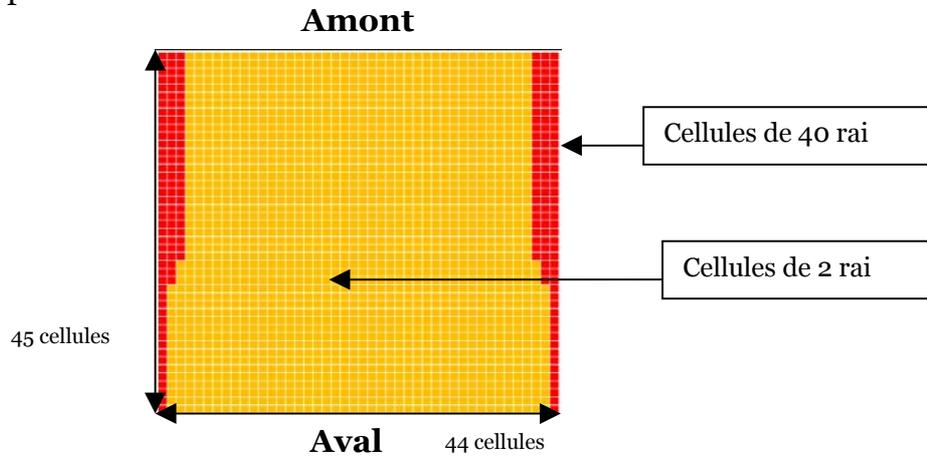


Figure 15 : Vue de l'occupation du sol de CatchScape

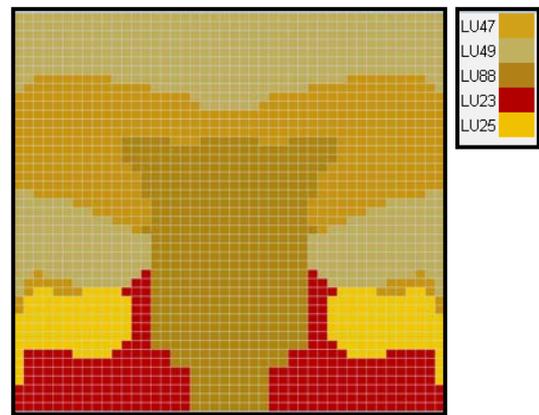


Figure 16 : Vue des qualités de sol de CatchScape

Nous retrouvons dans la Figure 16 la répartition des grands types de qualité de sols avec à l'amont les sols limoneux et à l'aval les sols limoneux argileux. D'autre part les sols LU 45 et LU 47 ont été regroupés en une même catégorie pour des raisons de simplification ce qui ne nuit pas vraiment à la qualité de la représentation puisque leurs caractéristiques sont relativement proches (Tableau 1, page 6) et que la proportion de LU 45 est relativement faible. Il en est de même pour les sols LU 88 et LU 99 ; la deuxième catégorie n'étant que très peu présente dans le Mae Um.

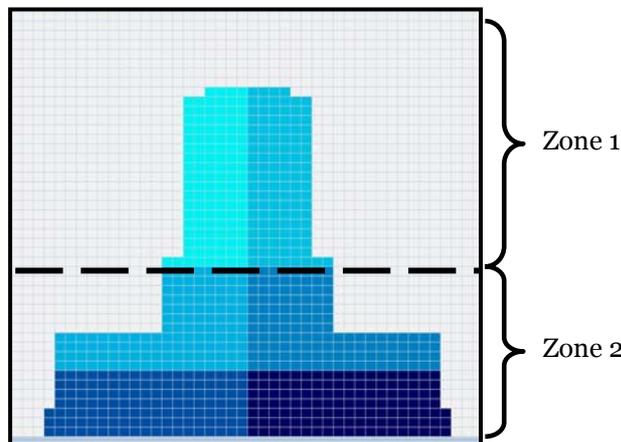


Figure 17 : Vue des parcelles des canaux de CatchScape

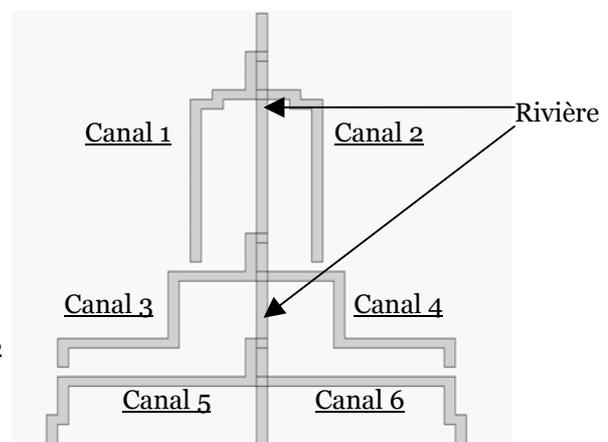


Figure 18 : Vue du réseau hydraulique de CatchScape

Concernant la représentation des périmètres irrigués, plusieurs simplifications ont été apportées par rapport à la description faite au Premier Chapitre : 1.2.3. En premier lieu, nous avons repris la distinction du bassin en deux zones ; la zone 1 étant à l'amont et la zone 2 à l'aval. Par ailleurs, étant donné qu'elle participe aux interactions du système et utilise la ressource en eau du bassin, la zone complémentaire du sud du bassin, a été intégrée à la zone 2. Concernant le nombre de canaux, il a été choisi de ne représenter, dans la zone 2, que quatre canaux parmi les six effectivement présents. En effet, nous avons rassemblé les deux derniers canaux dont la gestion et la zone irriguée sont communes, en un seul canal. De plus, le canal dont la surface irriguée est très petite, n'a pas été représenté. Au niveau, du nombre de parcelles associées à chaque objet canal, une approximation a été effectuée. Alors, que la surface irriguée par canal est légèrement hétérogène dans le système réel (Premier Chapitre : 1.2.3), nous avons associé le même nombre de parcelles pour chaque objet canal (l'équivalent de 100 ha de surface irriguée par canal). Par contre, on notera que la surface totale irriguée de la zone 2 est identique entre simulé et observé.

Au niveau de la zone 1, dont le nombre de canaux est inconnu, nous avons pris l'hypothèse que la surface irriguée par canal dans la zone 1 était du même ordre de grandeur que celle de la zone 2. Par ailleurs, nous avons également supposé que cette surface était homogène pour l'ensemble des canaux de la zone 1. De ce fait, la surface totale du périmètre réel de la zone 1 (175 ha) a été divisée en deux sous ensembles de surfaces homogènes. A partir de là, nous avons choisi de représenter le périmètre de la zone 1 par deux objets canal dont la surface irriguée est de 90 ha chacun (l'écart de 5 ha provient d'approximations successives faites à des étapes précédentes).

Ainsi, six canaux et leurs parcelles irriguées respectives ont été schématisés. La Figure 17 indique les ensembles de parcelles irriguées par chaque canal, distingués par des nuances de bleu différentes, et séparés par un trait pointillé indiquant la frontière entre les deux zones.

Le choix de la forme des canaux n'a ici aucune justification précise si ce n'est un effort pour placer les parcelles de chaque canal sur des sols de qualités hétérogènes. Néanmoins, les proportions de chaque catégorie de Land Unit ne sont pas les mêmes pour chacun des canaux ; on notera notamment que les canaux 3 et 4 sont favorisés en terres argileuses (LU88/99) par rapport aux canaux 5 et 6, mais défavorisés en limon profond, comme le montre le Tableau 3.

LU	Fertilité	Canaux 1 et 2	Canaux 3 et 4	Canaux 5 et 6
45/47	***	21%		
49	*	11%		
88/99	*****	68%	69% ↔ 31%	
23	****		6% ↔ 60%	
25	**		25%	9%

Tableau 3 : Proportions des LU par canal (la colonne fertilité, représente un paramètre synthétique de la qualité des sols et n'a pas de signification physique propre).

D'autre part, la Figure 18 schématise la position des canaux et de leurs prises d'eau respectives dans la rivière. Il apparaît alors que chaque canal est à l'amont ou à l'aval d'un autre ; la numérotation indiquant l'ordre, de l'amont vers l'aval.

1.2 ... mais les proportions sont respectées

En guise de rappel vis à vis des différents types de représentations possibles, cités en début de chapitre, le lecteur aura compris que nous avons choisi une représentation schématique ne respectant pas les formes. Néanmoins, les proportions du bassin versant ont été respectées.

1.2.1 Taille du bassin (et des zones)

Bien que ramenée à ses 2/5^{ème}, la taille du bassin versant simulé ainsi que celles des deux zones qui le composent, respecte celle du bassin versant observé à 2% près (Tableau 4).

	Nb de cellules	Surface simulée	Surface simulée * 5/2	Surface observée
Zone 1	160 (40 rai) 1028 (2 rai)	1353 ha	3382 ha	3302 ha
Zone 2	40 (40 rai) 752 (2 rai)	497 ha	1242 ha	1225 ha
Total	1980	1850 ha	4624 ha	4527 ha

Tableau 4 : Surfaces de la grille simulée (CatchScape) et du Mae Yam observé (NRCT, carte SIG 1990)

Par ailleurs, les valeurs observées intègrent dans la zone 2, la zone complémentaire citée au Premier Chapitre : 1.2.3. Cette zone a été estimée en fonction d'observations de terrain réalisées par l'équipe de l'IWRAM à 192 ha, dont 128 ha de paddy et 64 ha de forêt.

1.2.2 Intersection occupation du sol / qualité de sol

Les proportions des différentes qualités de sol pour chaque type d'occupation d'une zone donnée, ont également été respectées (Tableau 5). Néanmoins, les qualités de sol de la zone complémentaire n'étant pas connues, elles ont été estimées dans les mêmes proportions que celles de la zone 2.

Upstream LandUnit	Forest			Upland			Paddy		
	nb cells	% sim.	% obs.	nb cells	% sim.	% obs.	nb cells	% sim.	% obs.
45/47	74 + 96	37.3	37.3	234	5.5	5.6	52	1.2	1.2
49	86 + 260	46.8	46.9	132	3.1	3.1	22	0.5	0.5
88/99	0 + 66	1.5	1.4	12	0.3	0.3	154	3.6	3.6

Le nombre de cellules pour la forêt est divisé en cellules, de 40

Downstream LandUnit	Forest			Upland			Paddy		
	nb cells	% sim.	% obs.	nb cells	% sim.	% obs.	nb cells	% sim.	% obs.
23	6 + 36	10	9.8	20	1.3	1.2	204	13.1	12.9
25	16 + 40	23.2	23.2	40	2.6	2.3	70	4.5	4.5
45/47	4 + 10	5.8	5.4	10	0.6	0.6	0	0	0
49	14 + 20	19.3	19.6	62	4	4.1	0	0	0.3
88/99	0 + 0	0	0.4	0	0	0	240	15.5	15.5

Tableau 5 : Proportions des catégories d'occupation du sol et des qualités de sols, simulées (CatchScape) et modélisées (NRCT, carte SIG 1990)

2 Les modèles biophysiques

2.1 Rôle de la dynamique biophysique

La dynamique biophysique est vue dans ce travail de recherche sous l'angle particulier de l'interaction entre les usagers et la ressource en eau. L'objectif de sa modélisation est de propager les apports du milieu extérieur (la pluie) au travers du système, en fonction des lois physiques et biologiques qui la définissent. D'autre part, ces mêmes lois, ou leurs paramètres, doivent permettre de véhiculer les modes de gestion et les décisions prises par les agents du système.

De manière plus pragmatique, et par rapport à la problématique initiale, la dynamique bio-physique doit :

- Générer le débit de la rivière au niveau des différents nœuds définis par la structure des périmètres irrigués simulés,
- Prendre en compte les effets de la gestion collective du périmètre, et notamment celui sur le débit disponibles en aval du périmètre,
- Simuler la distribution de l'eau des canaux vers les parcelles et la gestion individuelle de l'eau au niveau de la parcelle,
- Répercuter les effets du climat, de la gestion de l'eau et de l'activité agricole sur les rendements des cultures,
- Permettre la création de différents scénarios en fonction des variables climatiques d'entrées et/ou des paramètres techniques de la gestion.

Ces différents aspects devraient alors permettre de représenter les interactions entre la dynamique hydrique et les usages de l'eau ainsi que l'influence de la gestion amont sur le système aval dans son ensemble.

Pour se faire, il a été choisi de modéliser d'une part le bilan hydrique à la parcelle et d'autre part les transferts d'eau au sein des périmètres via l'écoulement de la rivière et des canaux d'irrigation.

2.2 Un modèle distribué de bilan hydrique

2.2.1 Un modèle préexistant mais re-formalisé et re-programmé

Le modèle de bilan hydrique remplit trois fonctions principales :

- D'une part, il sépare la pluie et les éventuels apports en irrigation, en trois compartiments : le ruissellement, le drainage profond et le stock du sol,
- D'autre part il calcule l'évapotranspiration réelle (ETR) de la culture en place,
- Enfin, un module complémentaire calcule, en fin de saison de culture, le rendement cultural obtenu en fonction du déficit évapo-transpiratoire.

Le modèle utilisé est le modèle CATCHCROP (Perez et al., 2001), qui a été créé pour être intégré au SAD du projet IWRAM. L'utilisation de ce modèle qui avait déjà été calibré et validé sur des bassins versants du Nord Thaïlande, a permis de bâtir la dynamique bio-physique de CatchScape sur des bases solides et éprouvées.

D'autre part, CATCHCROP étant à la base programmé en langage JAVA, il a été nécessaire de le recoder en Small Talk, le langage de programmation de Cormas, afin de l'intégrer à la modélisation. Une autre solution aurait pu consister à utiliser CATCHCROP en tant que module extérieur, cependant la souplesse d'utilisation aurait été perdue. D'autre part, cela a également permis de reformaliser le modèle dans une structure à plusieurs objets, ce qui n'était pas le cas dans sa version JAVA. Cette structure propre à la programmation orientée objet est schématisée dans le diagramme de classe de la Figure 19 et sera discutée par la suite. Enfin, la reprogrammation de CATCHCROP a permis d'intégrer quelques adaptations et améliorations que nous mentionnerons dans les parties qui suivent au cours de la description du modèle.

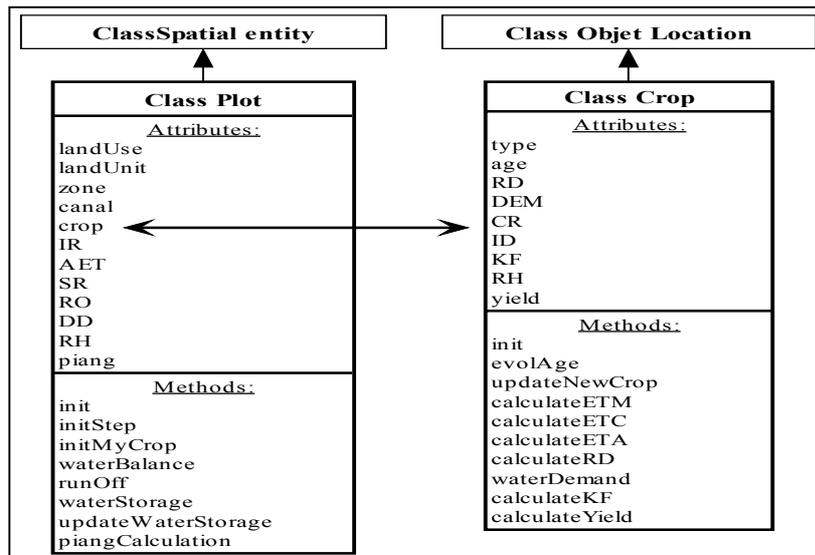


Figure 19 : Diagramme de classe des objets parcelle et culture

a) Fonction de production

La première étape consiste à séparer les apports en eau en deux parties : le ruissellement et l'infiltration. On notera, que l'irrigation n'est pas prise en compte dans les apports. C'est une des hypothèses du modèle qui estime que l'irrigation est faite de telle sorte que l'ensemble de l'eau d'irrigation s'infiltre. Ainsi, seuls les apports en pluie sont pris en compte à ce niveau.

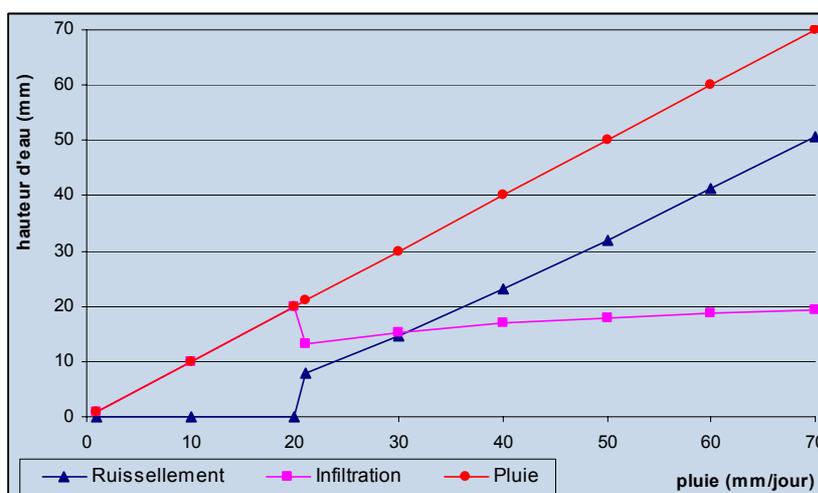


Figure 20 : Loi d'infiltration de CATCHCROP ($K = 20$)

Pour ce faire le modèle utilise une fonction d'infiltration dépendante des trois paramètres, IS, CS et CC ; respectivement fonction de la texture du sol, de la pente et de la culture en place. Le produit de ces trois paramètres, que nous appellerons K, détermine le taux d'infiltration minimum de la parcelle considérée. Lorsque la pluie est inférieure à K, le ruissellement est nul. Au dessus de ce seuil, le modèle utilise une loi d'infiltration linéaire comme indiqué sur la Figure 20.

Il apparaît à la vue de cette figure que le modèle pose une deuxième hypothèse sur la loi d'infiltration qui peut se formuler ainsi : la part du ruissellement est une fonction directement linéaire de la pluie, ne dépendant pas de l'humidité du sol à l'instant considéré. L'infiltration ainsi calculée est alors transmise dans le réservoir du sol.

Par ailleurs, la version initiale de CATCHCROP prévoyait à ce niveau un module complémentaire permettant de calculer l'évaporation d'un sol nu lors des périodes d'inter-cultures. En effet, comme nous le montrerons par la suite, l'ETR (Evapotranspiration réelle) est calculée en fonction de paramètres propres aux cultures. Or, durant l'inter-culture, les paramètres étaient manquants. Le modèle a alors été modifié lors de son implémentation sous CatchScape, en prenant l'hypothèse que les inter-cultures avaient le même comportement évapotranspiratoire qu'une jachère. Ainsi, lors de ces périodes, le modèle n'utilise pas le module complémentaire qui était sous CATCHCROP et calcule l'ETR grâce aux paramètres connus des jachères.

b) Stockage de l'eau dans le sol

Deux réservoirs sont modélisés. Le premier est le réservoir sol, dont les dimensions sont fonction de la profondeur du sol donnée par le DLD. Le deuxième est le réservoir racinaire allant de la surface du sol à la profondeur racinaire au temps t^{14} . En réalité ces deux réservoirs se superposent l'un l'autre (Figure 21) et ont les mêmes paramètres d'entrée (infiltration et irrigation). La distinction se fait au niveau de leurs sorties, le premier calcule le drainage profond qui sort du système et le deuxième calcule un drainage interne (qui reste dans le réservoir sol) et sert également à calculer l'ETR.

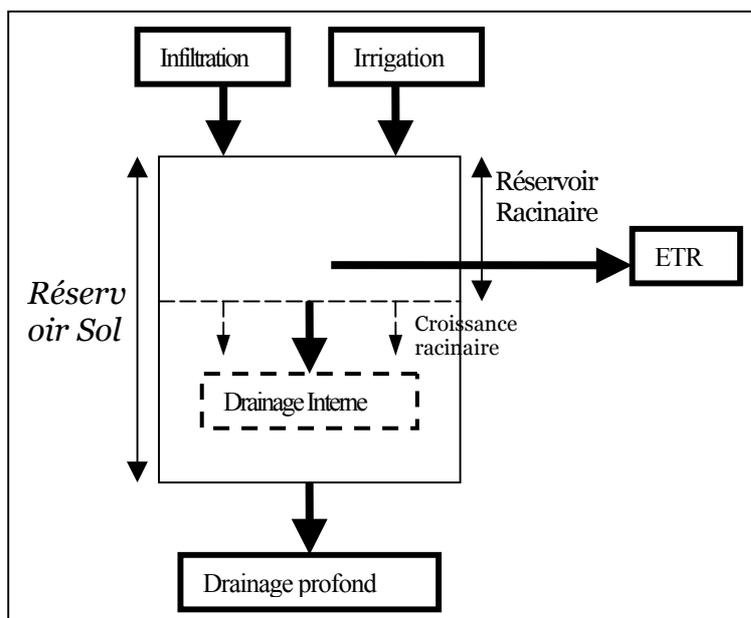


Figure 21 : Système à double réservoir de CATCHCROP

¹⁴ Un module de croissance racinaire calcule la profondeur de la zone racinaire à chaque pas de temps

A chaque pas de temps le volume des réservoirs est actualisé et le drainage profond est calculé selon les équations suivantes :

$$\begin{aligned} DDi &= \text{MAX} [0 ; (SRi + R Ri + I Ri - ROi - SAW)] \\ SRi &= \text{MIN} [SAW ; (SRi + R Ri + I Ri - ROi)] \\ CRi &= \text{MIN} [CAWi ; (CRi + R Ri + I Ri - ROi)] \end{aligned} \quad (1)$$

Avec : DDi, drainage profond au temps i

SRi et CRi les volumes au temps i des réservoirs sol et plante (zone racinaire) respectivement

R Ri, la pluie ; ROi, le ruissellement ; I Ri, l'irrigation

SAW et CAWi, les capacités maximum des réservoirs sol et plante (au temps i) respectivement

Par ailleurs, lors du transfert du modèle vers CatchScape, l'équation (1) a été remplacée par l'équation (2) afin que le réservoir racinaire tienne compte de l'apport en eau supplémentaire provenant de l'humidité de la tranche de sol conquise par la croissance racinaire entre le pas de temps t et $t + 1$. Les nouvelles équations sont alors :

$$\begin{aligned} \text{varCAWi} &= (RD_i - RD_{i-1}) / SD * SRi \\ CRi &= \text{MIN} [CAWi ; (CRi + R Ri + I Ri + \text{var CAWi} - ROi)] \end{aligned} \quad (2)$$

Avec : RD_i, profondeur racinaire au temps i

SD, profondeur totale du sol

La deuxième modification survenue à cette étape tient plus de l'architecture du modèle que de son algorithme, et s'appuie sur les fonctionnalités de la programmation orientée objet. Plus précisément, le réservoir sol et le réservoir racinaire ont été intégrés à CatchScape dans deux entités distinctes ; le premier ayant été intégré à l'objet parcelle et le deuxième à l'objet culture. Outre le gain au niveau de la clarté conceptuelle, cette structure permet de changer facilement de culture d'une saison à l'autre. Chacun des deux objets porte ses paramètres propres et sa dynamique propre. Ainsi, lors de la récolte, le modèle global n'a qu'à enlever l'objet culture de l'objet parcelle et le remplacer soit par une nouvelle culture soit par de la jachère ; l'état du sol, et notamment sa réserve hydrique, n'étant ainsi pas modifié.

c) Calcul de l'évapo-transpiration réelle

Les étapes de calcul de l'ETR ont été directement transmises de CATCHCROP vers la dynamique de l'objet culture et leur descriptif détaillé n'offrirait pas de réel intérêt dans le cadre de ce mémoire. C'est pourquoi, nous n'en présenterons ici que le fonctionnement global.

La première étape consiste à calculer l'ETM (Evapotranspiration maximum) à partir de l'ETP (Evapotranspiration potentielle), en fonction d'un coefficient cultural. Ce dernier dépend, comme il est courant dans les modèles de bilan hydrique, du stade de culture (Doorenboos et al., 1977), (Allen et al., 1998).

Le modèle calcule ensuite une valeur d'évapotranspiration intermédiaire en appliquant un facteur correcteur lié au niveau de fertilisation de la culture. Ce dernier dépend du taux d'engrais apporté par l'agriculteur et du type de sol de la parcelle. Ce facteur n'est pas à négliger puisqu'il peut faire varier l'ETM corrigée, du simple au double.

Finalement, le calcul de l'ETR à partir de l'ETM corrigée, est lié à la réserve hydrique du réservoir racinaire (RH), et au potentiel de succion de la plante (P). Lorsque RH

est supérieur à $1-P$, aucun facteur correcteur n'est appliqué à l'ETM ; dans le cas contraire, un coefficient de stress est appliqué.

d) Estimation de la demande hydrique

L'estimation de la demande hydrique est donnée par la différence entre l'ETM corrigée et l'ETR et est donc lié au facteur de stress (Perez et al., 2001). Physiologiquement, elle correspond au manque évapotranspiratoire dû à une réserve hydrique du sol trop peu importante. Elle est également utilisée pour représenter le manque en volume d'irrigation que subissent les parcelles de paddy dans CatchScape.

e) Rendement des cultures en fonction du déficit évapotranspiratoire

Le dernier module de CATCHCROP qui a été transféré dans le compartiment culture de CatchScape est le calcul du rendement final de la culture basé sur (Doorenboos et al., 1979).

Il est calculé en fonction du déficit évapotranspiratoire total, tout au long de la saison de culture, et du rendement potentiel de la plante.

2.2.2 Distribution du modèle à l'échelle de la parcelle

a) Un modèle semi-distribué

Le modèle de bilan hydrique précédemment décrit a été programmé au niveau des objets parcelle et culture de CatchScape. En programmation objet cela implique que les procédures du bilan sont inhérentes à ces deux objets et que chaque entité issue de ces objets pourra effectuer son propre bilan hydrique. Comme nous l'avons vu au §1.1.2, 1980 cellules définissent la grille du modèle. Ces cellules sont en fait définies comme des parcelles et pour chacune d'elles, une entité de l'objet culture, lui a été attribuée. Ainsi, la distribution du modèle de bilan hydrique a été grandement facilitée par la structure de la programmation objet. A chaque pas de temps, chacune des 1980 parcelles de CatchScape effectue son propre bilan hydrique en fonction des apports en pluie, considérés comme uniformes sur toute la surface du bassin, et des apports en irrigation, qui ne peuvent être effectués que sur la zone de paddy et qui sont fonction de la gestion de l'eau, collective et individuelle.

Néanmoins, il n'est pas exact, de parler de modèle distribué dans ce cas. En effet, les vrais modèles distribués, tels que le SHE, tiennent compte des flux entre les mailles que ce soit au niveau de la surface (ruissellement) ou en profondeur (échange de la nappe). Dans ce cas il n'existe pas de transfert du ruissellement et du drainage d'une parcelle à l'autre ; de même qu'il n'existe pas de chemins d'eau au travers des parcelles, menant à la rivière. C'est pourquoi nous parlerons plutôt de modèle semi-distribué.

b) Ruissellement et drainage rapide des zones irriguées

La deuxième étape d'une modélisation hydrologique classique, consiste à transférer les volumes produits au niveau de chaque parcelle, vers l'exutoire du bassin ou du sous-bassin. Même si cette opération n'est pas réalisée de manière distribuée telle que vue précédemment, elle peut être modélisée au travers d'autres moyens.

Par exemple, les modèles maillés discrétisent (divisent spatialement) le bassin en un ensemble de mailles homogènes du point de vue de leurs caractéristiques hydrologiques et de leur temps de transfert (isochrone). Après calcul de la lame

ruisselée pour chacune des mailles, le modèle calcule le débit à l'exutoire en sommant les isochrones avec le décalage temporel adéquat (El Idrissi et al., 1995).

Bien que semblant adéquate par rapport à la structure de CatchScape, ce type d'architecture n'a pas été intégrée au modèle mais le sera peut être dans une version ultérieure. Néanmoins, la version actuelle prévoit le transfert du ruissellement et du drainage des zones de paddy vers la rivière. Le transfert du ruissellement est effectué sans aucun décalage temporel étant donné le pas de temps considéré de 10 jours. Pour le drainage, l'hypothèse est prise que le drainage de la zone de paddy irriguée est un drainage rapide. Il est donc également transféré vers la rivière dans un même pas de temps.

2.2.3 Limites de l'architecture du modèle

Il nous a semblé important de dresser, dès à présent, un bilan intermédiaire de la dynamique bio-physique. La première faiblesse importante à relever est le fait que les apports en irrigation ne sont pas pris en compte dans le calcul du ruissellement. En effet, l'hypothèse d'une gestion de l'irrigation faite de telle sorte que toute l'irrigation s'infilte, n'est pas vérifiée dans le cas des systèmes de rizières du Nord Thaïlande. Au contraire, les rizières, construites en terrasses, sont submergées d'eau formant une couche d'eau qui gêne la pousse d'adventice.

Par ailleurs, cette lame d'eau est un paramètre important de la gestion de l'eau de l'agriculteur. Les irrigants des périmètres irrigués rizicoles l'utilisent pour ajuster le niveau d'irrigation de leurs parcelles et se font des calendriers du niveau d'eau dans la terrasse en fonction des différentes périodes de culture (Becu, 1999). Or le modèle ne permet pas de représenter cette lame d'eau et perd ainsi une part de la dynamique de la gestion individuelle du système.

Cette limite est également associée à une autre faiblesse du modèle qui provient du fait que la loi d'infiltration ne dépend pas de l'humidité du sol. En effet, le principe de submersion des casiers repose sur la saturation préalable du sol. Or dans ce cas, lorsque le sol est saturé, l'eau apportée en excédent est évacuée au niveau du drainage. Il est donc vraisemblable que le modèle, dans la zone de paddy, sous-estime le ruissellement au profit du drainage.

La dernière limite, et non pas la moindre, provient de la quasi-absence de fonction de transfert de l'eau des parcelles vers la rivière (sauf pour la zone de paddy). En effet, le ruissellement et le drainage de l'ensemble de la zone de forêt et d'agriculture pluviale sont calculés à chaque pas de temps en fonction de la pluie qu'ils reçoivent et de leur réserve en eau au temps t , mais ces résultats ne sont pas exploités par la suite. Dans la version actuelle, ils sont considérés comme des sorties du modèle alors qu'ils devraient être utilisés pour générer le débit de la rivière.

En réalité, le débit de la rivière est artificiellement alimenté à chaque pas de temps par un jeu de données provenant d'un fichier extérieur. Ainsi et en quelques sortes, nous apportons de la pluie dans le modèle générant alors du ruissellement et du drainage ; ces derniers sortent ensuite du système et sont compensés par un fichier extérieur.

Outre son architecture pour le moins curieuse, ce système connaît une insuffisance du point de vue du fonctionnement hydrologique du bassin dont la partie transfert n'est pas respectée. D'autre part il nécessite deux jeux de données pour chaque scénario : un jeu de données climatiques (pluie et ETP) et un jeu de données de débits. Or ces données sont liées l'une à l'autre par les mécanismes hydrologiques spécifiques du bassin considéré, ce qui gênera par la suite la souplesse d'utilisation du modèle.

2.3 Un modèle hydraulique simplifié

L'architecture générale des périmètres simulés a déjà été présentée au §1.1.3, c'est pourquoi nous ne reviendrons pas sur ce sujet. L'objet de ce chapitre est de montrer comment a été modélisé le mécanisme d'écoulement d'eau de la rivière jusqu'aux parcelles.

2.3.1 Un débit amont provenant d'un fichier extérieur

Comme il a été dit précédemment, le débit de la rivière est alimenté par un fichier extérieur. Ce fichier extérieur provient des résultats de simulations du modèle iHACRES sur le bassin du Mae Uam, modèle qui a été validé pour les bassins versants du Nord Thaïlande (Schreider et al.). Rappelons toutefois que le Mae Uam est un bassin non jaugé. Ainsi, iHACRES procède par désagrégation/agrégation d'autres bassins proches du Mae Uam qui ont été jaugés et dont les débits simulés sont validés (Merritt et al.).

Les débits ainsi calculés sont ceux résultant des écoulements rapides et des écoulements lents de l'ensemble de la surface du bassin (zone 1 et 2). Or, ces débits sont entrés dans le système hydraulique de CatchScape tout à l'amont des périmètres représentés. En d'autres termes, nous entrons à l'amont le débit qui normalement se retrouve à l'exutoire. Ce biais est en fait à nuancer étant donné que la majorité du débit du bassin est déjà produit lorsque l'on se place à l'amont du système irrigué, comme nous le montrons §2.5.

2.3.2 Distribution de l'eau dans les canaux

La distribution de l'eau de la rivière dans les canaux se fait de manière séquentielle de l'amont vers l'aval. Le principe est que le canal le plus à l'amont bénéficie en premier de l'ensemble du volume¹⁵ de la rivière. Néanmoins, le volume prélevé dépend du gestionnaire du canal. Seul, le volume qui a été fixé et négocié à l'avance, est dérivé vers le canal. D'autre part, cette dérivation est effectuée au travers d'un objet barrage. Or, comme nous l'avons vu au Premier Chapitre : 1.5.1, les barrages sont conçus de telle façon qu'ils ne peuvent pas dériver l'ensemble du débit de la rivière. Ainsi, un coefficient technique d'efficacité des barrages a été intégré et limite le prélèvement des canaux à 90% du volume de la rivière.

Lorsque le canal 1 a reçu le volume souhaité, le volume de la rivière est diminué d'autant et la main est donnée au deuxième canal. Celui-ci effectue la même opération que le canal 1 mais à partir du volume actualisé de la rivière. Cette boucle se poursuit ensuite jusqu'au dernier canal (Voir diagrammes d'activités en annexe).

Cependant, à l'intérieur de cette boucle, entre les canaux 2 et 3 et entre les canaux 4 et 5, deux autres opérations interviennent (Figure 22).

Il s'agit tout d'abord du transfert du ruissellement et du drainage (supposés être du drainage rapide) des parcelles venant d'être irriguées. En effet, à l'intérieur d'un pas de temps de 10 jours, et au sein de la boucle de distribution d'eau, les parcelles venant d'être irriguées calculent leur bilan hydrique et génèrent donc du ruissellement et du drainage. Ceux-ci sont alors renvoyés vers la rivière avant que la paire de canal suivante effectue son prélèvement. Les canaux en aval bénéficient donc de ce retour d'eau vers la rivière.

¹⁵ Nous parlerons à présent de volume car le débit est considéré sur une période de 10 jours correspondant au pas de temps

Par ailleurs au même moment, les débits sortant des deux canaux de la paire (volume restant dans les canaux après irrigation), sont également réinjectés dans la rivière.

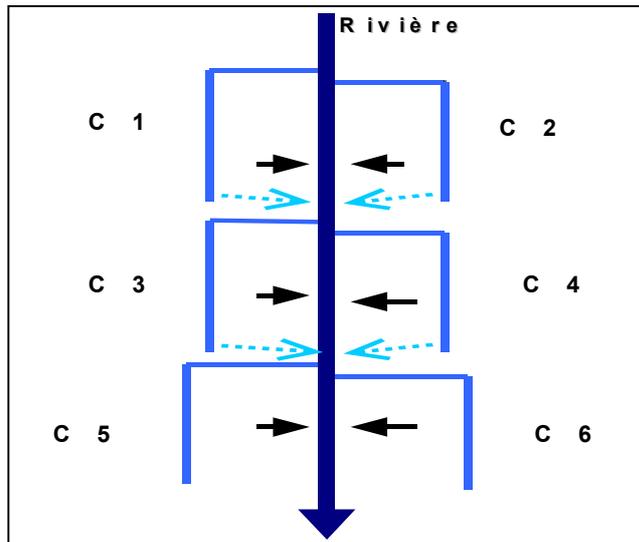


Figure 22 : Flux d'eau retournant à la rivière ; ruissellement et drainage des parcelles (flèches pleines) et débit de sortie des canaux (flèches pointillées)

2.3.3 Des canaux aux parcelles

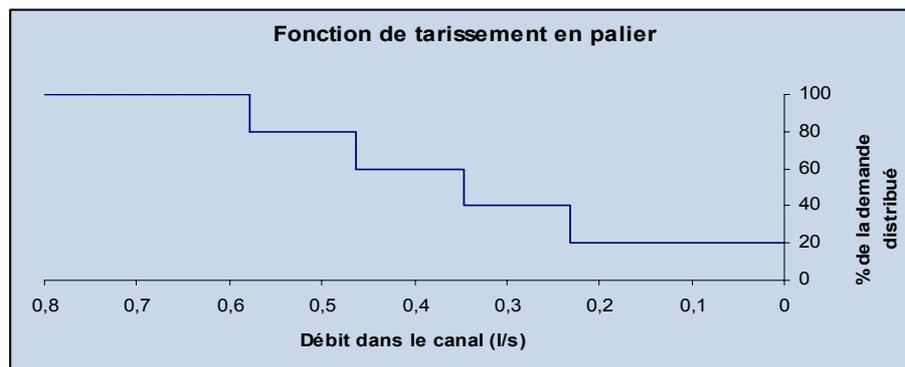
Une fois dans le canal, l'eau est acheminée vers les parcelles irriguées en fonction d'un mécanisme séquentiel simulant le système de piang des périmètres thaïlandais et d'une loi de tarissement progressive du canal.

Comme nous l'avons vu en première partie de ce mémoire, l'irrigation à la parcelle se fait à l'aide d'un tuyau de bambou calibré (piang) dont le diamètre est censé être le même pour l'ensemble des irrigants du canal. Les piangs régulent ainsi le débit entrant et assurent l'équité au sein du canal. Afin de modéliser ce système de distribution nous avons tout d'abord estimé le volume d'eau acheminé qui coule dans une parcelle équipée d'un piang durant une période de 10 jours. Ce volume dépend bien entendu du diamètre du piang, de sa position dans le bief du canal et de la hauteur d'eau dans le canal. Nous n'avons pas voulu simuler un tel mécanisme étant donné le peu de connaissances précises que nous avons de la gestion de ces paramètres. C'est pourquoi nous avons repris des données issues de la littérature (Vanpen, 1986) (Tanabe, 1994) estimant d'une part le besoin en eau moyen des cultures à 6 mm/jour/m² et d'autre part le niveau d'irrigation satisfaisant, du point de vue de l'agriculteur, à

10 mm/jour/m². Etant donné que dans notre cas nous nous intéressons à l'irrigation effectivement effectuée par le paysan, nous avons estimé le volume d'eau irrigué par le système de piang durant un pas de temps de dix jours, à 100 mm. Dès lors, les parcelles qui sont irriguées reçoivent, selon leur numéro d'ordre dans le canal, l'équivalent de 100 mm d'eau par pas de temps et par piang installé. Le nombre et la taille des piangs étant des paramètres du modèle, ils pourront être modifiés selon les scénarios de simulation envisagés.

Par ailleurs, lorsque le volume du canal devient insuffisant pour alimenter l'ensemble des parcelles, un système de tarissement progressif par palier entre en jeu. Celui-ci consiste à ne distribuer, en dessous d'un certain débit, qu'un certain pourcentage de la demande de la parcelle ; ce pourcentage étant lui-même fonction du volume d'eau restant dans le canal, selon les paliers de la Figure 23.

Figure 23 : Fonction de tarissement par palier des canaux



2.3.4 Conséquences de la structure du modèle

La première conséquence de la structure du modèle de distribution d'eau, est l'introduction d'inégalités entre les éléments amont et aval. En effet, que ce soit à l'échelle des canaux ou à l'échelle des parcelles, des ordres de distribution d'eau ont été intégrés mettant la priorité sur l'amont. A l'inverse, le système des piangs amène une part d'équité dans ce système même si les dernières parcelles irriguées ne reçoivent pas l'intégralité du volume demandé.

Par ailleurs, comme nous l'avons vu au Premier Chapitre : 1.5.1, l'architecture réelle du périmètre d'un canal est beaucoup plus complexe que dans le modèle. Elle fait appel dans certains cas à des canaux secondaires et l'irrigation de certaines parcelles peut se faire via des parcelles situées à l'amont, faisant ainsi intervenir des arrangements et des négociations entre les irrigants. Le point de vue qui a été adopté dans cette recherche consiste à s'intéresser uniquement à l'ordre séquentiel de distribution de l'eau. La modélisation revient alors à affecter un numéro d'ordre à chaque parcelle et à faire passer l'eau disponible du canal parcelle par parcelle selon cet ordre. Cette simplification, ne permet pas d'introduire les interactions qui s'effectuent entre des parcelles adjacentes reliées en cascades et nous perdons dès lors une partie de la richesse de la gestion individuelle et collective propre aux systèmes irrigués du Mae Yam. D'autre part, la modélisation d'un écoulement d'eau en cascade suppose que l'on représente une lame d'eau en surface, or nous avons déjà souligné les limites du modèle de bilan hydrique à ce niveau dans le §2.3. Par contre, même si ils ne sont pas représentés, les canaux secondaires sont implicitement modélisés par l'ordre de distribution des parcelles. L'information que nous perdons à ce niveau provient de la gestion qui peut être faite du volume dérivé dans les canaux secondaires.

2.4 Validation du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant

Si toutefois, le processus hydrologique de transfert du ruissellement et du drainage vers l'exutoire n'est pas respecté, il est possible de procéder à une vérification du bilan hydrologique global du bassin versant simulé. Pour cela, un jeu de cinq années de données climatiques (pluie et ETP) a été utilisé. Les débits correspondants obtenus par iHACRES ont également été introduits, à l'amont du système, cependant ils n'ont pas été pris en compte dans le bilan effectué. Plus précisément, le bilan a été effectué uniquement à partir des données de ruissellement et de drainage générées

par le modèle et non pas à partir des débits de la rivière et des canaux à l'exutoire. Ainsi, le seul effet du fichier d'entrée extérieur est un accroissement du ruissellement et de drainage dans la zone de paddy irriguée. A cela, il convient de rappeler que cette zone représente uniquement 13% de la surface totale simulée, la majeure partie (78%) étant recouverte de forêt.

Le bilan hydrologique a été effectué pour chacune des deux saisons en reprenant l'hypothèse formulée au §2.2.2 estimant le drainage de la zone de paddy comme du drainage rapide. Les résultats du bilan, simulés par CatchScape et observés (iHACRES : (Schreider et al.) sont donnés dans le Tableau 6.

Année	1988		1989		1990		1991		1992	
	Simulé	Observé								
Saison des pluies	329	372	322	299	340	398	397	383	258	288
Saison sèche	93	111	0	46	103	64	83	125	135	50

Tableau 6 : Bilans hydrologiques simulés et observés (en mm d'eau) sous les hypothèses :

- Saison des pluies = ruissellement de l'ensemble du bassin durant la saison des pluies, plus drainage de la zone de paddy durant la saison des pluies ;
- Saison sèche = ruissellement et drainage de l'ensemble du bassin durant la saison sèche, plus le drainage des zones de forêt et d'agriculture pluviale durant la saison des pluies.

2.5 Conclusion

Cette conclusion vise à faire ressortir les atouts et les limites de la dynamique bio-physique modélisée en se basant sur les objectifs de modélisation explicités en début de chapitre.

Tout d'abord les effets de la gestion collective sur la dynamique bio-physique sont bien pris en compte dans les modèles. Plus précisément deux clés d'entrées principales ont été ménagées dans l'architecture du modèle afin de prendre en compte la gestion :

- d'une part, le pourcentage de diversion de la rivière effectuée par les barrages et gérée par un chef de canal ; il représente le lieu privilégié de l'interaction entre la ressource en eau et sa gestion collective,
- d'autre part, le nombre et/ou la taille des piangs utilisé(s) par l'agriculteur pour irriguer sa parcelle ; ce paramètre qui est normalement fixé à un seul piang de taille déterminée, est parfois modifié par des irrigants et notamment dans le cas de « vol d'eau » (Tanabe, 1994) ; il constitue donc un facteur important de la gestion individuelle.

Par ailleurs, le système transmet bien les effets de cette gestion du périmètre amont vers le périmètre aval via la ressource en eau, et ces effets ont bien un impact sur l'ensemble du système puisque les rendements des cultures calculés sont fonction de leur apport en eau. De même, le climat a également une influence sur le système via les rendements qui en dépendent.

Concernant les limites de la dynamique, plusieurs points ont déjà été soulevés au cours de ce chapitre et il ne serait pas nécessaire de revenir dessus. Par contre, deux commentaires sont à ajouter à ce paragraphe. Le premier concerne le débit de la rivière. Etant donné que la totalité du débit est entré en amont du système, le

périmètre amont bénéficie d'un volume qui dans le système hydrologique réel ne devrait arriver qu'un peu plus en aval. Ainsi l'équilibre entre les deux périmètres s'en trouve biaisé. Nous avons voulu mesurer ce biais car il nous a semblé moins important que ce que l'on pourrait penser à première vue. En effet, le doute sur son importance survient lorsque l'on prend en considération l'importante surface de forêt non irriguée (environ plus de 50% de la surface du bassin) se trouvant en amont du premier périmètre irrigué (périmètre le plus en amont). Nous pouvons nous en rendre compte de manière visuelle sur la Figure 3, page 5. Ce constat laisse à penser qu'en réalité, à l'amont du premier périmètre, le débit de la rivière est déjà très proche du débit total à l'exutoire du bassin. Cela se confirme lorsque l'on regarde la différence entre le débit calculé par iHACRES à l'exutoire de la zone 1 et celui à l'exutoire du bassin entier (Figure 24). On s'aperçoit alors que la différence entre ces deux débits est relativement faible (moins de 15% en moyenne). Au regard de ces données, le déséquilibre entre les deux périmètres est donc nuancé.

Le deuxième commentaire a déjà été partiellement soulevé et concerne le fait que le fichier d'entrée climatique doit être lié au fichier des débits d'entrée. Cela implique que ces deux fichiers aillent par paire. Or, si il est relativement aisé de trouver des données climatiques pour les bassins versants du Nord Thaïlande, cela est plus ardu au niveau des données de débits. En réalité, seul le modèle iHACRES est validé pour des bassin versants non jaugés du Nord Thaïlande. La création de différents scénarios climatiques est donc dépendante de ce modèle rendant ainsi la souplesse d'utilisation de CatchScape à ce niveau, relativement médiocre.

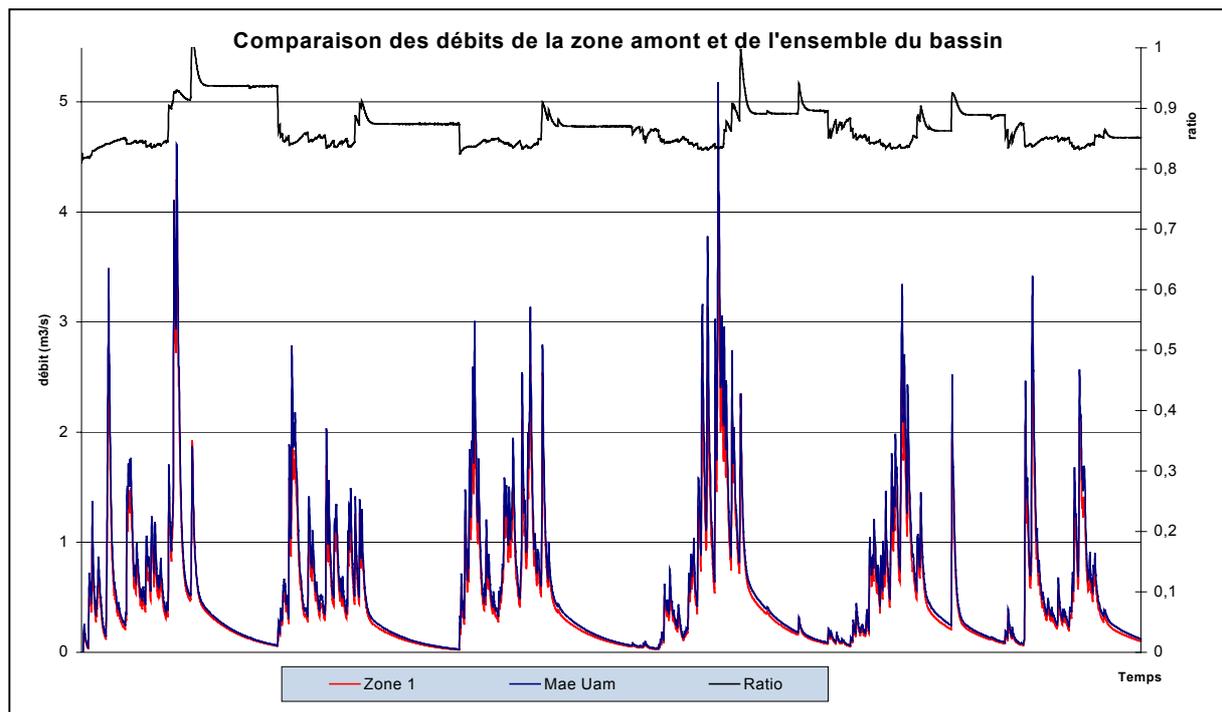


Figure 24 : Comparaison des débits de la zone amont et de l'ensemble du bassin (source iHACRES)

3 Les acteurs du système : dynamiques, décisions et usage des ressources

La dynamique sociale d'un système peut représenter un très grand nombre de relations et il n'est pas toujours facile de savoir ce qu'il faut représenter et ce qu'il ne faut pas. En guise de fil directeur pour la modélisation nous avons adopté la méthodologie suivante. Étant donné que notre point de départ était l'agent exploitation familiale, nous avons cherché à définir les ressources qui sont utilisées et gérées par cet agent puis, pour chacune de ces ressources, définir l'usage qu'il en est fait, les décisions qui y sont liées et leur dynamique propre. Cette démarche agent-ressource va donc se retrouver tout au long de ce chapitre. Quatre ressources ont été définies : l'eau, le travail, l'argent et le foncier.

3.1 Les agents du modèle

3.1.1 Types d'agents

Le premier type d'agent qui a été défini est l'exploitation familiale. Il correspond au chef d'exploitation, à sa famille, dont certains membres peuvent participer aux travaux agricoles, et à l'exploitation elle-même définie par un nombre de parcelles de paddy et un nombre de parcelles d'agriculture pluviale. Les attributs de base des agents agricoles ainsi définis sont :

- La taille de la famille
- La quantité de main d'œuvre
- Le nombre de parcelles (paddy, pluviale)

Le deuxième type d'agent retenu est le gestionnaire de canal. Il est défini par son canal, dont il connaît l'ensemble des parcelles, le barrage qui lui est associé, dont il régule le niveau de la prise d'eau, et un niveau de satisfaction qui définit le rapport entre l'offre et la demande en eau d'irrigation dans son canal.

Enfin le troisième type d'agent, correspond à un niveau de gestion supplémentaire et définit les comités de villages. Ces comités qui sont au nombre de deux, un pour chaque zone, n'ont pas d'attribut particulier. Par contre ils possèdent des règles et des méthodes leur permettant de jouer le rôle du régulateur et du donneur d'informations.

Ainsi comme on le voit, une partie seulement des acteurs du système réel a été représentée. On pense notamment aux agents économiques du système qui sont absents ; à savoir le marché ou l'acheteur pour la vente des produits agricoles. De même, au niveau de la gestion de l'eau, les gardiens de canal, qui travaillent en collaboration avec les gérants, ne sont pas représentés. Enfin les acteurs institutionnels avec plus particulièrement les départements de protection de la forêt, ne sont également pas représentés par des agents dans le modèle. La raison principale de ces manques est due au fait que nous n'avons pas cherché à représenter des agents dont la dynamique ne serait pas représentée. Par rapport à la problématique de gestion de l'eau qui nous intéresse, ces agents représentent en fait des contraintes ou des sources d'informations extérieurs. Ainsi, à l'échelle du Mae Uam, le marché agricole ne peut pas être représenté avec ces lois d'offre et de

demande car le volume produit n'a pas suffisamment d'influence sur le prix régional. Les agriculteurs subissent ainsi les fluctuations du marché comme un phénomène extérieur. Le problème d'échelle est le même au niveau des réglementations et protections des zones de forêt. Enfin, pour le cas des gardiens de canaux, l'explication est différente. Nous avons, à ce niveau, simplifié le système en agrégeant les acteurs similaires. Ainsi, dans ce cas, le gestionnaire et le gardien, agissent tous deux à l'échelle d'un canal et sont tous les deux liés à la gestion de l'eau. De plus, ils coordonnent leurs activités ce qui justifie encore plus le fait de les agréger en un même agent.

Le deuxième niveau de simplification qui a été opéré concerne plus particulièrement l'exploitation agricole. Nous avons vu au Premier Chapitre : 1.4.2, que l'agriculture ne se limitait pas aux terres arables et aux paddy mais que d'autres activités étaient pratiquées. On peut penser notamment à la production fruitière et à l'élevage. Or ces productions ne sont pas représentées dans l'exploitation agricole simulée. La raison provient d'une part du peu de liens qu'ont ces productions avec la gestion de l'eau et d'autre part du fait de leur moindre importance dans le revenu agricole comparé aux cultures de champs. En effet, les cultures fruitières sont essentiellement produites pour l'auto-consommation et ne constituent pas une culture de rente. Les jardins fruitiers sont le plus souvent situés autour des habitations et on ne trouve pas réellement de vergers. L'élevage est également de petite taille bien que la plupart des familles possède quelques têtes. Dans la majorité des cas il s'agit de trois ou quatre cochons, deux ou trois vaches et une dizaine de poulets. L'élevage représente 11% du revenu agricole mais sa véritable utilité vient du fait qu'il constitue un placement d'argent comme c'est le cas dans beaucoup d'agricultures de subsistance. Ainsi, nous représentons les productions agricoles les plus importantes et pesant le plus dans le revenu des familles, néanmoins d'autres utilités telle que le placement que constitue un cheptel bovin même de faible importance, ne sont pas représentées.

3.1.2 Les catégories d'exploitations familiales

a) Intérêt des catégories pour la simulation et la représentation du système

Afin d'affiner notre connaissance des exploitations agricoles présentes dans le Mae Uam, nous avons procédé à une analyse de l'échantillon d'agriculteurs provenant de l'enquête de l'IWRAM. Pour cela nous avons procédé à une analyse par grappe (cluster analysis) permettant d'extraire des catégories d'exploitations plus ou moins homogènes. Outre l'intérêt que cela constitue pour l'analyse du système, l'obtention de catégories d'agents présente un réel intérêt pour la modélisation. En effet, comme le souligne Grimm (Grimm, 1999), dans le cadre des modèles individu-centrés non théoriques appliqués à l'écologie, il est préférable de commencer une modélisation sur un état qui correspond au mieux à la réalité. D'après l'auteur, les modèles les plus utiles sont ceux qui se basent sur des faits, des tendances et des organisations réelles, et ce notamment au moment de leur initialisation. L'utilité de ces modèles est vue par rapport à ce qu'ils apportent à la problématique de terrain étudiée et d'après l'auteur ces modèles permettent, plus que les autres, de faire ressortir de nouvelles perceptions du système, de nouvelles problématiques et sont, d'une certaine manière, plus à même à être validés / testés.

En cherchant à comprendre et à structurer les exploitations agricoles nous visons à trouver plusieurs sous catégories d'exploitations qui pourront être intégrées dans la

modélisation comme état initial du système, en correspondance avec l'état du système réel.

b) Qualité de l'analyse statistique en grappe réalisée

L'échantillon se compose 109 exploitations familiales appartenant aux 5 villages du bassin (*Mae Ming* et *Pa Thung* pour la zone 1 et *Ban Chiang*, *To Rua* et *Tung Yao* pour la zone 2). Après avoir effectué quelques arrangements sur le fichier d'entrée¹⁶ nous avons procédé à l'analyse statistique à l'aide du logiciel *Statistica*. La première phase a consisté à déterminer les corrélations entre les variables d'entrées, or ces dernières étaient très peu corrélées les unes aux autres ce qui signifie qu'elles contribuent toutes à la définition de l'échantillon. Ensuite nous avons procédé à l'analyse sur les individus et pour cela nous avons choisi de définir trois catégories, ou grappes. La taille des groupes trouvés est relativement homogène avec 39, 33 et 37 exploitations chacun. Environ la moitié des variables d'entrées sont significatives. Le Tableau 7 montre celles qui sont significatives avec leur valeur moyenne et leur écart type qui donne une information sur la qualité de l'analyse. Notons à ce propos que les valeurs absolues n'ont pas ici de signification réelle car elles définissent en fait des catégories. L'intérêt de ce tableau est de pouvoir comparer les valeurs moyennes aux écarts types.

	Nb Hh		Age	Education	Size	Labour	Paddy area	Upland area
Cluster 1	39	Mean	1.8	1.9	1.4	1.9	2.2	1.7
		Std	0.64	0.3	0.5	0.5	0.7	0.8
Cluster 2	33	Mean	3.14	1.9	2.2	1.9	3.7	1.3
		Std	0.8	0.9	0.7	0.5	0.5	0.7
Cluster 3	37	Mean	3.3	1.6	2.3	2.2	2.2	2.9
		Std	0.7	0.5	0.7	0.6	1	0.8

Tableau 7 : Valeurs moyennes et écarts types des trois groupes d'exploitations définis par l'analyse en grappe

Ainsi, l'âge, le nombre de parcelles de paddy et d'agriculture pluviale sont les variables le plus significatives.

c) Signification des six classes retenues

A partir du Tableau 7 on peut déjà donner la signification générale de chacun des groupes :

- cluster 1 : représente des exploitants jeunes avec des familles de petites tailles
- cluster 2 : correspond à des exploitations ayant beaucoup de parcelles de paddy
- cluster 3 : correspond à des exploitations ayant beaucoup de parcelles d'agriculture pluviale

Par ailleurs, la force de travail bien que moins significative est plus faible dans le groupe 1. De même, il semblerait que les exploitants du groupe 3 soient légèrement plus âgés, avec un niveau d'éducation un peu plus bas. Bien que non représentées ici, les données sur les activités para-agricoles ne montraient aucune tendance dans cette analyse.

A partir de ces résultats, six classes ont été créées. Pour cela nous avons affiné la définition des groupes suivant le nombre de parcelles détenues tout en gardant les

¹⁶ Une catégorie de parcelles ambiguë nommée « parcelle pluviale irriguée » (irrigated upland) a été remplacée par des parcelles de paddy ; les parcelles non classées paddy/pluviale (8% des parcelles) ont été affectées à l'une des deux catégories de manière à respecter le pourcentage global de chacune d'elles ; les parcelles dédiées exclusivement aux productions fruitières n'ont pas été retenues (6% des parcelles)

autres paramètres fixes. Ainsi, deux classes ont été ramenées à des valeurs entières de façon à pouvoir les intégrer dans la modélisation en tant qu'attributs des agents. Le Tableau 8 indique la valeur de ces attributs. Le nombre d'agent a été ramené aux 2/5^{ème} de la population totale du bassin, comme défini au §1.1.2. ; ainsi, 327 exploitations sur 819, ont été modélisées. De même, le nombre de chacune des classes a été calculé pour les deux zones afin que les proportions soient respectées. Il a d'ailleurs été trouvé que le nombre de parcelles d'agriculture pluviale pour la zone 2 était alors insuffisant pour le nombre d'exploitations définies. Il a donc fallu attribuer des parcelles de la zone 1 à des exploitants de la zone 2 ce qui démontre en quelque sorte une pression foncière entre les deux zones.

Classe	% de la pop.	Nb de parcelle de paddy	Nb de parcelle pluviale	Taille de la famille	Force de travail
C11	18%	2	1	3.5	2
C12	18%	2	0	3.5	2
C21	24%	3	0	4.5	2.5
C22	6%	3	2	4.5	2.5
C31	24%	2	2	5.0	3
C32	10%	0	2	5.0	3

Tableau 8 : Les 6 classes d'exploitations agricoles représentées dans CatchScape

3.2 La gestion agricole et le choix des cultures

3.2.1 Représentation des activités agricoles

Les activités agricoles sont représentées dans le modèle par rapport à la quantité de travail qu'elles nécessitent. Pour cela un calendrier agricole a été défini pour chacune des cultures et indique à chaque activité la quantité de travail nécessaire à sa réalisation (voir annexe). Il s'agit d'un planning fixe qui ne peut être décalé. Ainsi, lorsqu'une culture arrive à un stade X, déterminé par rapport au nombre de jours écoulés depuis la plantation, et si à ce stade le planning indique qu'une opération Y doit être exécutée, l'exploitant est obligé de fournir la quantité de travail requise pour cette activité. Si celui-ci n'a pas suffisamment de main d'œuvre dans son exploitation pour satisfaire les besoins en travail de l'ensemble de ces parcelles, il est obligé de faire appel à de la main d'œuvre extérieure qu'il paye. Les opérations agricoles qui sont représentées sont la préparation du sol, le semis (ou le repiquage pour le riz), la fertilisation et le désherbage qui sont regroupés en une même activité et répartis en deux ou trois périodes pendant la saison de culture, et enfin la récolte.

De même que les activités agricoles consomment du travail, elles sont également consommatrices de ressources financières. Au niveau du paiement des intrants (semences, fertilisants et produits phytosanitaires) une simplification a été réalisée. Le modèle considère que la totalité des coûts liés à la culture est payée en une seule fois lors de la plantation. Cette simplification oblige les agents à s'endetter en début de saison et également à choisir dès la plantation le niveau de fertilisation qu'ils vont appliquer à leur culture. Dans le système réel, les paysans vont parfois semer et ensuite vont acheter des intrants durant la campagne en fonction de leur trésorerie. Il existe donc une interaction directe entre l'argent disponible et le niveau de fertilisation qui, bien qu'elle soit présente dans le modèle en début de saison, n'apparaît pas dans le modèle au niveau de sa dynamique en cours de campagne. Le deuxième lien avec la ressource financière intervient lors de la vente de la production agricole. Pour cela, nous avons repris des cours historiques du district de Mae Chaem

qui donnent l'évolution des prix de vente des différentes cultures. Le modèle simule des variations de prix année après année mais les fluctuations intra-annuelles ne sont pas représentées. Ainsi, les décisions qui interviennent après la récolte concernant le moment de la vente en fonction des cours du marché ne sont pas prises en compte.

3.2.2 Le processus de décision du choix de culture

a) Pourquoi insister sur le choix des cultures dans cette modélisation

Alors que la modélisation des activités agricoles elle-même est relativement simplifiée comme nous venons de le voir, un soin tout particulier a été accordé à la modélisation du choix des cultures entreprises. En effet, les différents types de cultures ont des consommations en eau différentes définies en fonction des paramètres du module de bilan hydrique. Par exemple une culture d'oignons fortement fertilisée va consommer en moyenne 500 mm d'eau sur toute sa période de culture alors qu'un soja non fertilisé ne consommera que 220 mm. Ainsi, plus que les opérations agricoles, le choix des cultures aura beaucoup d'influence sur la gestion de l'eau. Par ailleurs, ce choix va aussi déterminer si une parcelle est mise en culture ou non. On comprend alors facilement la différence qui peut exister entre un périmètre de canal entièrement cultivé et un autre où seule la moitié des parcelles sont mises en cultures. Or c'est bien ce qui arrive durant la saison sèche dans le Mae Uam (Premier Chapitre : 1.5).

b) Arbre de décision et paramètres pris en compte

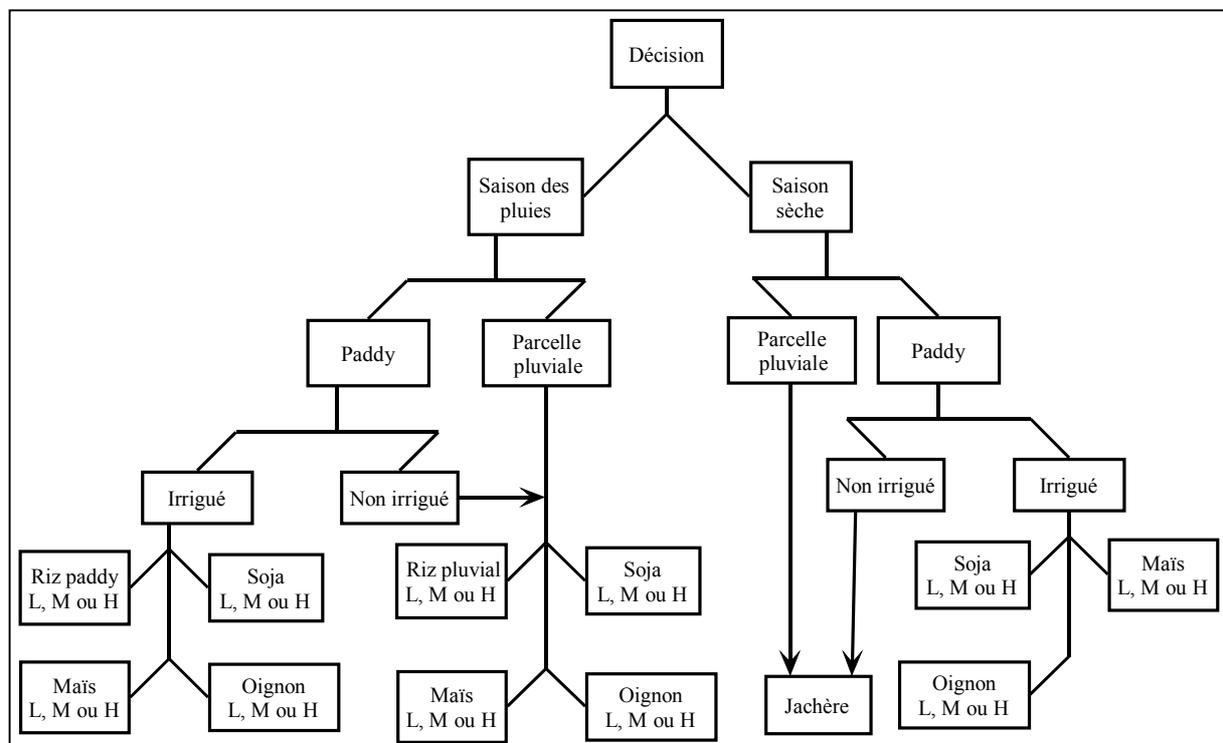


Figure 25 : Arbre de décision du choix des cultures

Afin de comprendre comment se fait ce choix, nous avons tout d'abord commencé par dresser l'arbre de décision qui détermine les cultures présentes sur le bassin. Celui-ci se divise tout d'abord en un assolement pour la saison des pluies et un deuxième pour la saison sèche. Ensuite, la décision de l'exploitant diffère suivant le type de parcelle sur laquelle il va semer. A ce niveau, suivant la possibilité qu'il a d'irriguer ou non sa parcelle, l'agriculteur va effectuer un choix entre quatre sortes de culture : le riz (irrigué ou pluvial), le soja, le maïs et une culture maraîchère, l'oignon. D'autre part pour chacune de ces cultures, il devra décider le niveau de fertilisation appliqué. En accord avec les paramètres du modèle bio-physique trois niveaux de fertilisation sont possibles : High, Medium ou Low. Comme on le voit sur la Figure 25, cet arbre a une structure très figée dans ses premiers échelons. L'agent n'a qu'à suivre le protocole pour déterminer dans quelle catégorie il se trouve. Cependant, le choix final entre les différentes cultures et leurs fertilisations est lui beaucoup plus ouvert et nous avons fait appel à la programmation linéaire pour le modéliser.

c) Analyse par Programmation Linéaire

L'objectif de cette analyse était de déterminer en fonction des ressources et contraintes des exploitants quelle était le choix de culture optimum du point de vue de la rentabilité de la production ; quitte à dégrader ce choix par la suite. Pour cela nous avons entré dans un modèle de programmation linéaire l'ensemble des ressources des exploitants : le nombre de parcelles, l'argent, la force de travail, la quantité d'eau d'irrigation disponible ; et les besoins en ressources de chacune des cultures à chacun des niveaux de fertilisation définis. Par ailleurs, l'agriculteur peut aussi utiliser de la main d'œuvre ouvrière qu'il rémunère et cela a été intégré au modèle de programmation linéaire. La matrice de ce modèle, dont la structure est représentée sur la Figure 26, a alors été résolue de manière à maximiser la marge finale (recettes moins dépenses).

		Choix possibles				
		Culture X, ferti, 1	Culture X, ferti, 2	Culture Y, ferti, 1
Recette			$X \$ / \text{kg} * \text{rendement maximum de la culture}$			
Nb de parcelles			<i>Nécessite 1 parcelle</i>			
Cash			<i>Coûte X \$</i>			
Force de travail			<i>Besoin de X qt de travail au pas de temps t</i>			
Eau disponible			<i>Nécessite X mm d'eau pour satisfaire toute sa demande évapotranspiratoire durant 1 cycle de culture</i>			

Figure 26 : Structure de la matrice de programmation linéaire (voir annexe pour la matrice complète)

Les solutions données par cette de l'analyse se sont révélées très peu variées. Tout d'abord il en ressort que le choix optimum est le même quelque soit le nombre de parcelle de l'agriculteur du moment que son cash/parcelle est identique. D'autre part il apparaît que la force de travail disponible par exploitant n'a aucune influence sur le choix optimum. En effet, bien qu'à certaines périodes, le travail nécessaire soit supérieur à la ressource disponible, le coût d'une unité de main d'œuvre supplémentaire est tel qu'il n'a pas beaucoup d'influence sur la marge de l'agriculteur. Le salaire d'un ouvrier agricole dans la Mae Uam est de 80 baht par jour alors que le bénéfice que peut espérer un agriculteur d'une culture de soja par exemple est d'environ 5000 baht. Ainsi le choix optimum est uniquement fonction de l'eau et du cash disponibles.

Suivant ces deux ressources, les solutions s'organisent de la façon suivante. Lorsque l'eau n'est pas limitante, le choix se fait entre une culture d'oignons et une culture de soja. Plus l'agriculteur a de cash plus il aura intérêt à cultiver de l'oignon et ce de manière exponentielle (Figure 27). Dans le cas contraire, lorsque l'eau devient une contrainte forte, le choix optimum est un compromis entre du soja et une jachère (pas de culture), avec une augmentation de la proportion de jachère lorsque le cash diminue (la matrice des solutions est donnée en annexe).

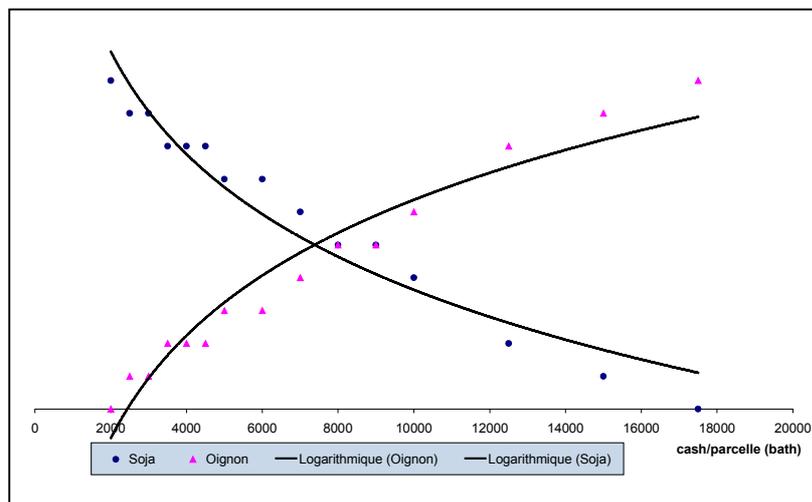


Figure 27 : Choix de culture optimum en fonction du cash lorsque l'eau n'est pas limitante

d) Processus de décision tel qu'il a été modélisé

L'analyse précédente montre en fait de grandes limites. Tout d'abord, aucune des solutions données par le modèle de programmation linéaire, ne correspond à une culture de riz. En effet, le choix pour la culture de riz ne dépend pas de la marge que peut en attendre un exploitant mais il est basé sur une stratégie de sécurité alimentaire. Ainsi ce choix représente une nécessité pour les exploitants du Mae Uam et ne pouvait pas être donné par la programmation linéaire telle que nous l'avons effectuée¹⁷. D'autre part les résultats donnés par l'analyse sont des pourcentages de chaque culture. Par exemple, pour un exploitant ayant 7000 baht et une parcelle sans contrainte d'irrigation, la solution trouvée est 50% d'oignons et 50% de soja. Or, CatchScape ne prend pas en compte des demi-parcelles. Enfin, certains paramètres comme la période de culture par rapport à une fin de saison proche, ne sont pas pris en compte.

Ces nouvelles contraintes mises en relief auraient alors pu être intégrées dans un nouveau modèle de programmation linéaire, néanmoins, nous avons choisi d'utiliser les solutions du modèle de programmation linéaire en l'état, comme choix initial des agriculteurs puis d'ajuster ce choix en fonction de nouvelles contraintes introduites directement dans le modèle multi-agents.

Le processus de décision se déroule donc comme suit :

Tout d'abord, lors de la saison des pluies l'agent agriculteur est contraint de choisir une culture de riz sur autant de parcelles qu'il faudra pour satisfaire la consommation annuelle de riz de toute sa famille. Pour cela, un stock de riz est défini comme paramètre de l'agent. Celui-ci se remplit lors de la récolte du riz et diminue au cours de l'année, plus ou moins rapidement en fonction de la taille de la famille. En début

¹⁷ D'autres modèles de programmation linéaire permettent de rendre compte de ce genre de choix en se basant sur des courbes d'utilités et non pas sur une fonction de gain.

de saison des pluies, l'exploitant regarde le stock de riz restant et évalue la quantité qu'il lui faudra pour tenir jusqu'à l'année suivante. Il en déduit alors le nombre de parcelles de riz nécessaires en fonction d'un rendement estimé. Si, à la suite de cela, il lui reste des parcelles non cultivées il base alors son choix sur les solutions de la programmation linéaire (choix économique). Par ailleurs, lors de la saison sèche le choix est toujours un choix économique.

Pour les choix économiques, les solutions de l'analyse précédente étant des pourcentages, nous avons traduit cela en un pourcentage de chance de choisir telle ou telle culture. De ce fait, la trésorerie de l'agent peut ne plus correspondre au choix effectué. C'est pourquoi une première contrainte de trésorerie a été introduite qui rectifie le choix initial. Ainsi lorsque la trésorerie est insuffisante, l'agent diminue le niveau de fertilisation envisagé ; si sa trésorerie n'est toujours pas suffisante il choisit alors une culture moins onéreuse. La deuxième contrainte introduite concerne les cultures de longue durée comme l'oignon. Cette contrainte oblige l'agent à choisir une culture à cycle court lorsque la mise en place de la culture est trop tardive. Enfin, la dernière contrainte est liée au travail. Même si la main d'œuvre n'est pas une contrainte économique importante dans ce type de système, les agents essaient d'optimiser leur calendrier de travail, tout du moins dans les premières périodes de cultures. Ainsi, la contrainte sur le travail oblige les agents à étaler leurs plantations sur plusieurs pas de temps afin de réduire le pic de travail en début de saison.

Par ailleurs, nous avons vu que le choix économique dépendait de la quantité d'eau disponible. Cette quantité est en fait une prévision que fait l'agent sur la quantité d'irrigation que pourra obtenir sa parcelle. Cette prévision est calculée pour chaque parcelle en fonction de la quantité d'eau d'irrigation qu'elle a reçue l'année précédente.

e) Conclusion et discussion

Le processus de décision tel qu'il a été modélisé montre un certain intérêt de par sa structure. En effet, les approches de modélisation dans les modèles individu-centré (Premier Chapitre : 2.2.4), utilisent souvent des fonctions de maximisation du profit en fonction des différentes ressources des agents. D'autres approches adoptent des solutions basées sur des croyances, des préférences ou encore des processus d'apprentissage. L'option qui a été prise ici est de combiner les deux à la fois. Le processus est structuré par une fonction optimale issue de la programmation linéaire, puis par une préférence pour la culture de riz, et enfin par des contraintes extérieures aux choix initiaux. Il s'apparente ainsi aux méthodes d'optimisations sous contraintes. Du point de vue de la rationalité des agents modélisés, le fait de donner une orientation à la décision vers un choix économique puis de le dégrader par la suite, fait également penser à la théorie de la rationalité limitée.

3.3 Les activités non-agricoles

Comme nous l'avons vu au Premier Chapitre : 1.3, les activités non-agricoles sont un facteur important dans l'économie du bassin et constituent une part importante du revenu des exploitants. Afin de les modéliser, les hypothèses suivantes ont été définies :

- Les activités non-agricoles se déroulent exclusivement durant la saison sèche, période à laquelle les travaux agricoles sont les moins importants.
- Elles ne concernent que le travail effectué en dehors du bassin (à la ville de Chiang Mai) où l'offre est considérée comme non limitée

A partir de ces points de départ nous avons cherché à rendre compte de deux choses. D'une part du fait que les différentes classes d'exploitations définies plus haut ont des revenus non-agricoles qui diffèrent et d'autre part du fait que ces activités ne sont entreprises que pour des exploitations où les revenus agricoles sont faibles.

Ainsi, pour chaque classe d'exploitation un nombre de pas de temps maximum dédié aux activités non-agricoles a été défini. Il correspond à la durée nécessaire à un membre de la famille pour obtenir un salaire correspondant au revenu non-agricole moyen de sa catégorie d'exploitation (voir analyse par grappes). Ainsi, lorsque dans le modèle, un membre (soit une unité de travail) est envoyé à la ville en début de saison sèche, il revient sur l'exploitation soit à la fin de la période prédéfinie soit en fin de saison sèche si sa période de travail n'est pas terminée à cette date. Par ailleurs, le salaire de l'ouvrier n'est ajouté au cash de la famille qu'à son retour sur l'exploitation. Mais le travail non-agricole n'est pas obligatoire dans le modèle. Il dépend du processus de décision qui détermine si oui ou non, un membre va être envoyé à la ville. Celui-ci intervient en début de saison sèche et se base sur la rentabilité d'une part des activités agricoles de saison sèche et d'autre part du travail à la ville. Pour ce faire, les agents mémorisent année après année les revenus obtenus à partir des cultures de saison sèche, constituent un revenu moyen agricole par unité de travail et le comparent au salaire maximum que pourrait obtenir cette unité de travail en travaillant à la ville. Lorsque l'activité non-agricole paraît être la plus avantageuse, un membre de l'exploitation est consacré à cette activité. Par ailleurs, afin de privilégier les exploitations à faible revenus, ces dernières peuvent envoyer un deuxième membre de leur famille travailler à la ville.

3.4 Les modes de gestion de l'eau

3.4.1 Différents niveaux de gestion modélisés

a) Niveau individuel

Comme indiqué au Premier Chapitre : 1.5.1, la gestion individuelle de l'irrigation se passe au niveau du nombre de piang que l'agriculteur décide de mettre sur sa parcelle irriguée. Celui-ci va conditionner la quantité d'eau d'irrigation qui sera reçue par la parcelle à chaque pas de temps. Le diamètre des piang a été calculé de manière à ce qu'un seul piang soit suffisant pour n'importe quel type de culture. D'autre part, le niveau collectif du canal représenté par son gestionnaire, impose normalement aux irrigants de n'utiliser qu'un seul piang. Toutefois ce paramètre est un attribut des parcelles et l'agent qui exploite une parcelle peut en modifier la valeur ce qui permet alors de simuler des tricheries.

Le modèle définit par défaut un piang par parcelle irriguée et aucune dynamique particulière concernant ce paramètre n'a été intégré dans la modélisation. Cependant, il peut être modifié par l'utilisateur qui pourra s'en servir pour construire des scénarios particuliers.

D'autre part, le niveau individuel de gestion concerne aussi la manière dont l'irrigant évalue les besoins en eau de ses cultures. Dans le système réel, les agriculteurs ont deux manières d'évaluer ce paramètre. Pour les parcelles irriguées de paddy, les agriculteurs évaluent le besoin des cultures à l'aide du niveau d'eau en surface. Nous rappelons à ce niveau que des parcelles de paddy sont délimitées par des talus et constituent donc des cuvettes dans lesquelles une lame d'eau se forme en surface. La

hauteur de cette lame d'eau est donc utilisée comme outil de gestion individuel et les agriculteurs vont jusqu'à créer des planning de hauteurs d'eau à respecter qui fluctuent en fonction des stades culturaux. La deuxième méthode utilisée par les agriculteurs du Nord Thaïlande pour évaluer les besoins en eau d'une culture repose sur son aspect visuel et notamment le flétrissement ou la turgescence du feuillage qui dépend du stress hydrique de la culture. Cette méthode d'évaluation concerne surtout les cultures non irriguées où il n'y a pas de lame d'eau en surface.

Or ces deux paramètres, lame d'eau et flétrissement, ne sont pas accessibles et ne sont pas représentés dans les modèles bio-physiques de CatchScape (§2.5). En effet, pour le premier paramètre, le modèle de bilan hydrique ne représente pas de réservoir de surface. Pour prendre en compte le deuxième paramètre il faudrait intégrer un nouveau modèle se basant sur la dynamique eau-sol-plante, et notamment le potentiel hydrique de la plante, qui est plutôt du ressort du champ agronomique.

Dans l'état actuel du modèle, nous avons donc pris l'option suivante. Afin d'évaluer les besoins en eau des cultures, l'agent agriculteur modélisé va lire dans l'objet culture le niveau d'eau du réservoir racinaire défini par le modèle de bilan hydrique. En dessous, d'une valeur critique de ce réservoir, l'agent est considéré comme insatisfait, au dessus, il est satisfait. Lorsque pour une même parcelle, l'agent a été insatisfait trois fois de suite, un message est envoyé à l'agent gestionnaire de canal, l'informant du manque d'eau chronique que subit la parcelle concernée.

L'option de modélisation qui vient d'être décrite repose sur deux hypothèses. D'une part le fait que l'agent agriculteur a une connaissance pleine et parfaite du niveau d'eau dans le réservoir racinaire et d'autre part le fait qu'il prend connaissance du besoin en eau de ses cultures à chaque pas de temps. Concernant cette deuxième hypothèse, à l'échelle journalière elle n'est pas vérifiée pour notre cas d'étude, cependant le pas de temps considéré est de 10 jours et à cette échelle l'hypothèse est tout à fait raisonnable (dans la plupart des cas, les paysans se rendent au minimum une fois par semaine sur leurs parcelles). Concernant la première hypothèse elle n'est bien entendue pas vérifiée sur le terrain. Il est dur d'imaginer les exploitants thaïlandais en train de sonder leurs parcelles tous les 10 jours à l'aide d'un piézomètre ou d'un autre instrument ! En réalité cette hypothèse traduit la limite forte du modèle qui été évoqué plus haut et qui est relative à l'incapacité actuelle de CatchScape à fournir aux agents les bons paramètres de gestion en matière d'évaluation des besoins hydriques des cultures.

A ce propos, une amélioration du modèle de bilan hydrique est proposée en annexe, permettant de simuler un réservoir de surface. Cette amélioration pourra également servir à surmonter les limites évoquées dans les chapitres II.2.2.3 et II.2.3.4. Toutefois, celle-ci demande à être testée et simulée et ses résultats doivent être comparés à ceux de la version actuelle.

b) Niveau collectif

Rappelons tout d'abord que la gestion collective passe par les agents gestionnaires de canal dont l'instrument de régulation est le niveau de diversion d'eau de la rivière vers le canal. Afin d'ajuster ce paramètre, ces derniers utilisent deux critères. Tout d'abord, ils définissent le besoin en eau du canal. Pour cela, ils ont accès au nombre de parcelles cultivées dans leur canal. Ils supposent alors que chaque parcelle est munie d'un piang dont ils connaissent le diamètre. Ils peuvent ainsi calculer à chaque pas de temps la quantité d'eau supposée, nécessaire pour l'irrigation du canal et

ajuster la diversion du barrage en fonction. Le deuxième élément dont dispose le gestionnaire dans le modèle est le taux de satisfaction des agriculteurs de son canal. Le gestionnaire considère qu'un agriculteur est insatisfait que lorsque celui-ci l'en informe comme cela a été défini dans le paragraphe précédent. Le taux de satisfaction correspond alors au nombre de parcelles dont l'agriculteur est satisfait sur le nombre de parcelles total cultivées dans le canal.

Par ailleurs, comme nous l'avons montré au §1.1.3, les six canaux du bassin sont organisés par paire. A savoir que les canaux 1 et 2 constituent une paire, les canaux 3 et 4 une autre et les canaux 5 et 6 une dernière paire. Ainsi, chaque paire possède un canal amont et un canal aval. Comme nous l'avons vu au Premier Chapitre : 1.5.2c), l'un des niveaux de la gestion collective s'effectue entre les deux canaux d'une paire. Entre ces canaux la collaboration propre à la gestion de l'eau est plus aisée que si elle devait se faire entre des canaux de paires différentes. A partir de ces éléments du monde réel, la modélisation de la gestion collective a été organisée comme suit (voir également la Figure 28) :

Durant la saison des pluies :

Aucune règle d'allocation de l'eau n'est définie. Chaque gestionnaire de canal calcule le niveau de diversion du canal de façon à satisfaire le besoin en eau du canal et au delà (une marge de sécurité est ajoutée au besoin total du canal)

Durant la saison sèche :

➤ Début de la saison sèche, phase de sécheresse n°1 :

Les gestionnaires de canal calculent la diversion des barrages de façon à satisfaire l'ensemble des besoins de leur canal respectif.

- Si le niveau de satisfaction d'un canal situé en aval dans une paire (n°2, 4 ou 6) passe en dessous d'une valeur critique (moins de 80% d'agriculteurs satisfaits), un tour d'eau s'engage alors entre les deux canaux de la paire considérée. Pour cela, au pas de temps suivant le canal amont ne prélève rien dans la rivière alors que celui de l'aval prélève de façon à satisfaire l'ensemble de ses besoins en eau. Au suivant pas de temps les rôles s'inversent et ainsi de suite jusqu'à la fin de la saison sèche ou avant si la quantité d'eau dans la rivière remonte brusquement.
- Si le niveau de satisfaction d'un canal situé en amont dans une paire, passe en dessous d'une valeur critique (moins de 80% d'agriculteurs satisfaits), alors :
 - Si il s'agit du canal 5, son gestionnaire négocie alors avec les gestionnaires des canaux de la zone 2 pour entrer dans une phase de sécheresse n°2 mais uniquement au niveau de la zone 2.
 - Si il s'agit du canal 3, son gestionnaire négocie alors avec les gestionnaires des canaux de la zone 1 pour entrer dans une phase de sécheresse n°2 au niveau de l'ensemble du bassin.
 - Si il s'agit du canal 1 rien ne se passe car il se situe le plus en amont dans le système.

➤ Phase de sécheresse n°2 :

Lorsque les gestionnaires de canaux se sont mis d'accord pour entrer dans une phase de sécheresse n°2 (le processus de négociation aboutissant à cette accord est décrit au paragraphe suivant), ils diminuent alors leurs prélèvements en eau de manière à ne satisfaire qu'une partie des besoins en eau de leur canal. Cette restriction ne s'arrête ensuite qu'à la fin de la saison sèche.

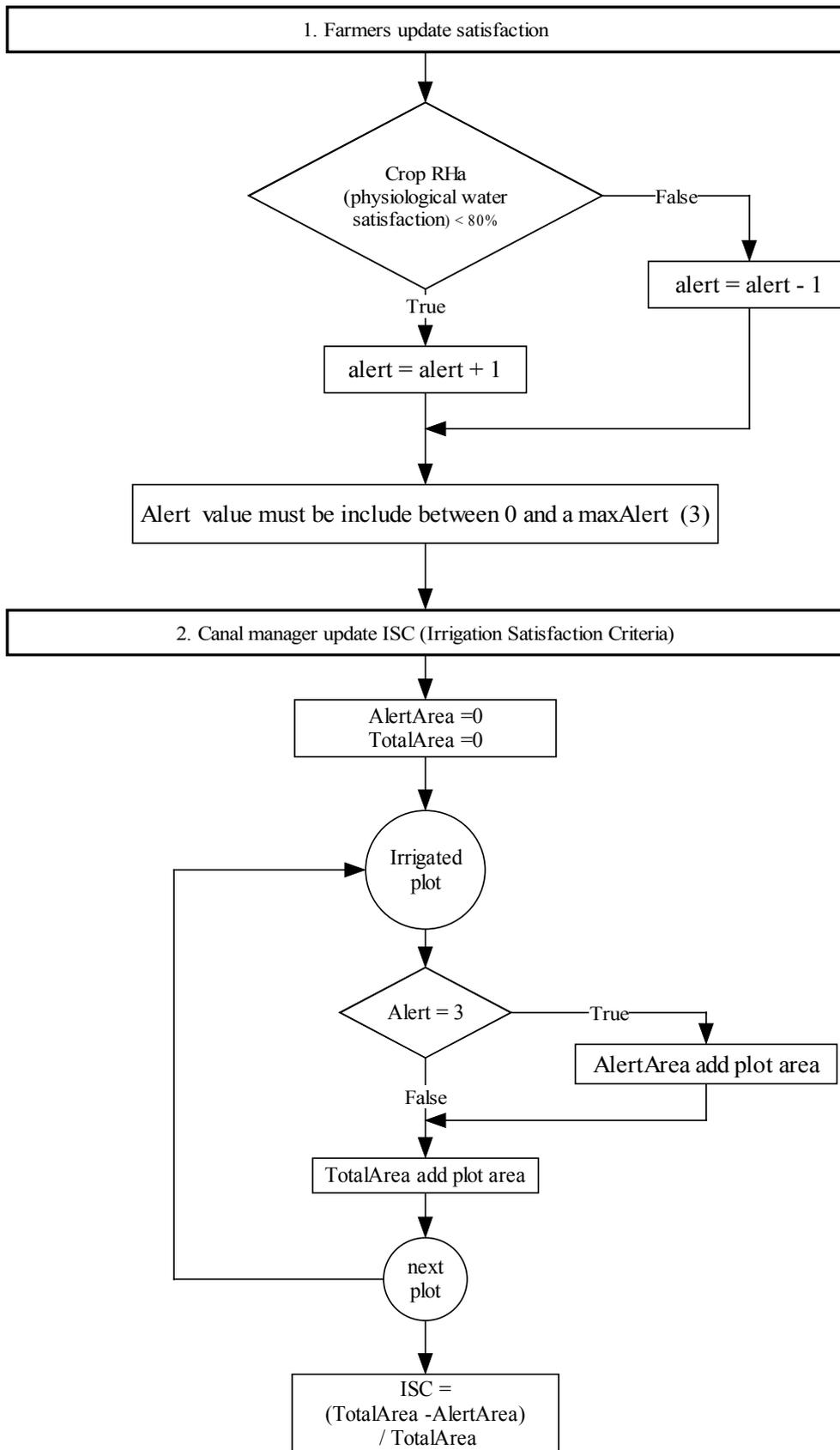
3.4.2 Processus de négociation

a) Description du processus

La négociation entre les gestionnaires de canaux se déroule de la façon suivante (voir également la Figure 28). Dans un premier temps l'ensemble des gestionnaires envoient leurs requêtes de tour d'eau ou de partage de l'eau, suivant les règles préalablement définies. Ensuite, les agents gestionnaires traitent ces requêtes en fonction de leur position dans le périmètre.

- Si, un gestionnaire reçoit une requête pour débiter un tour d'eau au niveau de sa paire de canaux, il est obligé de répondre positivement.
- Si, un gestionnaire reçoit une requête pour entrer en phase de sécheresse n°2, alors il évalue le niveau de satisfaction de son canal ainsi que celui du demandeur de la requête. Lorsque le niveau de satisfaction du demandeur est supérieur à un certain pourcentage de son propre niveau de satisfaction, alors il refuse de partager la ressource en eau. Le pourcentage précédent est en fait le critère de négociation utilisé par les gestionnaires. Si maintenant le niveau de satisfaction du demandeur est en dessous du critère de négociation alors, le gestionnaire accepte d'entrer dans une phase de sécheresse n° 2 et diminue sa prise d'eau de façon à ne satisfaire qu'un certain pourcentage de ses besoins en eau. Ce dernier pourcentage est le niveau de partage.

Par ailleurs suivant le type de partage qui est demandé (au niveau de la zone 2 uniquement ou sur l'ensemble du bassin), le critère de négociation et le niveau de partage vont changer. Le modèle prend ici l'hypothèse que la négociation est plus facile au sein d'une même zone (la zone 2 en l'occurrence) qu'entre deux zones différentes. Ces pourquoi les deux paramètres précédents vont faciliter la négociation et augmenter le niveau de partage lors de négociations intra-zone et, au contraire, durcir les négociations et diminuer le niveau de partage lors de négociations inter-zone.



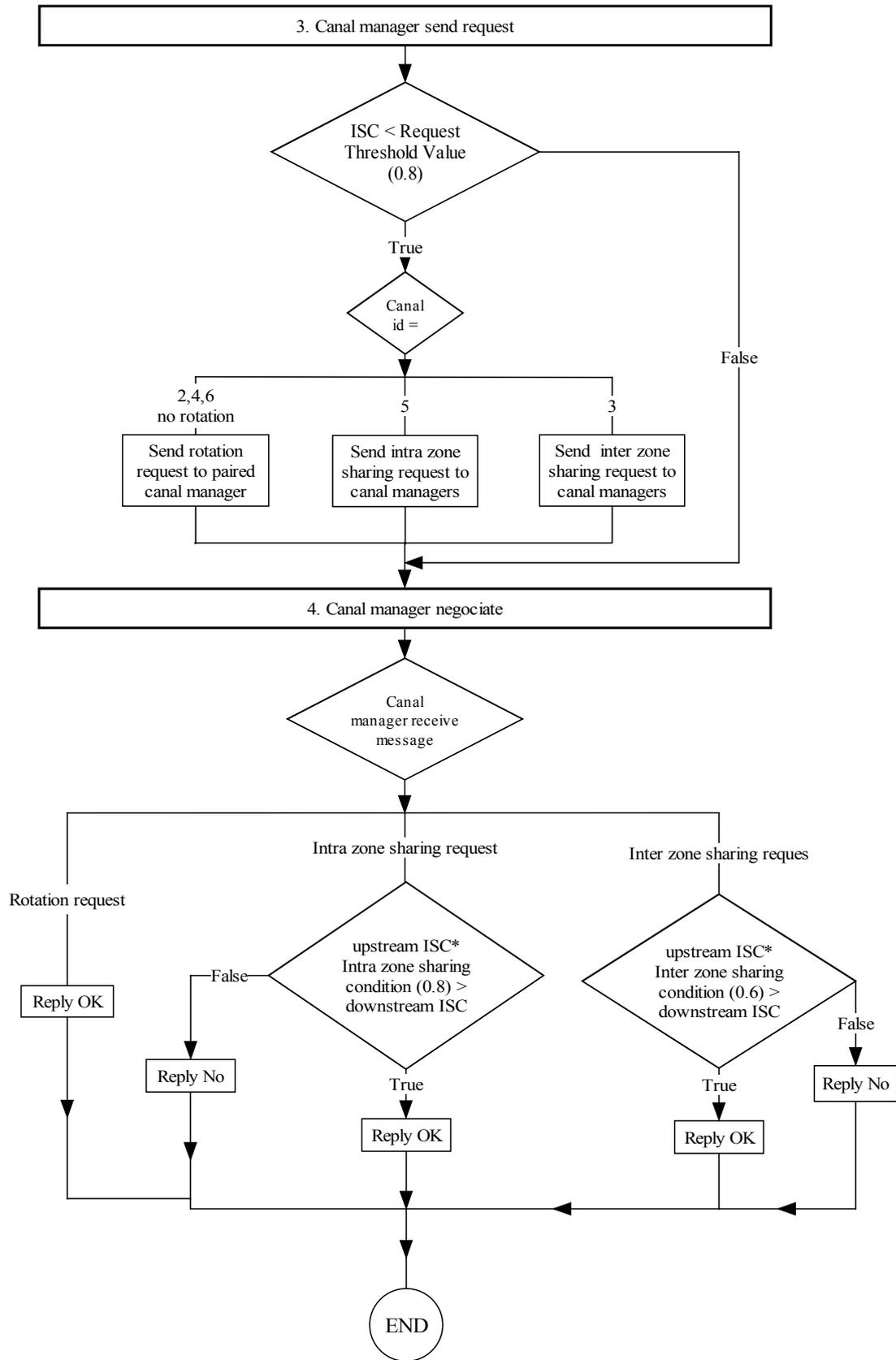


Figure 28 : Diagramme d'activité de la gestion de l'eau : Évaluation du niveau de satisfaction et négociation

b) Intérêts et limites

Le processus que nous venons de présenter permet de décrire différents niveaux de gestion et de collaboration entre les canaux suivant qu'ils sont organisés par paire, par zone ou par bassin. Cependant, les critères sur lesquels sont basées les négociations, n'ont pas d'équivalent dans le système réel et ne servent qu'à reproduire ce que l'on observe de manière globale sur le bassin. Nous utilisons donc un protocole différent de ce qui est pratiqué en réalité mais nous arrivons néanmoins à respecter la dynamique du système de gestion.

Par ailleurs, la façon dont a été modélisée le processus de négociations est relativement simple comparée à ce qui se fait habituellement en modélisation (Premier Chapitre : 2.2.4). En effet, un seul aller-retour de négociation est simulé (requête-décision-réponse) et, d'autre part, la négociation représentée est unilatérale puisque le canal situé en aval n'a rien à négocier en échange. Le seul point apportant de l'hétérogénéité dans cette négociation est une notion de préférence qui avantage les demandeurs venant d'une même zone que celle du récepteur de la requête.

3.5 La dynamique foncière et usage de la forêt

L'espace du modèle n'est pas un environnement figé. Il peut évoluer en fonction d'actions entreprises par les agents relatives à la dynamique foncière.

3.5.1 Représentation des dynamiques foncières

a) Achat de terre

La première possibilité qui est offerte aux agents agriculteurs est l'achat de nouvelles parcelles. Pour cela, le modèle met à disposition des agents les parcelles libres (qui n'ont pas encore été exploitées par aucun des agents du modèle) de la grille. En effet, les 327 agents du modèle définis plus haut n'utilisent pas l'ensemble des parcelles du modèle comme on le voit sur le Tableau 9. Ainsi un certain nombre de parcelles par zone et pour chaque catégorie d'occupation du sol restent libres et peuvent être achetées par les agents. Deux contraintes viennent alors limiter les achats : d'une part l'offre qui comme on vient de le voir est limitée par la taille de la grille, et d'autre part par le prix. Les prix des parcelles ont été fixés en fonction de valeurs moyennes de la zone provenant d'estimations faites à dire d'experts, cependant, elles n'ont pas pu être vérifiées avec précision sur place. Par ailleurs, l'hypothèse a été faite que la pression foncière sur les parcelles de paddy était supérieure dans la zone 2 et qu'ainsi le prix des parcelles de paddy dans cette zone était supérieure à celui de la zone 1.

	Parcelles de paddy utilisées par les agents à l'initialisation	Parcelles pluviales utilisées par les agents à l'initialisation	Parcelles de paddy définies par la grille	Parcelles pluviales définies par la grille	% de paddy utilisé	% de parcelles pluviales utilisées
Zone 1	217	188	228	378	95%	50%
Zone 2	468	132	514	132	91%	100%

Tableau 9 : Parcelles utilisées à l'initialisation et parcelles libres

A partir de ces contraintes, les agents ont alors la possibilité en début de saison des pluies, au moment où leur trésorerie est au plus haut, d'acheter des parcelles à la condition d'avoir suffisamment d'argent. Ils ne sont pas autorisés à s'endetter et doivent par ailleurs se garder une certaine marge financière pour pouvoir payer les frais de mise en culture de la saison des pluies.

b) Installation d'équipements pour l'irrigation

Ce module correspond à une dynamique du système réel que nous n'avons pas abordé dans le Premier Chapitre : 1.6.3, c'est pourquoi nous la détaillons à présent. Elle consiste dans l'installation d'équipements d'irrigation sur les parcelles habituellement non irriguées. Plus précisément les agriculteurs du district du Mae Chaem, achètent parfois des pompes à moteurs servant à pomper l'eau de la rivière puis à l'acheminer jusqu'à leurs parcelles au moyen de long tuyaux de bambou. Cette irrigation est donc annexe au système d'irrigation gravitaire traditionnel des zones de paddy. Les agriculteurs qui font de telles installations s'en servent pour pouvoir cultiver lors de la saison sèche sur des parcelles n'appartenant à un périmètre. Les cultures entreprises sont alors souvent des cultures à haute valeur ajoutée de manière à rentabiliser le plus vite possible l'achat des équipements d'irrigation. Ce type d'installation se rencontre très peu dans le bassin du Mae Uam mais cela est plus fréquent dans des bassins plus riches et plus modernes du point de vue de leur agriculture. Néanmoins, cette dynamique et ses effets peuvent paraître intéressants à modéliser c'est pourquoi nous avons voulu représenter cette dynamique dans le modèle.

Afin de représenter ce système dans le modèle, les agents ont la possibilité de transformer leurs parcelles pluviales en parcelles irriguées, à la condition d'avoir suffisamment d'argent. Une fois qu'une parcelle a été transformée elle reçoit de l'eau d'irrigation directement de la rivière sans passer par le système de canaux. Cette eau provient de l'amont du périmètre de rattachement de la parcelle. Ainsi, les parcelles transformées sont irriguées les premières et ont la priorité sur les parcelles de paddy. Toutefois, la transformation de parcelles pluviales est limitée par deux systèmes : tout d'abord le coût de l'équipement d'irrigation (pompe plus canalisation de bambou) que l'agent doit fournir directement sans pouvoir s'endetter, et d'autre part l'autorisation du comité de village (§3.1.1) que l'agent doit obtenir pour pouvoir effectuer l'opération. Cette deuxième limite est une hypothèse du modèle et demande à être vérifiée par la suite. Toutefois elle a été introduite dans la modélisation et se base sur un pourcentage maximum de parcelles pluviales qui peuvent être transformées.

4 Architecture du modèle et déroulement d'une séquence

4.1 Initialisation et lancement du modèle

La plate-forme Cormas sur laquelle a été construit le modèle prévoit une phase d'initialisation et une phase de lancement de la simulation. Cette dernière fonctionne pas à pas, à savoir qu'à chaque pas de temps, les méthodes et procédures écrites dans le modèle sont exécutées. Ce qui change à chaque pas de temps est en fait les valeurs des attributs des objets comme la trésorerie ou le volume d'eau dans la rivière.

Le pas de temps correspond à une décade et il a été choisi de définir 36 décades par année. Le premier pas de temps correspond à la période du 1er au 10 Avril, soit le début de la saison des pluies en Thaïlande. Néanmoins, les premières pluies n'arrivent pas chaque année à la même date, c'est pourquoi les agents du modèle considèrent que la saison des pluies commence lorsque 50 mm de pluies cumulées sont tombés depuis le 1^{er} Avril. A partir de cette date mobile, les agents peuvent

commencer à cultiver. Le début de la saison sèche est également mobile dans le modèle et il est fixé individuellement par chaque agent. Chaque agent-agriculteur considère que la saison sèche a commencé lorsqu'il a récolté sa dernière culture de saison des pluies. Ainsi une certaine hétérogénéité temporelle est donnée au démarrage des cultures de saison sèche. Lorsque le modèle arrive à la fin de la 36^{ème} décennie de l'année, le modèle considère que c'est la fin de la saison sèche et les cultures ainsi que certains paramètres des agents sont ré-initialisés afin d'entamer une nouvelle saison des pluies.

4.2 Organisation d'un pas de temps

4.2.1 Intérêts du séquençage choisi

L'organisation générale d'un pas de temps se fait dans l'ordre suivant : la dynamique bio-physique est activée en premier, puis dans un deuxième temps, les agents-agriculteurs font le bilan de ce qui s'est produit sur leurs parcelles, estiment si ils sont satisfaits de l'irrigation obtenue, en informent ensuite le gestionnaire de canal qui à son tour fait un bilan en fonction duquel il va prendre des décisions, négocier et ajuster le niveau de diversion de son barrage pour le prochain pas de temps. Ainsi, les décisions des agents sont prises par rapport à un état antérieur de leur environnement et pourront éventuellement être mal adaptées par rapport à son état actuel. Ce système permet en quelque sorte de simuler les décisions décalées des agriculteurs qui ont été proposées par Sébillotte et Soler (Premier Chapitre : 2.2.4b).

4.2.2 Déroulement en sept étapes

Le pas de temps du modèle est divisé en sept étapes comme indiqué sur la Figure 29.

1. La première phase est une phase d'initialisation. Les paramètres concernés sont soit des paramètres spécifiques de la programmation soit des paramètres liés aux choix des agents du pas de temps précédents et qui doivent être actualisés.
2. La deuxième phase est activée uniquement lorsqu'un choix de culture doit être effectué. Comme nous l'avons expliqué précédemment ce choix est fonction des ressources disponibles de l'agriculteur.
3. La troisième phase correspond aux activités agricoles et non-agricoles que les agents doivent entreprendre. Ces activités dépendent des choix antérieurs des agents et cette phase ne sert qu'à les exécuter. D'autre part, une partie de la dynamique du cash est activée à cette phase ; à savoir le paiement des dépenses courantes des familles et l'achat de riz pour l'alimentation lorsque le stock de riz de l'agent concerné est vide.
4. La phase suivante correspond à la dynamique bio-physique. Dans un premier temps le modèle calcule le bilan hydrique des parcelles non irriguées. Puis, le modèle hydraulique distribue l'eau d'irrigation aux parcelles de paddy dont le bilan hydrique est ensuite calculé.
5. La cinquième phase est activée uniquement lorsque des cultures sont arrivées à maturité pour la récolte ou lorsque l'année s'achève forçant alors les agents à anticiper leurs récoltes. Cette phase de récolte commence d'abord par le calcul du rendement via le modèle bio-physique puis par la vente de la récolte et éventuellement le stockage d'une partie du riz pour l'alimentation des familles. C'est également à cette phase que les agents mémorisent la somme d'irrigation et le revenu agricole obtenus, qui seront utilisés dans les processus de décision de la saison ou de l'année suivante.

6. La phase six est celle de la gestion de l'irrigation. L'information concernant le niveau d'irrigation des parcelles remonte jusqu'aux gestionnaires des canaux qui vont alors négocier et décider du nouveau taux de diversion du pas de temps suivant.
7. Enfin, la dernière phase correspond à la dynamique foncière qui se déroule comme expliquée dans le chapitre précédent.

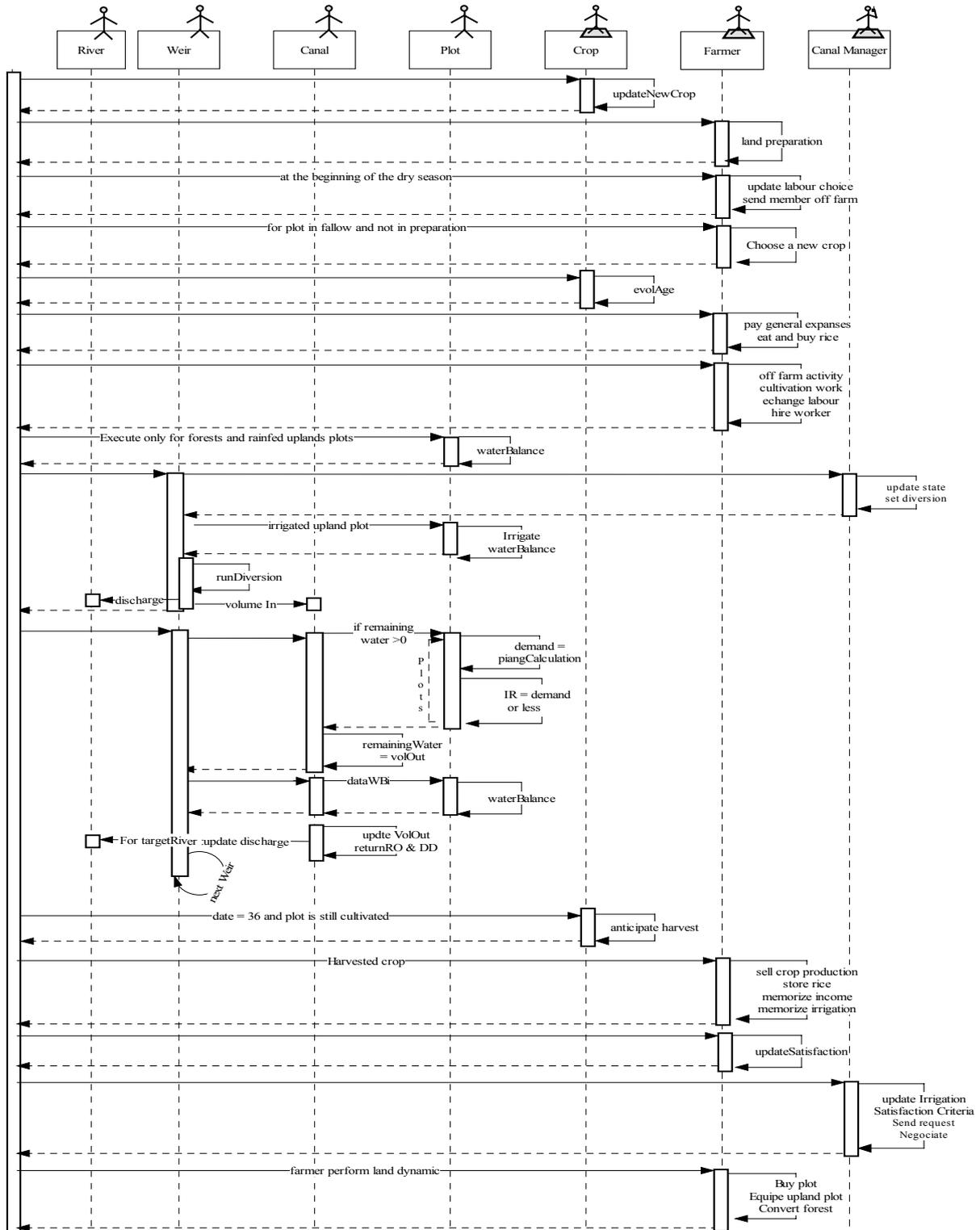


Figure 29 : Diagramme de séquence de CatchScape

4.2.3 Organisation des dynamiques du modèle

Outre son intérêt pour visualiser de manière synthétique le déroulement d'un pas de temps, la Figure 30 permet de se rendre compte comment les différents modules du modèle s'organisent. En effet, les dynamiques des agents du modèle ont été construites en partant des ressources dont ils disposent (eau, travail, argent et foncier) et en définissant leurs usages. Ainsi chacun des procédures du modèle concernent l'une ou l'autre de ces ressources et on retrouve cette organisation dans la Figure 30 (la ressource en eau correspond à la colonne irrigation). On y retrouve également une colonne correspondant à la dynamique bio-physique et une colonne liée aux activités agricoles. Les boîtes de ce diagramme indiquent les usages ou les actions faites par les agents ; les flèches représentent en quelque sorte les agents eux mêmes.

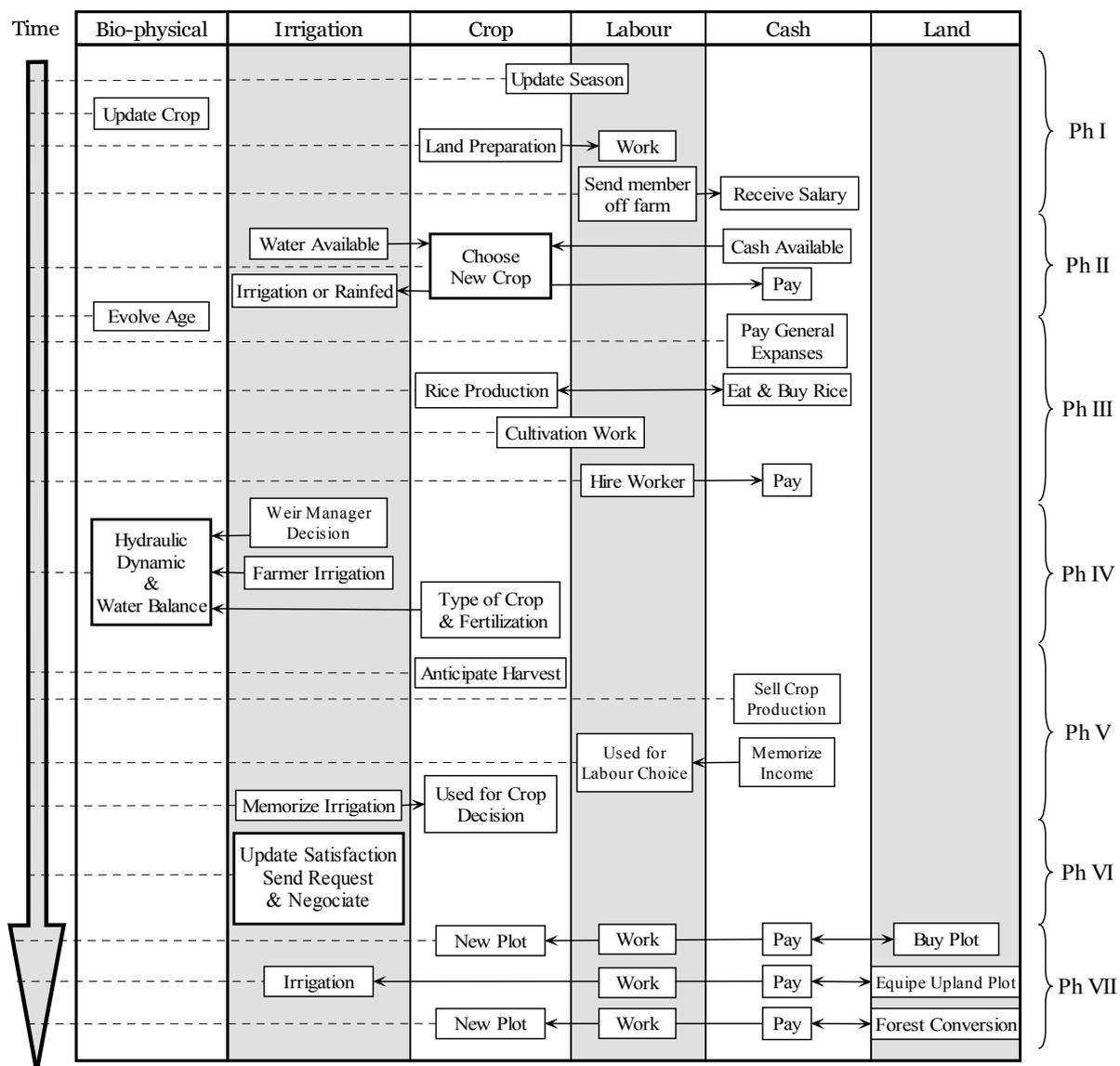


Figure 30 : Architecture du modèle par catégories de dynamiques et de ressources

Comme le montre cette figure, l'architecture du modèle n'est pas qu'une simple succession de modules l'un après l'autre mais au contraire elle constitue un entrelacement des différentes dynamiques rendant compte des interactions existantes entre la dynamique bio-physique et la dynamique sociale d'une part et au

sein de la dynamique sociale d'autre part. Ce type de figure est donc une représentation intéressante pour percevoir et étudier la façon dont sont intégrées les différentes composantes.

Par exemple, on s'aperçoit que les dynamiques bio-physique et foncière sont toutes deux relativement indépendantes du reste du modèle. Cela peut être intéressant si un utilisateur veut concevoir des scénarios sans dynamique foncière par exemple. Concernant la dynamique bio-physique, la Figure 30 montre que ses seuls liens avec les autres modules sont les décisions du gestionnaire de canal, celles de la gestion individuelle et les assolements choisis par les agents-agriculteurs. Cela peut paraître relativement limité au regard de la complexité et de la diversité des différentes dynamiques du modèle. D'autres liens pourraient être intégrés comme par exemple des phénomènes d'érosion créant un lien entre la dynamique foncière et les phénomènes bio-physiques.

5 *Modes d'utilisations de CatchScape*

5.1 Simulations et scénarios

CatchScape est un modèle de simulation et non un modèle d'optimisation. Ainsi, son utilisation passe par une approche exploratoire qui vise à étudier le système réel au travers du système artificiel (Bousquet et al., 1999). Cette exploration passe alors par des scénarios que l'on formalise puis que l'on simule à l'aide du modèle. Les résultats de ces simulations peuvent poser de nouvelles questions que l'on cherchera à tester sous la forme de nouveaux scénarios.

Deux types d'exploration du système via les simulations peuvent être envisagés avec un outil comme CatchScape. Le premier est une utilisation plutôt classique où l'on simule selon un protocole bien défini, puis on récolte les résultats à la fin de la simulation sous forme de données numériques que l'on analyse. La deuxième est un peu plus spécifique des applications développées sous la plate-forme Cormas et consiste à observer l'évolution du système durant la simulation à l'aide d'une fenêtre de visualisation de l'espace sur laquelle on applique différents points de vue selon ce que l'on souhaite observer.

5.2 Utilisation classique

Le protocole de simulation de CatchScape sous sa forme classique est le suivant :

- Les scénarios sont simulés sur **une période de 10 ans**. Le choix de cette période correspond à certaines limites du modèle. La première est le fait que la dynamique de la population du point de vue de sa croissance (naissance, décès, ...) n'est pas représentée dans le modèle. Or il est vraisemblable de supposer qu'après une période de 10 ans, ce facteur commence à avoir un poids non négligeable sur le système. De même, le renouvellement des exploitations agricoles et la création de nouvelles exploitations n'ont pas été modélisés et constitueraient un biais dans des simulations à plus long terme. Ainsi, le modèle est supposé valable sur des phénomènes à court terme mais non adapté à des tendances sur plusieurs décennies.
- Le deuxième point de ce protocole consiste à **répéter 20 fois chaque scénario**. L'objectif est d'obtenir un jeu de résultats suffisamment important pour que l'on puisse le traiter de manière statistique. Souvent la statistique

considère qu'un échantillon de 30 individus est un minimum pour pouvoir effectuer une analyse statistique. Cependant étant donné les temps de simulation importants, nous avons opté dans un premier temps pour 20 répétitions en gardant à l'esprit que cela demandera à être discuté au vu des résultats obtenus.

D'autre part, le temps de calcul est de 40 minutes pour effectuer 10 ans de simulation sur un Pentium II, ce qui ramène à environ 13 heures le temps pour effectuer un scénario selon le protocole ci-dessus.

En fin de simulation, les résultats sont donnés sous la forme de tableaux de données utilisables sur un tableur classique. Le fichier de sortie d'un scénario (20 répétitions) pèse environ 3 Méga Octets mais contient un grand nombre de variables. Ces dernières vont du revenu moyen des exploitations aux débits dans les canaux et leurs valeurs sont enregistrées pour chaque pas de temps. Des résultats de simulations seront montrés en troisième partie.

5.3 Utilisation de points de vue

Comme nous l'avons indiqué dans le Premier Chapitre : 2.2.3, les points de vue sont une fonctionnalité de Cormas. Ils permettent d'observer sur un même espace, des caractéristiques ou des variables différentes. Plusieurs points de vues ont été intégrés dans le modèle permettant d'observer différents aspects. Nous en présentons ici quelques uns, puis nous commentons les atouts de cette approche pour l'aide à la négociation.

5.3.1 Quelques exemples

a) Vue des assolements du bassin

Ce point de vue reflète l'assolement du bassin en montrant pour chaque parcelle le type de culture qui est cultivé. Il permet ainsi de suivre année après année l'évolution de l'assolement et son organisation au sein des différents périmètres et canaux du système. Au début d'une simulation l'assolement de la saison des pluies ressemble à la Figure 31. Comme on peut le voir, l'ensemble de la zone de paddy est cultivée par du riz (vert clair) alors que sur les parcelles pluviales on trouve soit du riz (vert tendre) soit du soja (marron). Les cultures de soja proviennent de paysans dont le nombre de parcelles est suffisant pour diversifier leurs plantations dès la saison des pluies. Par ailleurs on peut apercevoir également un nombre non négligeable de parcelles vides qui sont en fait recouvertes d'une jachère. Ces parcelles correspondent à des terrains qui n'appartiennent à aucun agent comme le montre la Figure 32.

Durant la même année l'assolement de la saison sèche est totalement différent (Figure 33). Tout d'abord, seule la zone de paddy est cultivée étant donné qu'elle est la seule zone irriguée. Ensuite on notera que seul du soja est cultivé étant donné que les agents n'ont pas besoin de cultiver du riz pendant cette saison, et qu'à ce stade de la simulation les agents n'ont pas encore suffisamment de trésorerie pour cultiver des cultures de rente plus chères. Les années qui suivent l'assolement de la saison de pluies ne change pas énormément (Figure 34). On constate toujours une forte dominance de la culture de riz mais également une légère diversification sur les parcelles pluviales notamment avec l'apparition de cultures d'oignons (en rouge).

Par contre l'assolement de la saison sèche se modifie année après année. Son évolution est dû en grande partie à l'adaptation des agriculteurs au niveau d'eau

disponible pour leurs parcelles. Cette disponibilité dépend du canal dans lequel se trouve la parcelle et de sa position dans ce canal. D'autre part les revenus des exploitants et leurs trésoreries évoluant au fur et à mesure du temps, les choix des agents se diversifient de plus en plus. En observant le point de vue des cultures année après année on peut alors avoir un aperçu de cette évolution (Figure 35).

b) Vues des périmètres irrigués et du stress hydrique des cultures

Un point de vue sur les périmètres irrigués et les six canaux a été créé afin de pouvoir suivre l'évolution des débits passants dans la rivière et dans les canaux. D'autre part il est possible de suivre le niveau de la réserve en eau du réservoir racinaire des cellules au moyen d'un deuxième point de vue. Ce dernier donne ainsi une indication sur le niveau de stress de cultures. Les réservoirs racinaires fluctuent en fonction des apports en eau de pluie, de l'irrigation, du type de culture et des types de sols. Comme on peut le voir sur la Figure 36, lors de la saison des pluies, les débits des canaux et de la rivière sont tous à leur maximum et le système est homogène à ce niveau. De même, les niveaux des réservoirs racinaires sont élevés (Figure 37) et montrent une certaine hétérogénéité due aux différents types de sol du bassin.

Au cours de la saison sèche, ces points de vue deviennent beaucoup plus intéressants. En effet, ils permettent de suivre pas à pas l'avancement dans la saison au travers de la diminution des débits (Figure 38). On voit alors apparaître dès le début de saison une certaine inégalité entre les canaux qui devient plus marquée en fin de saison.

Le point de vue sur la réserve hydrique du sol durant cette même période (Figure 39), donne une vision en temps réel des conséquences de cette sécheresse. On voit ainsi que les cellules qui ne sont pas irriguées sont complètement asséchées en fin de saison, et ce, de façon plus ou moins rapide suivant le type de sol. D'autre part on s'aperçoit que le niveau d'eau dans le réservoir racinaire des parcelles irriguées se maintient à un niveau correct en moyenne. Cependant, il démontre une forte inégalité entre les canaux situés à l'amont et ceux situés à l'aval, ainsi qu'au sein d'un même canal.

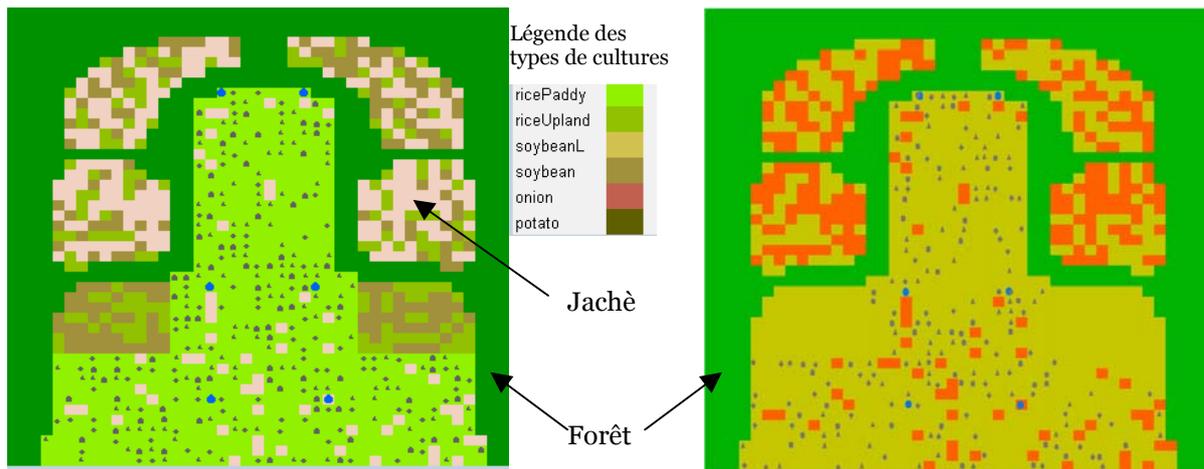


Figure 31 : Assolement de 1ère année lors de la saison des pluies

Figure 32 : Parcelles en propriété (en marron) et parcelles libres (en rouge)

Nota : Les points gris situés de par et d'autre de la grille représentent les agents-agriculteurs alors que les six gros points bleus positionnés à intervalles réguliers sur la zone de paddy représentent les gestionnaires de canaux

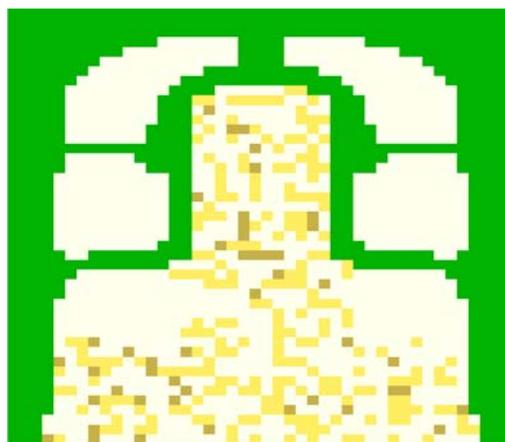


Figure 33 : Assolement de 1ère année lors de la saison sèche

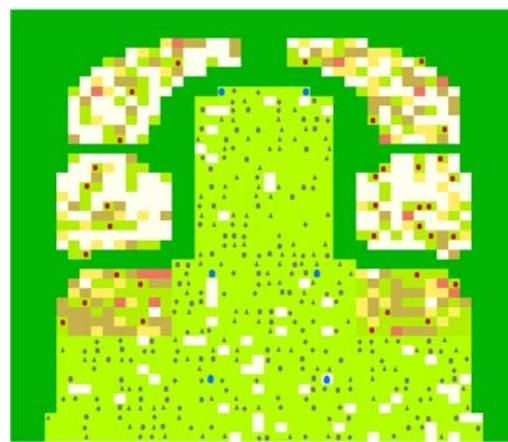


Figure 34 : Assolement de la saison des pluies de la 5ème année

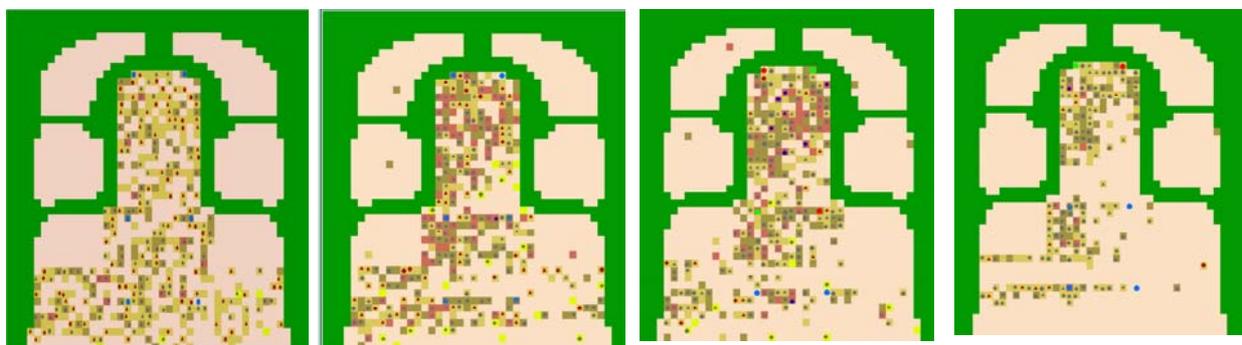


Figure 35 : Assolement de la saison sèche à la 3ème, 5ème, 7ème et 10ème année

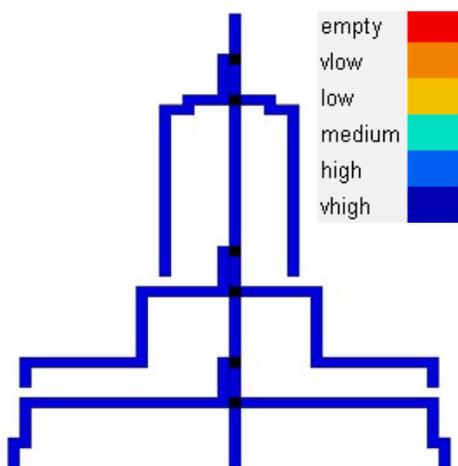


Figure 36: Vue des débits dans les périmètres durant la saison des pluies

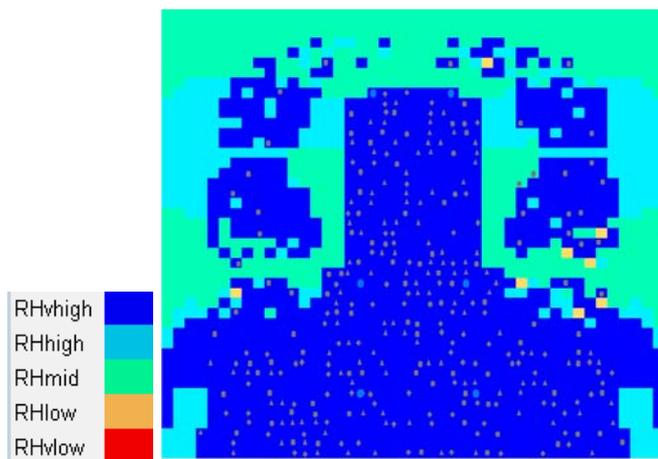


Figure 37 : Vue de la réserve en eau de la zone racinaire durant la saison des pluies

Nota : L'échelle de couleur des deux points de vue est dégradée du bleu foncé (débit ou niveau élevé) au rouge (pas d'eau dans le canal ou le réservoir) en passant par le vert clair et l'orange

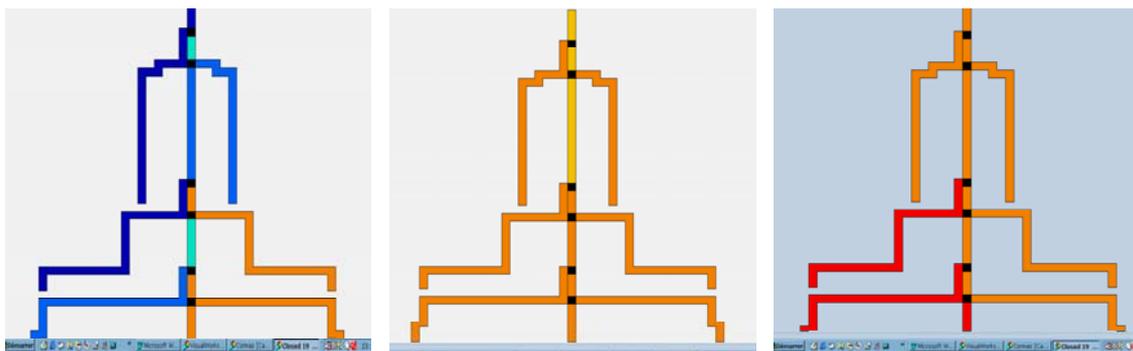


Figure 38 : Évolution des débits dans les canaux et la rivière lors de la saison sèche : début, milieu et fin de saison

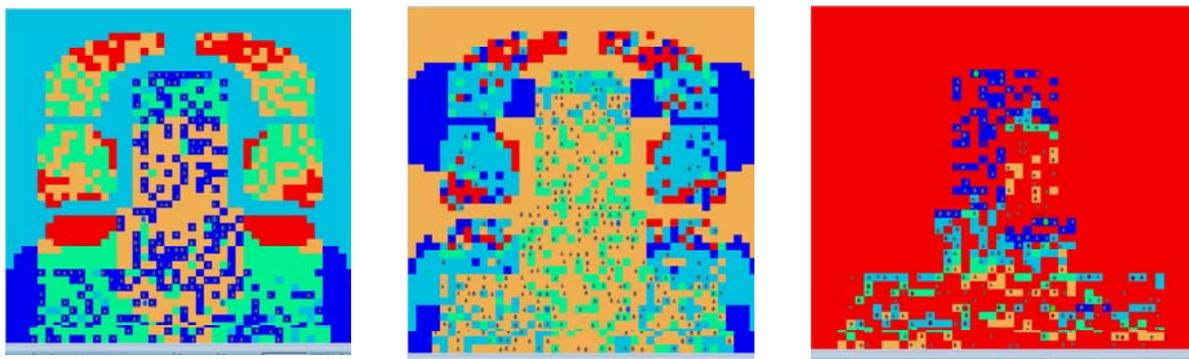


Figure 39 : Vue du réservoir racinaire lors de la saison sèche : début, milieu et fin de saison

5.3.2 Vers un support à la négociation

Outre son intérêt pour l'exploration du système et la visualisation des organisations spatiales, l'utilisation de CatchScape à l'aide des points de vue peut être un bon support pour l'aide à la négociation. Nous développons ci-après notre argumentation en deux temps :

- Tout d'abord, nous traitons de la qualité de CatchScape en tant que support de communication. En effet, pour être utilisable en aide à la négociation, le modèle doit être un bon support de communication et présenter une certaine souplesse d'utilisation ;
- Puis, nous mentionnons les apports du modèle au niveau de la concertation entre les acteurs.

a) Un outil de communication

Concernant les aspects communications, comme nous venons de le voir au travers des exemples précédents, l'utilisation des points de vue nous amène à nous interroger sur le fonctionnement du système. Par exemple, l'organisation spatiale des parcelles cultivées pose la question des inégalités entre les irrigants vis à vis de l'accès à la ressource en eau et leurs origines. Ainsi ceci nous amènent à nous focaliser sur certaines problématiques et peuvent alors servir à alimenter une discussion. Ils sont donc bien communicatifs.

Par ailleurs, étant donné que les informations fournies sont parfois les mêmes que dans l'utilisation classique de CatchScape¹⁸ (§5.2), on peut se poser la question de l'apport supplémentaire des points de vue par rapport aux données numériques. Cette avantage se situe au niveau de la souplesse d'utilisation des points de vue et de leur interactivité. En effet, au travers des points de vue l'utilisateur peut visualiser en temps réel l'évolution du système sur la grille spatiale de Cormas. D'autre part, les représentations spatiales comme les points de vue, permettent de faire passer des informations à des auditeurs très diverses (du chercheur au paysan), ce qui n'est pas forcément le cas avec des données numériques et des graphiques qui demandent un niveau d'abstraction un peu plus important. C'est également, la raison pour laquelle, un effort a été fait pour que la fenêtre spatiale de CatchScape, et ses points de vue, soient agréable à regarder, parlante et puisse s'expliquer facilement à l'aide de légende¹⁹. Mais l'image peut parfois être utilisée pour manipuler un auditoire ou parfois l'induire en erreur, que ça soit intentionnel ou non. Il en va alors de l'honnêteté du modélisateur et de sa franchise. De même ce dernier devra faire attention à ne pas tromper les utilisateurs au travers d'un point de vue mettant l'accent sur un état particulier du système. L'utilisation de plusieurs points de vue d'un même état peut alors permettre aux utilisateurs de relativiser et de nuancer les informations d'une vue particulière.

Enfin, l'utilisation de points de vue démontre une souplesse d'utilisation intéressante pour la communication que n'a pas un graphique. Tout d'abord la plate-forme Cormas permet à l'utilisateur d'avancer pas à pas dans la simulation. Il est donc possible d'arrêter la simulation au cours de la saison sèche par exemple et d'examiner la situation via plusieurs points de vue (débits dans les canaux, niveau de stress des parcelles, ...). D'autre part, suivant les questions ou les réactions de l'assistance

¹⁸ Par exemple, les débits dans les canaux sont exploités dans l'utilisation classique de CatchScape et dans l'utilisation par les points de vue

¹⁹ Cela a notamment été permis grâce aux fonctionnalités propres de Cormas qui offrent par défaut des légendes automatiques ou des choix de couleurs

durant une séance de simulation, le modélisateur pourra créer de nouveaux points de vue permettant d'éclairer de nouveaux aspects du système. Cette démarche a déjà été entreprise dans d'autres expériences de modélisation multi-agents, notamment sur des questions d'allocation de l'espace entre éleveurs et agriculteurs au Sénégal (Bousquet et al., 2001) (Lynam et al., 2001) ainsi qu'au niveau de la concertation entre forestiers, éleveurs et naturalistes pour gérer les pins sur le Causse Méjan. Suivant la question posée, la création d'un nouveau point de vue pourra être effectuée, soit au cours de la séance si il s'agit d'un point de vue sur un paramètre déjà existant dans le modèle²⁰, soit pour une séance suivante si il s'agit de créer un nouveau paramètre ou d'effectuer des modifications importantes du modèle.

b) Un outil de concertation

L'aide à la négociation passe par la concertation entre les acteurs. Pour cela, les points de vue de CatchScape peuvent servir de deux façons.

Les acteurs d'un système ont souvent une vision différente de leur environnement. Par exemple, un gestionnaire va avoir une vision d'ensemble du système alors qu'un exploitant va uniquement se focaliser sur son environnement proche et les ressources qu'il utilise. Dans le cas d'études que nous traitons ici on peut citer la vision d'un irrigant qui va voir le niveau d'eau qui arrive dans sa parcelle alors que le gestionnaire de canal va se baser sur la santé globale du périmètre du canal et le niveau d'eau dans la rivière. Des points de vue différents peuvent alors être créés permettant aux différents acteurs de discuter d'un même état du système mais avec des visions ou des échelles différentes.

D'autre part, l'apport d'une vision différente à celle dont il a l'habitude, peut permettre à un acteur de mieux comprendre son environnement. Par exemple, un gestionnaire de canal de la zone amont pourra dans un premier temps se focaliser sur les débits de son canal comme il a l'habitude de le faire. Puis, aux mêmes pas de temps, il pourra, à l'aide d'un point de vue sur les assolements par exemple, s'apercevoir des effets de la gestion qu'il entreprend sur la viabilité du système aval. Ainsi, les points de vue de CatchScape, peuvent permettre aux utilisateurs de changer leur vision de leur environnement et éventuellement se mettre d'accord avec d'autres types d'acteurs sur une vision commune.

CatchScape semble donc posséder les atouts et les fonctionnalités nécessaires pour envisager son utilisation auprès des acteurs, dans un but d'aide à la négociation. Toutefois, cela reste hypothétique puisque le modèle n'a pas encore été présenté aux acteurs du Mae Uam. Une mission en Thaïlande qui devrait se dérouler prochainement permettra de procéder à une phase de test.

²⁰ Il faut alors compter environ une à deux heures de programmation ; une séance se déroulant en générale sur une journée

Troisième Chapitre : Exploration du système par la simulation

1 *Validation interne et cohérence du modèle : simulation / terrain*

1.1 De la validation des SMA et des modèles complexes

Classiquement, la modélisation comporte toujours une étape de « vérification et validation », portant sur le modèle conceptuel et le modèle de simulation, par laquelle le modélisateur démontre que dans son domaine d'application, le modèle fournit des résultats avec une précision suffisante par rapport aux intentions d'utilisation. Cette validation peut prendre plusieurs formes allant du débogage du code du modèle, au calage des sorties simulations par rapport à des années de références puis comparaison simulée/observée sur un deuxième jeu de données, ou cela peut se traduire par une analyse de sensibilité. Par ailleurs Rykiel (Rykiel, 1996) rappelle qu'il n'existe pas une voie unique de validation, ni de validation totalement objective mais que chaque cas est différent.

La question de la validation des SMA n'en est qu'à ses débuts. Du côté de la validation interne des modèles Barreteau et Bousquet (Barreteau et al., 1999) évoquent l'usage de langages de programmation spécifiques ou de réseau de Pétri pour faciliter la recherche d'incohérences. Par ailleurs, au niveau de la cohérence et de l'accréditation du modèle, une première voie est ouverte au travers de l'utilisation de jeux de rôle, artefact du SMA, permettant d'ouvrir la boîte noire du modèle afin que les acteurs locaux du terrain modélisé puissent l'accréditer, le modifier ou le rejeter (Barreteau et al., 2001).

Enfin le très grand nombre de paramètres que comportent généralement les modèles individu-centré (Grimm, 1999), rend une analyse de sensibilité classique, avec croisement des paramètres, impossible à réaliser. En ne relevant que les paramètres généraux de CatchScape, un premier décompte non exhaustif (les paramètres des catégories d'agents n'étant pas comptés) a identifié 71 paramètres (Annexe H). Le modélisateur est alors obligé de procéder à des analyses partielles de sensibilité. Pour cela, plusieurs démarches ont été entreprises :

- N'étudier que les facteurs les plus importants en n'en faisant varier qu'un à la fois ;
- Etudier les principaux paramètres et les effets croisés des facteurs agrégés ;
- Constituer cent combinaisons de paramètres au hasard et étudier leur sensibilité (Barreteau, 1998).

1.2 Démarche retenue pour l'accréditation

1.2.1 Type de validation retenue et objectifs que l'on se donne dans cette validation

Un travail très important sur la validation des modèles multi-agents a été effectué par Sarah Feuillette au cours de sa thèse (Feuillette, 2001). Ce travail a permis la mise en place d'une méthodologie précise et complète sur les protocoles et les tests à mettre en œuvre afin de procéder à la validation de modèle multi-agents. Nous entendons ici par validation, la validation interne du modèle et sa cohérence par rapport aux phénomènes observés, et non pas la démarche d'accréditation auprès des acteurs locaux visant à valider le modèle auprès de l'utilisateur en outil d'aide à la négociation. La démarche entreprise par Sarah Feuillette a largement inspiré mon travail sur la validation de CatchScape et il est juste de lui rendre la paternité de la démarche retenue ici pour l'accréditation.

Par ailleurs nous ne cherchons pas ici à savoir si les résultats du modèle sont précisément conformes aux données observées car ce n'est pas l'objectif d'un tel modèle. Par contre l'objectif est de comparer des tendances, des évolutions en fonction de différents scénarios, ainsi que de déterminer si on peut se fier à ces tendances en termes de variabilité des simulations et de cohérence globale par rapport à l'évolution du système réel.

Pour cela un plan d'expérience a été choisi ainsi que des indicateurs pour pouvoir analyser et comparer les résultats.

1.2.2 Plan d'expérience et choix des indicateurs de suivis

La validation conceptuelle du modèle a été réalisée au cours de sa construction en fonction des tests qui étaient alors menés. Certains éléments liés aux simplifications apportées ont été exposés dans les chapitres précédents. Par ailleurs le débogage des procédures a également été fait au cours de la programmation et il n'est pas nécessaire d'en décrire le contenu dans ce mémoire.

Au delà de la vérification conceptuelle et du calage de certains paramètres, on a cherché à accréditer le modèle comme suit :

- En procédant à une analyse de la variabilité du modèle grâce à la répétition des simulations,
- En examinant le comportement du modèle sur des simulations à plus long terme que son domaine de validité normal (une simulation est réalisée sur 10 années virtuelles),
- En comparant des indicateurs clés du modèle à ceux observés sur le terrain comme les rendements ou l'assolement,
- En simulant des scénarios extrêmes permettant de voir si les comportements du modèle sont conformes à ceux qui devraient être observés,
- En procédant au traçage d'individus et de paramètres de la dynamique biophysique afin d'en vérifier le bon déroulement,
- En effectuant une analyse de sensibilité partielle pour repérer les variables importantes susceptibles d'influencer fortement le modèle et celles qui ne le sont pas.

Le plan d'expérience complet que nous avons suivi est donné au §3.

Le choix des indicateurs de suivis a d'abord été fait en fonction des variables clés du système. Par la suite, et au cours des simulations d'autres indicateurs ont été créés afin d'observer des comportements particuliers du système pouvant répondre à des questions précises. Par ailleurs, ces indicateurs sont des indices du comportement global du modèle et ne s'attachent pas au suivi de comportements à l'échelle de l'individu. En effet, bien que les SMA représentent l'échelle fine de l'agent, leur but n'est pas d'étudier les comportements individuels mais ceux des populations d'agents. Par ailleurs, autant que possible, ces indicateurs ont été choisis de manière à pouvoir être comparés à ceux normalement utilisés pour évaluer les systèmes réels. Cela a notamment été conseillé par Grimm (Grimm, 1999) qui en montre l'utilité. De tels indicateurs ont été proposés et employés par (Molden et al., 1998), pour la gestion de l'eau, et par (Lefroy et al., 2000) pour la gestion des sols et des territoires. Ainsi, les indicateurs que nous avons retenus sont :

- Des indicateurs de richesse ou de pauvreté de la population des agents et des catégories d'agents ;
- Des indicateurs d'assolement du bassin et de diversification des productions végétales ;
- Des indicateurs de la gestion de l'eau ; tant au niveau des débits des canaux, qu'au niveau de la satisfaction des gestionnaires de canal et des mesures de gestion adoptées ;
- Des indicateurs liés au travail agricole et non-agricole réalisé par les agents ;
- Des indicateurs liés à l'intensification de l'agriculture et aux dynamiques foncières.

Par ailleurs, pour la plupart des scénarios simulés, une note a été rédigée au préalable sur les résultats qui étaient attendus de la simulation en fonction de la connaissance du comportement du modèle et par rapport aux résultats déjà obtenus lors d'autres simulations. Ces notes ont ensuite été comparées aux résultats effectivement obtenus. Cette démarche présente deux intérêts. Tout d'abord elle permet de mesurer qualitativement des différences entre attendu et simulé et ainsi d'en tirer les conséquences sur la connaissance du modèle. Par ailleurs elle permet de mettre en avant et de justifier l'intérêt de la modélisation multi-agents pour l'exploration, la découverte et la compréhension de systèmes complexes ; compréhension qui des fait d'abord au niveau du modèle puis, par extrapolation et retour sur le terrain, au niveau du système réel. Ces notes de comparaisons sont données au §3, en même temps que le plan d'expérience.

1.2.3 Méthode d'analyse statistique des résultats de simulations

Afin de procéder à l'analyse de la variabilité du modèle et aux comparaisons entre plusieurs scénarios, nous avons utilisé, lorsque cela semblait nécessaire (si l'observation visuelle des résultats ne permet pas de conclure directement) des paramètres et des tests statistiques.

Le premier paramètre statistique utilisé pour mesurer la variabilité des échantillons est l'écart type des 20 répétitions d'une même simulation. L'écart type ne pouvant être utilisé que pour mesurer la variabilité d'un paramètre à un pas de temps donné de la simulation, nous utilisons également des coefficients de corrélations pour

mesurer la variabilité sur une série chronologique²¹. Une série chronologique est constituée de l'évolution d'un paramètre du modèle tout au long des 360 pas de temps qui constituent une simulation de 10 années virtuelles. Les coefficients de corrélations comparants les répétitions d'une simulation deux à deux, nous avons rassemblé l'ensemble des combinaisons possibles des 20 répétitions dans une matrice de corrélation.

Afin de procéder aux comparaisons entre les résultats de deux scénarios, nous utilisons également un test statistique non paramétrique (ne postulant pas sur une forme précise de la distribution des échantillons) qui permet de statuer sur la différence entre deux scénarios. Le test bilatéral de Mann Whitney est effectué sur les deux échantillons, constitués chacun par 20 simulations répétées du même scénario, sur une tranche de temps donné, au 360^{ème} pas de temps en général. L'hypothèse principale H_0 de ce test correspond à la similitude des deux échantillons, l'hypothèse alternative H_1 , proposant au contraire leur distinction. La règle de décision correspond au seuil classique de 5% : si H_1 est acceptée avec un risque de 5% au plus, le test est considéré comme significatif. Par ailleurs, le test de Mann Whitney est spécialement conçu pour des petits échantillons de moins de 30 individus.

1.3 Variabilité du modèle

L'analyse de la variabilité du modèle a été effectuée sur un scénario dit basique qui servira par la suite comme scénario de référence pour les autres scénarios.

Les paramètres de ce scénario ont déjà été évoqués en partie au Deuxième Chapitre. Il s'agit par exemple d'une taille de piang de 100 (équivalent à une irrigation maximum d'1 cm de lame d'eau par jour par unité de surface), des paramètres de la population des agents tels que définis au Deuxième Chapitre : 3.1.2, de paramètres de gestion de l'eau standards ou encore d'un fichier de prix de vente des cultures repris d'une chronologie existante et enfin du fichier hydrologique d'entrée tel que défini par le modèle iHACRES pour les années 1988 à 1992.

Les résultats des 20 simulations pour ce scénarios sont donnés ci-dessous.

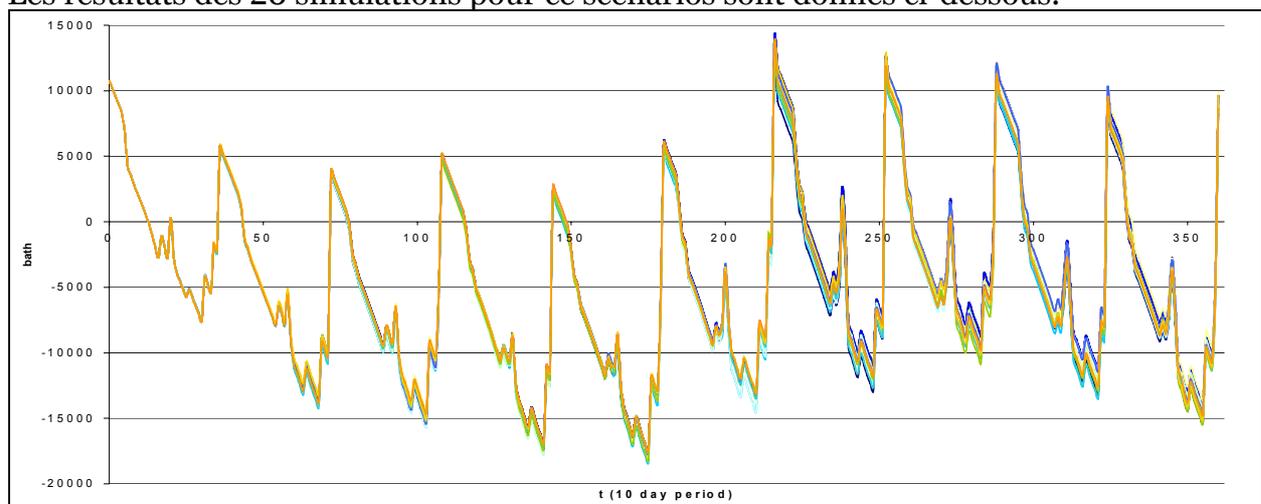


Figure 40 : Cash moyen de la population (répété 20*)

²¹ plus le coefficient de corrélation est proche de 1 en valeur absolue, plus les deux séries sont corrélées. Le signe indique le sens de la corrélation

On constate tout d'abord visuellement une grande stabilité des résultats entre les 20 répétitions. En effet, l'écart type au 360^{ème} pas de temps est de 557 baht pour une moyenne de 9130 baht.

Par ailleurs le cycle annuel observé provient de la dynamique du cash implémentée :

- les agents dépensent à chaque pas de temps l'argent de leurs dépenses courantes ainsi que l'achat de riz lorsque leur réserve en riz de la culture précédente est épuisée. Cela explique la décroissance progressive de la trésorerie au cours d'une année.
- En fin de saison des pluies, les agents reçoivent le produit de leurs ventes en production végétale. Cela correspond aux petits pics observés en milieu d'année.
- En fin de saison sèche, les agents reçoivent le produit de leurs ventes en productions végétales et le salaire de leur activité non agricole. Cela correspond aux grands pics de fin d'années.

Afin de confirmer la stabilité observée du scénario, le tableau ci-dessous donne le même indice que précédemment pour les dix années. Les valeurs sont prises à chaque fois en fin d'année, juste après que les agents aient reçu leurs salaires provenant des activités non agricoles et aient vendu leurs récoltes de saison sèche.

Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ecart Type	94	202	192	193	307	712	576	563	717	557
Moyenne	5691	3743	4940	2507	5905	13298	12016	11466	9432	9130

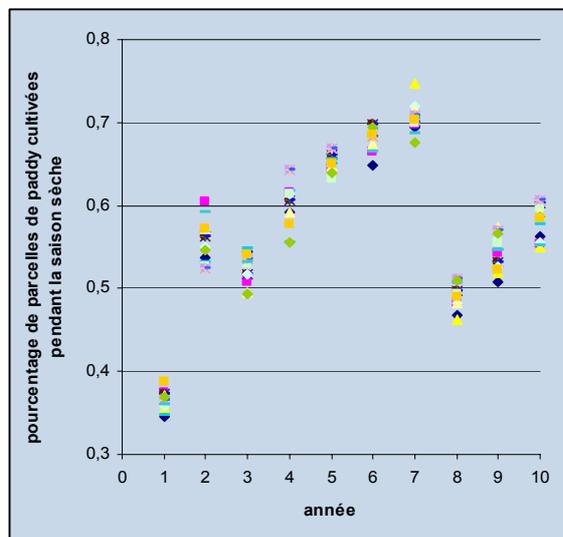
Si l'on étudie les corrélations entre les 20 simulations (voir Tableau 10 pour la matrice des corrélations), on s'aperçoit que le coefficient de corrélation observé le plus faible est 0,994 et que les corrélations sont toutes significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,050$ (test bilatéral).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
C1	1,000	0,998	0,998	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,999	0,998	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,998	0,997	0,997
C2	0,998	1,000	0,999	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,998	0,999	0,998	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,999	0,998	0,999
C3	0,998	0,999	1,000	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997	0,998
C4	0,994	0,997	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,996	0,997	0,999	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,996
C5	0,994	0,997	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,996	0,997	0,999	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,996
C6	0,994	0,997	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,996	0,997	0,999	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,996
C7	0,994	0,997	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,996	0,997	0,999	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,996
C8	0,994	0,997	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,996	0,997	0,999	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,996
C9	0,999	0,998	0,998	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	1,000	0,999	0,997	0,997	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,999	0,998	0,998
C10	0,998	0,999	0,998	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,999	1,000	0,998	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,999	0,998	0,998
C11	0,996	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,997	0,998	1,000	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,997	0,997
C12	0,996	0,997	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997	0,997	0,998	1,000	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997	0,997	0,996
C13	0,996	0,997	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,998	0,999	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997	0,997
C14	0,996	0,997	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,998	0,999	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997	0,997
C15	0,996	0,997	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,998	0,999	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997	0,997
C16	0,996	0,997	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,998	0,999	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997	0,997
C17	0,996	0,997	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	0,998	0,999	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997	0,997
C18	0,998	0,999	0,998	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,999	0,999	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	1,000	0,998	0,999
C19	0,997	0,998	0,997	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,998	0,998	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,998	1,000
C20	0,997	0,999	0,998	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,998	0,998	0,997	0,996	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,999	0,999	1,000

Tableau 10 : Matrice de corrélation de 20 simulations du scénario de référence (Corrélation de Pearson). Les 20 simulations (C1 à C20) sont entrées en lignes et colonnes et la matrice donne le coefficient de corrélation de chacun des combinaisons.

Par ailleurs, l'assolement des zones de paddy est sujet à des fluctuations année après année. En effet, alors que durant la saison des pluies, l'ensemble de la zone de paddy, amont comme aval, est cultivée entièrement par du riz, l'assolement de la saison sèche dépend de la quantité d'eau d'irrigation que les agriculteurs espèrent obtenir pour leurs cultures de saison sèche. Si un agent estime qu'il n'aura pas assez d'eau, il ne cultive pas sa parcelle de paddy et préfère investir sa main d'œuvre dans les

activités non-agricoles, dans le cas inverse, il cultive. L'attente de l'agent (pour une parcelle donnée) est basée sur la quantité d'irrigation qu'il a obtenue l'année précédente sur cette même parcelle. Un processus d'apprentissage de cette quantité est donc mis en œuvre dans le modèle (Deuxième Chapitre : 3.2.2).



Année	Écart type	Moyenne
1	0,010	0,367
2	<u>0,024</u>	0,552
3	0,016	0,526
4	<u>0,026</u>	<u>0,609</u>
5	0,011	<u>0,657</u>
6	0,013	<u>0,684</u>
7	0,014	<u>0,705</u>
8	0,014	0,496
9	<u>0,021</u>	0,545
10	<u>0,021</u>	0,588

Figure 41 : Pourcentage de parcelles de paddy cultivées (répété 20*)

Comme le montre la Figure 41 une plus grande variabilité du pourcentage de paddy cultivés est observée entre les 20 simulations que dans le cas du paramètre de trésorerie. Néanmoins, cet aspect visuel est à relativiser au regard des faibles rapports des écarts types aux moyennes simulées. Le plus fort écart type ne représente que 5% de la valeur moyenne indiquant ainsi que plus de 70% des valeurs simulées se trouvent dans une fourchette de -5% à +5% autour de la moyenne. Le plus faible coefficient de corrélation observé entre ces séries est de 0,92.

Plus précisément au niveau de l'assolement des zones de paddy lors de la saison sèche, deux types de cultures sont observés : le soja et la culture d'oignons. En début de simulation seul du soja est cultivé en raison du coût élevé de la culture d'oignons et du fait que les agents sont initialisés avec une trésorerie relativement faible. Au fur et à mesure de la simulation, certains agents s'enrichissent et peuvent alors cultiver cette culture de rente à haut potentiel. Suivant les simulations, plus ou moins d'agents peuvent investir dans cette culture c'est pourquoi il est important de tester la variabilité du paramètre : pourcentage de soja parmi les parcelles cultivées dans la zone de paddy lors de la saison sèche.

Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Écart type	0	0,005	0,006	0,006	0,007	0,016	0,017	0,019	0,018	0,013
Moyenne	1	0,978	0,952	0,976	0,951	0,864	0,721	0,628	0,732	0,743

Tableau 11 : Pourcentage de culture de soja parmi les parcelles de paddy cultivées - moyenne et écart type

Au regard du Tableau 11 on s'aperçoit que la variabilité de ce paramètre est en fait très faible. Le critère Écart Type/Moyenne est même inférieur à celui du pourcentage de paddy cultivés (2% par rapport à 5%).

Au niveau des débits simulés dans le système hydraulique nous donnons ici l'exemple du débit du canal 6, supposé être le plus sujet à des variations étant donné qu'il est en queue du système hydraulique. Par ailleurs, nous ne nous intéressons qu'aux débits de la saison sèche étant donné que nous nous focalisons sur cette période dans le cadre de la problématique du mémoire.

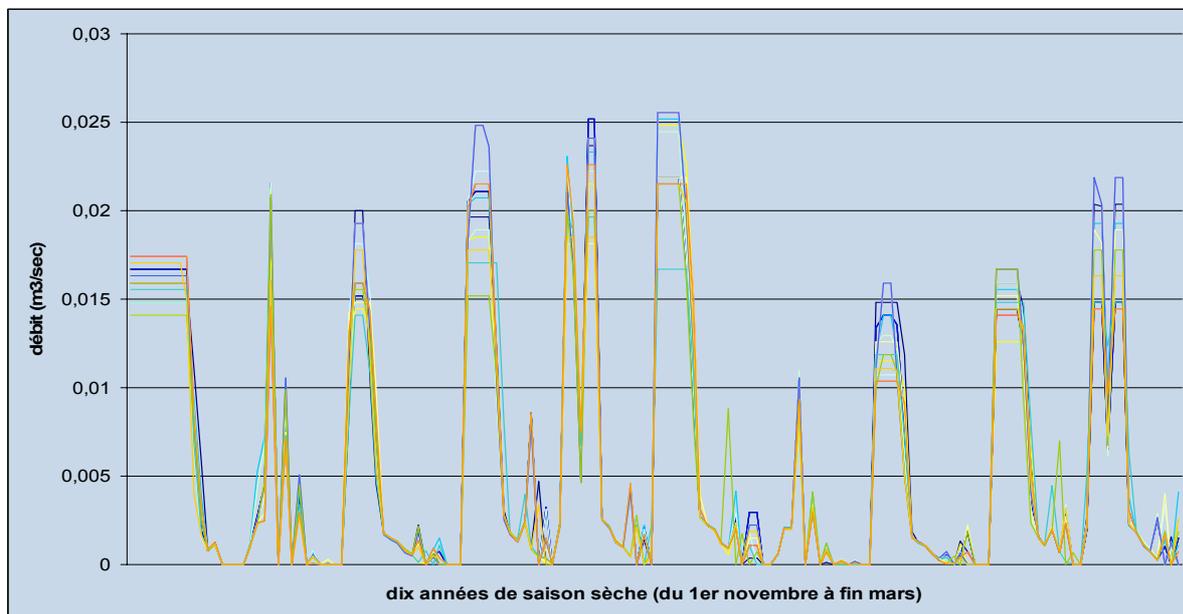


Figure 42 : Débit du canal 6, lors de la saison sèche (répété 20*)

La Figure 42 indique tout d'abord des débits différents pour les 20 simulations lors de la saison sèche de la première année. Cela est dû au fait que l'attribution des parcelles aux agents à l'initialisation du modèle est faite de manière aléatoire parmi l'ensemble des parcelles de paddy d'une même zone. En effet, chaque catégorie d'agent reçoit le nombre de parcelles qui lui est destiné mais ces parcelles ne sont pas choisies de façon prédéterminée en fonction des canaux. A savoir qu'à une simulation donnée, par le jeu du tirage aléatoire, un canal peut se voir attribuer plus de parcelles cultivées que lors d'une autre simulation, et inversement. Ainsi, une certaine variabilité est introduite à ce niveau.

Par ailleurs, on constate qu'à certains moments de la saison sèche, le débit chute brusquement à zéro et remonte au pas de temps d'après. Cela est causé par le système de tour d'eau entre les canaux d'une même paire qui a été introduit pour modéliser la gestion commune de l'eau. Ainsi, lorsqu'un tour d'eau commence dans une paire de canaux, chacun à son tour l'un des canaux se remplit pendant que l'autre est à sec. D'ailleurs on peut observer que ces rotations s'observent plus particulièrement en fin de saison sèche au fur et à mesure que le débit dans le canal diminue.

Afin de mesurer la variabilité des débits nous n'avons retenu que le débit du canal en milieu de la saison sèche, au 20 décembre.

Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Écart type (l/sec)	0,949	1,266	0,034	1,548	0,035	0,378	0,334	0,032	1,197	0,944
Moyenne (l/sec)	16,102	8,977	1,449	11,181	2,560	2,846	3,264	1,272	12,588	2,636

Tableau 12 : Débit du canal 6 au 20 décembre - moyenne et écart type (les écarts les plus importants sont en gras)

Comme le montre également la Figure 42, la variabilité du débit dans le canal 6 durant la saison sèche est plus importante que pour les indicateurs vus précédemment. L'analyse a également été effectuée sur les autres canaux du système

et on constate des écarts dans les mêmes proportions que celui-ci, voire légèrement inférieures. De plus, des écarts sont également constatés durant la saison des pluies, toujours en raison du nombre de parcelles cultivées par canal qui varie d'une simulation à l'autre en raison d'un tirage aléatoire. Cependant, lors de la saison sèche, le tirage aléatoire ne semble pas être l'unique raison de la variabilité. En effet, après quelques années de simulation, le processus d'apprentissage entraîne de nouvelles variations dans le nombre de parcelles cultivées accentuant alors la variabilité des débits. Les années climatiques particulièrement sèches (année 2 et 7) participent grandement aux variations comme le met en valeur le Tableau 12. Ce dernier indique également des écarts plus importants dans les dernières années de simulation laissant entrevoir une accentuation de la variabilité au fil des années.

Le débit d'un canal est étroitement lié au niveau de satisfaction de l'agent - gestionnaire de canal, lui-même dépendant de l'équilibre entre l'offre et la demande en eau. Le modèle calcule pour chaque canal un indice noté ISC (Irrigation Satisfaction Criteria) qui représente le pourcentage d'agent agriculteurs satisfaits par l'état hydrique de leur culture (Deuxième Chapitre : 3.4.1a).

En fonction de ce critère qui est l'un de ses attributs, l'agent -gestionnaire de canal, va négocier ou non pour obtenir des gestionnaires des autres canaux qu'ils diminuent leurs prises d'eau ou qu'ils entament un tour d'eau entre deux canaux d'une paire. Un agent déclenche un processus de négociation lorsque son ISC passe en dessous de la barre des 0,8 (moins de 80% d'agriculteurs satisfaits). Afin de mesurer la stabilité de ce paramètre il a été choisi de s'intéresser à l'ISC du canal 3, au centre du système de canaux et à l'amont de la zone 2.

On constate en premier lieu sur la Figure 43 que l'ISC de la première année reste à 100% tout au long de la saison sèche. En effet, le critère d'attente en eau des agents, qui influence le nombre de parcelles cultivées lors de la saison sèche est initialisé dans le scénario de référence à un niveau bas. Ainsi, lors de la première année, peu de parcelles de paddy sont mises en culture ce qui réduit la demande. Par ailleurs la première année climatique est une « bonne » année où l'offre en eau n'est pas très contraignante.

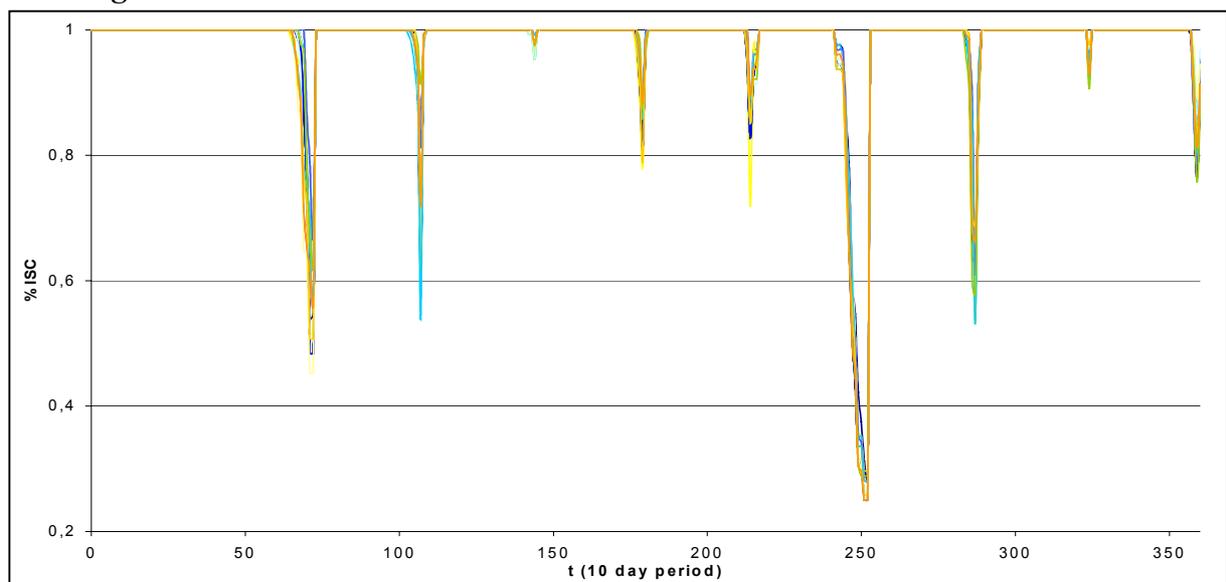


Figure 43 : Irrigation Satisfaction Criteria du canal 3 (répété 20*)

Les années suivantes, on constate de forts pics descendants indiquant un brusque manque d'eau dans le canal. Ces pics se résorbent rapidement car ils surviennent en

fin de saison de culture. Une certaine variabilité est observée entre les différentes simulations mais il faut faire appel aux écarts types pour pouvoir la mesurer. Le Tableau 13 indique la moyenne et l'écart type des valeurs de l'ISC pour chacune des années. Ces valeurs ont été prises au pas de temps correspondant au milieu de la période de manque d'eau de chaque saison sèche. On constate alors que la variabilité n'est finalement pas très importante ou du moins, elle est moins importante que celle des débits des canaux ; le critère Écart Type/Moyenne est au maximum de 13% alors qu'il atteignait jusqu'à 36% dans le cas des débits. Cela peut s'expliquer en partie par une certaine inertie venant du comportement conservateur du stock d'eau dans le sol et du fait que la non satisfaction des agents n'est comptabilisée qu'après trois pas de temps consécutifs de manque d'eau de la parcelle.

Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Écart type	0,00	0,07	0,10	0,01	0,04	0,02	0,04	0,10	0,02	0,04
Moyenne	1,00	0,77	0,72	0,98	0,86	0,94	0,55	0,79	0,94	0,80

Tableau 13 : Irrigation Satisfaction Critera du canal 3 - moyenne et écart type

Conclusion

Au travers des simulations et des critères statistiques que nous venons de voir, le premier constat est une grande stabilité du modèle vis à vis de certaines variables (économique et assolement) et une variabilité plus importante des paramètres liés directement à la ressource en eau. Concernant les paramètres économiques, l'analyse a été poussée plus loin en observant les mêmes critères statistiques pour les sous catégories d'agent. Nous avons pu alors observer une variabilité également restreinte pour les catégories dont le nombre d'agents était important alors que pour d'autres dont l'effectif est moindre, les valeurs de trésorerie sont plus dispersées, notamment pour la classe des agents C22 (effectif de 20 agents) dont la trésorerie au 360^{ème} pas de temps à un écart type de 3625 baht pour une moyenne de 47548 baht sur les 20 répétitions (8%). Concernant les autres paramètres non présentés ici la variabilité observée est également du même ordre que celle de la trésorerie ou parfois un peu supérieure, mais elle reste inférieure à celles des débits ou de l'ISC qui sont les paramètres les moins stables du modèle. Ce dernier constat s'explique en grande partie par le tirage aléatoire des parcelles en fonction des canaux et il nous faudra en tenir compte par la suite. Néanmoins, la variabilité de ces paramètres liés à l'eau est à nuancer. Comme il a été rappelé en début de chapitre, l'objectif de CatchScape est de comparer des tendances, des évolutions en fonction de différents scénarios. Ainsi, un comportement variable peut être acceptable du moment qu'il est utilisé de manière relative pour comparer des tendances. Les tests statistiques permettent alors de trancher entre les évolutions de deux scénarios.

Par ailleurs cette analyse de la variabilité du modèle permet de statuer sur le choix initial de 20 répétitions par scénario (Deuxième Chapitre : 5.2). Au regard de la relative stabilité du modèle par rapport à l'objectif recherché, ce nombre semble être un bon compromis statistique entre la qualité de l'analyse et la souplesse d'utilisation.

1.4 Comportement à plus long terme

Malgré le fait que le domaine de validité du modèle soit d'une décennie, une simulation sur 30 années du scénario de référence permet de vérifier si le fonctionnement du modèle sur le long terme reste cohérent, ou si des phénomènes inattendus apparaissent. Il s'agit à la fois d'un mode d'exploration du système et d'une vérification du bon fonctionnement du modèle. Ces simulations sont répétées à partir du même état initial et suivies par cinq indicateurs.

La Figure 44 indique qu'à plus long terme, le modèle respecte la tendance que l'on observait déjà sur 10 années. A savoir que la trésorerie moyenne de la population oscille autour de la valeur zéro ; elle est positive en début d'année, et décroît tout au long de l'année, passant alors dans le négatif. Il semble y avoir une très légère baisse générale du cash, mais globalement ce paramètre a un comportement plutôt linéaire.

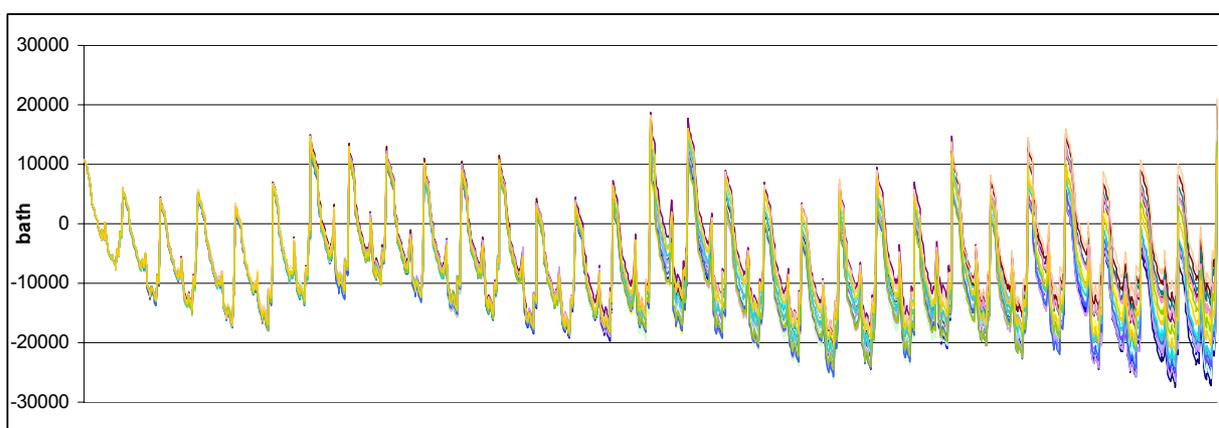
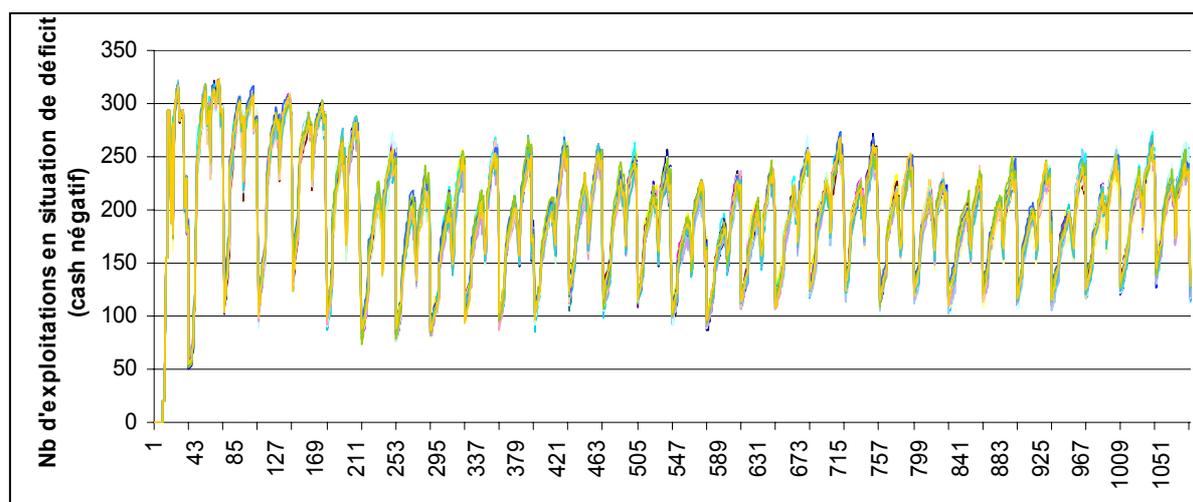


Figure 44 : Cash moyen de la population à long terme (répété 20*)

Le paramètre « nombre d'agent-agriculteur » en déficit, mérite une explication préalable. Il s'agit d'un compteur qui à chaque pas de temps relève le nombre d'attributs de trésorerie qui, parmi les 327 agents, sont en dessous de la valeur zéro. Ainsi, comme on le voit sur la Figure 45, lors des pics des premières années, ce compteur atteint le maximum de 327, juste avant la fin de l'année (avant la récolte et le retour des membres dédiés aux activités non-agricoles). Juste après ces pics, le nombre d'agent en déficit retombe mais pas totalement ; en fin de 1^{ère} année encore 50 agents sont en déficit après les récoltes ; en 2^{ème} et 3^{ème} année il en reste encore 100 ; et ainsi de suite. Ces « pics bas » indiquent le nombre d'agents en déficit permanent (nous verrons plus tard qu'à chaque année il s'agit bien des mêmes individus). On remarque alors sur la Figure 45 que ce paramètre se stabilise après sept à huit ans, et qu'il atteint alors un plateau bas où il semble se stabiliser. Ainsi, la plage de la décennie dans laquelle nous effectuons les simulations est en fait une phase décroissante pour ce paramètre et permet à peine de rendre compte de sa stabilisation.

Figure 45 : Exploitations en déficit à long terme (répété 20*)



Par ailleurs on observe, comme pour la Figure 44, une cyclicité inter-annuelle qui est certainement due au fichier de prix entré dans le modèle. En effet ce fichier comporte huit années de prix de vente des cultures et ces huit années sont ensuite reproduites pour les années suivantes si bien que le modèle considère le fichier comme une boucle de prix de huit ans qu'il répète autant de fois que nécessaire. Or la cyclicité des figures observées a une période de l'ordre de huit ans. Bien que cela ne soit pas forcément très clair visuellement, d'autres indicateurs l'ont confirmé. Par ailleurs le fichier hydrologique qui a une cyclicité de cinq ans vient également induire un cycle dans les résultats de simulations et crée un bruit dans la période de huit ans des figures précédentes.

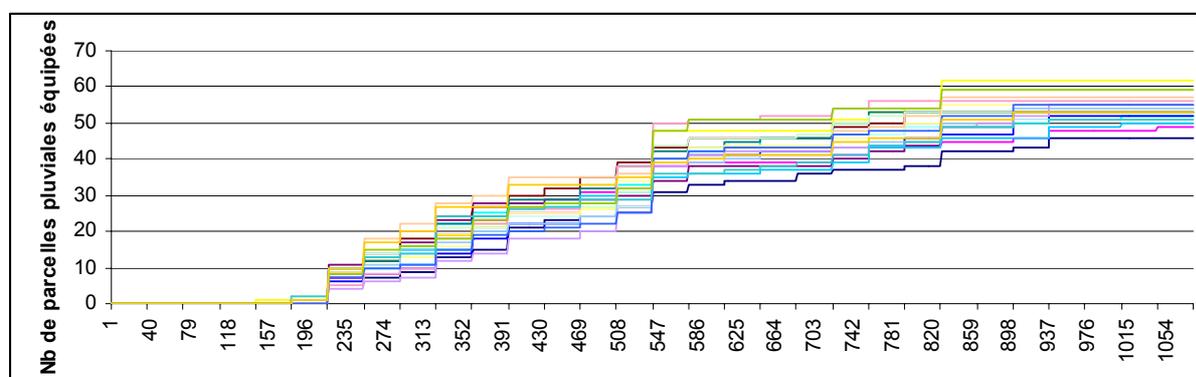


Figure 46 : Parcelles pluviales équipées en matériel d'irrigation sur le long terme (répété 20*)

La Figure 46 montre que le nombre de parcelles d'agriculture pluviale sur lesquelles des agents installent un matériel d'irrigation afin de pouvoir cultiver pendant la saison sèche, commence à apparaître à partir du 200ème pas de temps (milieu de la 5^{ème} année), puis augmente de manière quasi linéaire et enfin se stabilise autour d'une cinquantaine de parcelles équipées. L'effet retard au début provient du fait que la trésorerie des agents n'est pas suffisamment importante les premières années pour investir dans ces équipements ; alors que le plateau en fin de simulation, vient du seuil maximum d'équipement fixé à 10% des parcelles pluviales. Si ce plateau n'est pas le même à chaque simulation, c'est parce que le nombre de parcelles varie à chaque simulation en raison des achats de nouvelles parcelles. Ainsi la fenêtre 0 à 10 ans permet d'entrevoir le début de ce phénomène sans toutefois le voir atteindre son maximum.

L'évolution de l'assolement de la zone de paddy est figurée par le pourcentage de culture d'oignons parmi les parcelles de paddy cultivées durant la saison sèche (Figure 47). Alors qu'on pouvait s'attendre à une augmentation croissante de cet indicateur en raison d'un enrichissement des agents, ou du moins d'une partie des agents²², ce pourcentage semble se limiter à la barre des 50%. La cyclicité est encore une fois due aux fichiers d'entrées qui sont répétés n fois. Comme précédemment, une simulation sur 10 ans ne permet pas d'atteindre le plateau mais uniquement de voir la phase ascendante de cette évolution. Par ailleurs, le pourcentage de paddy cultivés (non figuré ici) se stabilise, autour de 50% durant la saison sèche, soit en dessous des valeurs observées lors de simulation de 10 ans. Cette valeur indique le nombre maximum de parcelles cultivables lorsque l'offre et la demande en eau se sont stabilisés. Cette stabilisation est d'ailleurs permise par la stabilisation du pourcentage de chaque type de culture. En effet, si la culture d'oignons avait été croissante, sa demande hydrique étant plus importante que celle du soja, l'équilibre offre/demande en eau ne serait pas stable et influencerait alors le pourcentage de parcelles de paddy cultivables en saison sèche.

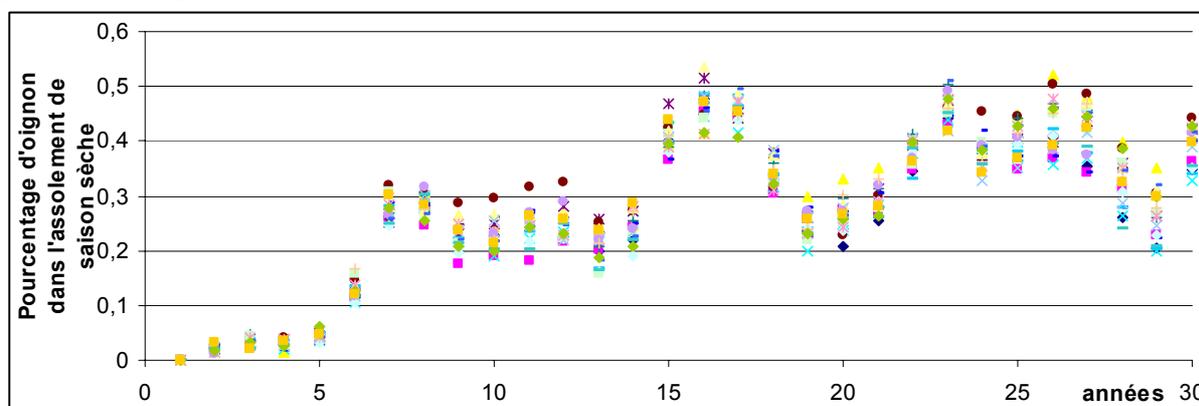


Figure 47 : Part de la culture d'oignon dans l'assolement de saison sèche sur le long terme (répété 20*)

Finalement, l'indicateur de satisfaction de l'agent – gestionnaire de canal (canal 5 sur la Figure 48) ne semble pas réellement se stabiliser lorsque l'on regarde une à une les 5 années du cycle du fichier hydrologique. On note par exemple sur la Figure 48, que la 28^{ème} année indique un ISC plus bas que dans les deux cycles précédents.

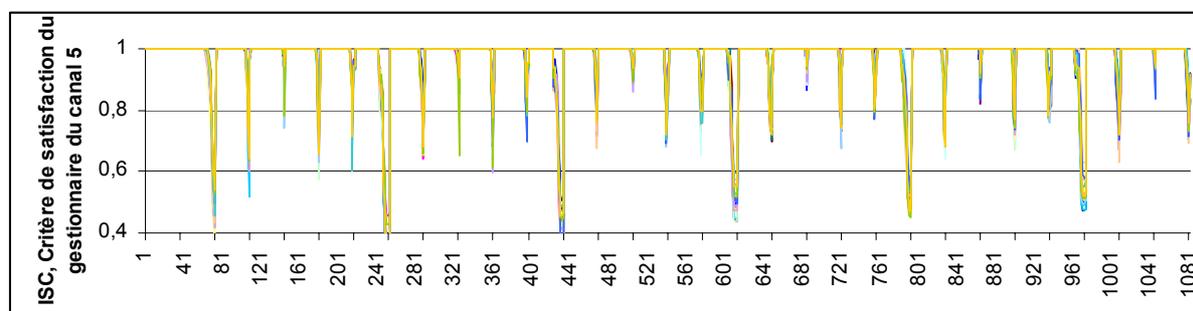


Figure 48 : Critère de satisfaction du gestionnaire du canal 5, sur le long terme (répété 20*)

²² nous verrons plus tard qu'au delà du cash moyen de la population qui reste relativement stable, une part de la population s'enrichit au cours des simulations autorisant alors des investissements plus importants sur les cultures de rente

Conclusion

La stabilité entre les 20 répétitions du scénario à long terme du cash moyen de la population des agents permet de baser l'interprétation des résultats de la gestion de l'eau et des autres paramètres, sur une économie globale du système « constante ». Cela facilitera ainsi l'interprétation des résultats du fait que l'influence de la trésorerie des agents est chaque année du même ordre de grandeur. Cela est toutefois à relativiser durant les premières années de simulations, lorsque le nombre d'agents en situation de déficit permanent n'est pas encore stabilisé. Il en est d'ailleurs de même pour l'assolement de la zone de paddy. C'est pourquoi, nous avons choisi d'effectuer les **comparaisons des scénarios uniquement sur les résultats de la 10^{ème} année**. Par ailleurs les tendances croissantes du pourcentage d'oignons cultivés et du nombre de parcelles équipées en systèmes d'irrigation que l'on observe dans la fenêtre 0 à 10 ans, correspondent bien au phénomène d'intensification qui est en train de se dérouler dans le bassin du Mae Uam. En effet, l'agriculture du Mae Uam n'en est qu'au début de son intensification. Ces simulations laissent entrevoir que le phénomène va aller en s'accroissant puis atteindre un plateau. Dans le cas des équipements d'irrigation ce plateau est complètement fictif puisqu'il est créé par une limitation à 10% des parcelles cultivées, directement implémentée dans le modèle. Par contre dans le cas de la culture d'oignons, le plateau provient d'un équilibre qui se fait via la trésorerie des agents et au travers de l'offre et la demande en eau. Nous posons alors la question de l'évolution de l'intensification des zones de paddy dans le système réel du Mae Uam. **Va-t-elle se stabiliser, comme c'est le cas dans le modèle, et si oui, pour quelles raisons ?**

Enfin, la cyclicité, répétée à long terme, de l'ISC souligne la grande influence du fichier hydrologique comme nous pouvions nous y attendre. Cela nous amènera dans la suite de l'analyse à tester la sensibilité du modèle à la chronologie du fichier hydrologique d'entrée.

1.5 Indicateurs de terrain et résultats de simulations

Afin de vérifier si les valeurs absolues des résultats de simulations se trouvent dans une gamme raisonnable par rapport aux valeurs observées sur le terrain, nous avons comparé une série d'indicateurs clés.

1.5.1 L'assolement

Afin de comparer les assolements simulés/observés nous avons effectué l'analyse sur la 10^{ème} année à partir du scénario de référence. Ce choix est critiquable du fait de la variabilité temporelle de ce paramètre comme nous l'avons vu précédemment. Toutefois, à la vue de l'analyse des simulations à long terme, il a été décidé de se baser sur les résultats de la dernière année pour comparer les scénarios entre eux. Ainsi, la comparaison du scénario de référence avec les données de référence a également été fait sur cette dernière année, tout en gardant à l'esprit la variabilité temporelle.

	Zone de paddy					Zone d'agriculture pluviale					
	S. des pluies		S. sèche			S. des pluies			S. sèche		
CatchScape	Riz	Soja	Soja	Oignon	Rien	Riz	Soja	Oignon	Soja	Oignon	Rien
-Moyenne	100%	0%	43,5%	13,0%	43,5%	58,8%	24,6%	16,5%	4,4%	0,4%	95,3%
-Écart type	0%	0%	1,7%	0,6%	2,0%	0,8%	1,0%	0,8%	0,8%	0,1%	0,9%
Enquête 98	85%	15%	48%		52%	76%	24%		-	-	-

Tableau 14 : Comparaison de l'assolement simulé en dernière année de simulation, avec l'assolement observé au Mae Uam lors de l'enquête de 1998

On constate tout d'abord que le modèle ne simule que du riz lors de la saison des pluies sur les parcelles de paddy, alors qu'une part est cultivée en soja sur le Mae Uam. Cette différence est due à la façon dont est effectué le choix de la culture de riz dans le modèle. Ce dernier est un choix obligé tant que les agents n'ont pas rempli leur objectif de sécurité alimentaire. Or, l'équilibre entre les rendements attendus en riz et la taille des familles des agents-agriculteurs, fait qu'il est nécessaire que la totalité de la zone de paddy soit recouverte de riz pour satisfaire les besoins alimentaires. L'influence de cet écart est que le modèle sous estime le cash qui peut être obtenu par les agents lors de la saison des pluies via les cultures de rentes. Le deuxième point à noter dans le Tableau 14 est le fait que CatchScape simule la culture d'oignons alors qu'elle n'apparaît pas dans l'enquête de 1998. Néanmoins comme nous l'avons vu lors de la description de l'agriculture du Mae Uam, une certaine diversification des cultures est observée dans le bassin. Les données qui figurent dans le tableau ne tiennent pas compte de ce fait car la diversification observée n'a pas pu être chiffrée. Nous savons juste qu'elle existe et quelle est en expansion.

Concernant l'assolement en soja, sa part sur la zone de paddy durant la saison sèche et celles sur la zone pluviale durant la saison des pluies sont globalement respectées (écart de 5% maximum avec un écart type de +/- 1,7% maximum). Il est particulièrement important que ces facteurs soient respectés car ils contribuent en grande partie au revenu des exploitations. La part de riz sur la zone pluviale lors de la saison des pluies est moindre dans le modèle. En effet, dans le choix pour une culture de riz, le modèle privilégie les parcelles de paddy, ce qui explique alors l'excès de riz sur le paddy et la proportion moindre dans la zone pluviale.

Enfin, au niveau des cultures de saison sèche sur la zone d'agriculture pluviale, une faible part des parcelles est cultivée dans le modèle. Cette proportion provient en réalité des parcelles pluviales qui ont été équipées pour l'irrigation par les agents du modèle, leur permettant alors de pouvoir les cultiver. Une fois qu'une parcelle est équipée, le modèle continue à la considérer comme une parcelle pluviale, c'est pourquoi elle apparaît à cette colonne dans le Tableau 14. Dans les résultats d'enquête de 1998, il n'est pas clair si ces parcelles sont comptabilisées dans les parcelles de paddy ou bien si elles ne sont pas prises en considération. Il semblerait que, bien que ces pratiques soient observées sur le terrain, elles n'aient pas pu être chiffrées.

1.5.2 Les rendements

Le Tableau 15 indique les rendements moyens simulés sur dans le modèle ainsi que l'écart type entre les 20 répétitions du scénario de référence. Il ne permet donc pas d'observer les écarts des rendements simulés dus aux différences d'offre en eau entre l'amont et l'aval du système modélisé.

Le rendement moyen en riz paddy est légèrement inférieur dans les simulations ainsi que pour les cultures d'oignons (écart d'environ 8% dans les deux cas). Concernant le riz, cela contribue à expliquer les importantes surfaces en riz nécessaires dans le

modèle. Par ailleurs, un écart supérieur, mais au profit du modèle cette fois, est constaté pour la culture de soja (12% d'écart). Il nous faudra donc prendre en compte ces écarts dans l'analyse des résultats ; toutefois les rendements simulés restent dans une gamme de valeur raisonnable²³. Les rendements en riz pluvial et en maïs sont quasiment identiques dans les deux cas.

		Riz paddy	Riz pluvial	Soja	Oignon	Maïs
CatchScape	Moyenne	3,1 T/ha	2,0 T/ha	1,7 T/ha	11,1 T/ha	2,2 T/ha
	Écart type	0,23 T/ha	0,12 T/ha	0,21 T/ha	2,32 T/ha	0,71 T/ha
Enquête 98		3,4 T/ha	2,1 T/ha	1,4 T/ha	15,2 T/ha	2,1 T/ha

Tableau 15 : Rendements simulés et observés

1.5.3 Revenu des exploitations familiales

Afin de comparer les revenus des exploitations familiales simulés et observés, plusieurs indicateurs ont été retenus. Tout d'abord, les revenus des exploitations évoluant au cours de la simulation nous avons relevé ceux de la dernière année mais également ceux de la première année de simulation. D'autre part, étant donné qu'il existe de grands écarts entre les revenus des différentes catégories d'exploitations entrées à l'initialisation du modèle, il est important d'inspecter le revenu, catégorie par catégorie. La part du revenu non agricole provenant de la force de travail des agents employée pour le travail « à la ville » est un paramètre également important qu'il nous faut prendre en compte. Enfin, pour la dernière année de simulation, le pourcentage d'agents toujours en déficit après que les salaires et récoltes soient empochés, peut être considéré comme un indicateur de la viabilité des exploitations. Etant donné que les six catégories d'exploitations retenues pour la modélisation (notées C11, C12, C21, C22, C31 et C32 ; voir Chapitre Deux pour la définition de ces catégories) ne sont pas les mêmes que celles de l'enquête de 1998, nous comparerons avec les classes de RMU définies au moment de l'enquête. On notera tout de même que le RMU 2 et la classe C32 du modèle correspondent tout deux à des agents n'ayant que des parcelles pluviales et que le RMU 1 et les classes C12 et C21 correspondent aux agents n'ayant que du paddy.

		C11	C12	C21	C22	C31	C32
1 ^{ère} année	Revenu annuel total (baht)	18000	13000	23000	36000	22000	11000
10 ^{ème} année	Revenu annuel total (baht)	45000	28000	42000	70000	51000	22000
	Part du revenu non-agricole	37%	78%	38%	31%	47%	100%
	% d'individu en déficit permanent	24%	51%	0%	0%	4%	100%

Tableau 16 : Revenus et agents en déficit des six classes d'exploitations familiales de CatchScape

On constate en premier lieu qu'alors que les revenus de 1^{ère} année du modèle sont légèrement inférieurs à ceux des RMU (Tableau 17), ceux de 10^{ème} année sont nettement supérieurs. Le modèle ayant été calé à la base sur les résultats de l'enquête, la ressemblance des revenus de première année est logique. Ceux de la dernière année constituent en fait l'évolution simulée de la photo des exploitations prise en 1998. En comparant la 1^{ère} et la dernière année on se rend compte que le modèle simule un doublement du revenu des exploitations sur une période 10 ans. La validité d'un tel résultat est difficile à tester et il semble hasardeux de continuer l'analyse à ce sujet.

²³ A plusieurs reprises une gamme raisonnable de variations ou d'écarts a été mentionnée en considération des objectifs du modèle. Afin d'être plus précis, une gamme raisonnable serait dans le cas de ce modèle un intervalle entre -15 et +15%

	RMU 1	RMU 2	RMU 3
Revenu annuel total (baht)	34700	17700	34700
Part du revenu non-agricole	27%	53%	24%
Part des produits forestiers	11%		7%

Tableau 17 : Revenus des RMU (enquête de l'IWRAM, 1998)

Du point de vue interne au modèle, l'augmentation du revenu provient d'une part de l'augmentation des surfaces cultivées durant la saison sèche et d'autre part de l'apparition et l'accroissement de la culture d'oignons dans l'assolement qui dégage un revenu important. Par ailleurs, la part du revenu non agricole dans le revenu total des exploitations est surestimée dans le modèle ; même pour le RMU 3 qu'il faut en fait comparer à la classe C32. Cet écart est également constaté en première année. Plus précisément le revenu non agricole est largement surestimé pour les classes C12 et C32, qui correspondent aux agents les plus en déficit (51 et 100%). En réalité la surestimation du revenu non-agricole pour les agents en déficit a été délibérée et incluse directement dans le modèle. Lorsque le cash d'un agent passe en dessous de -10000 baht, celui ci met une deuxième unité de travail sur les activités non agricole alors que ce paramètre avait été calé pour une seule unité de travail. Cette procédure a pour objectif de permettre aux agents en déficit de rester dans des proportions acceptables de revenu ; leur revenu agricole dans ce genre de cas étant quasiment nul. **Ainsi, le modèle rencontre une limite lorsqu'il s'agit de simuler les activités d'exploitations à faible revenu agricole.**

L'écart entre simulé et observé pour les autres classes est beaucoup plus modeste et reste dans des proportions « acceptables ». Toutefois, il paraît certain que cette surestimation du modèle est importante à relever et influence les résultats.

Conclusion

Bien que le modèle respecte bien les ordres de grandeurs des indicateurs assolement, rendements et revenus (en début de simulation), des écarts entre simulé et observé sont à prendre en considération. Tout d'abord, la part de riz sur les zones de paddy en saison des pluies qui est supérieure à l'observé et diminue de ce fait les revenus provenant des cultures de rentes à cette saison. D'autre part un rendement en soja qui est légèrement surestimé dans le modèle, est finalement une part du revenu non-agricole supérieure dans les simulations que sur le terrain. Concernant ce dernier indicateur, la faiblesse du modèle pour simuler les activités des exploitations à faible revenu agricole a été mise en avant.

1.6 Réaction du modèle à quelques scénarios extrêmes

La simulation de fortes perturbations constitue un test de cohérence du modèle, où l'on doit s'assurer que les répercussions simulées sont en correspondance avec les répercussion prévues. Ces perturbations permettent également d'enrichir l'interprétation de l'évolution de certains indicateurs et la compréhension du modèle. Trois perturbations ont été choisies : une d'ordre économique, l'autre en rapport avec la gestion des canaux et la dernière simule une perturbation climatique extrême.

1.6.1 Pic sur le prix de l'oignon

Afin de simuler un scénario extrême de nature économique, il a été choisi d'introduire une hausse très forte et ponctuelle sur le prix de la culture de rente ayant la plus forte marge. Ainsi, le prix de l'oignon a été modifié à la sixième année par

rapport au scénario de référence ; 11 baht/kg au lieu de 6,2 baht/kg dans le scénario de référence. Par ailleurs, nous avons choisi la sixième année pour simuler ce pic, car auparavant le nombre de parcelles cultivées avec de l'oignon est assez restreint.

➤ Résultats attendus

Par rapport à une telle hausse, l'impact attendu est une forte hausse du revenu lors de la sixième année ; et plus particulièrement à la fin de la saison sèche étant donné que le nombre de parcelles avec de l'oignon y est plus important que durant la saison des pluies. Nous nous attendons à ce que l'impact de cet apport important de cash, permettra aux agents de sortir d'un système de subsistance pur et d'intensifier leur production agricole via une augmentation importante de la culture d'oignons. Ainsi, il est prévu une augmentation conséquente du revenu des agents les années qui suivent le pic de prix.

➤ Résultats simulés

Comme on le voit sur la Figure 49, on constate effectivement une hausse du revenu en 6^{ème} année mais celle-ci s'estompe dès l'année suivante. En fait, les bénéfices ont été placés dans l'achat de nouvelles parcelles ou d'équipements d'irrigation. En moyenne dix parcelles ont été achetées et 20 parcelles pluviales ont été équipées. Les pourcentages d'oignons cultivés les années suivantes sont similaires au scénario de référence. Ainsi l'effet simulé a été beaucoup plus ponctuel que ce qui était attendu.

Un autre scénario de nature économique a alors été simulé en créant une hausse du prix de l'oignon mais sur plusieurs années de suite, et ce à partir de la sixième année. On constate alors une hausse du revenu à partir de la sixième année par rapport au scénario de référence ainsi que l'accroissement des surface cultivées en oignons. A la fin de la dixième année de simulation l'assolement de la zone de paddy en saison sèche comporte en moyenne 30% de culture d'oignons alors qu'il n'était que de 13% dans le scénario de référence. De même l'investissement foncier a également été accru (+10 parcelles achetées et +10 parcelles équipées par rapport au scénario avec pic de prix).

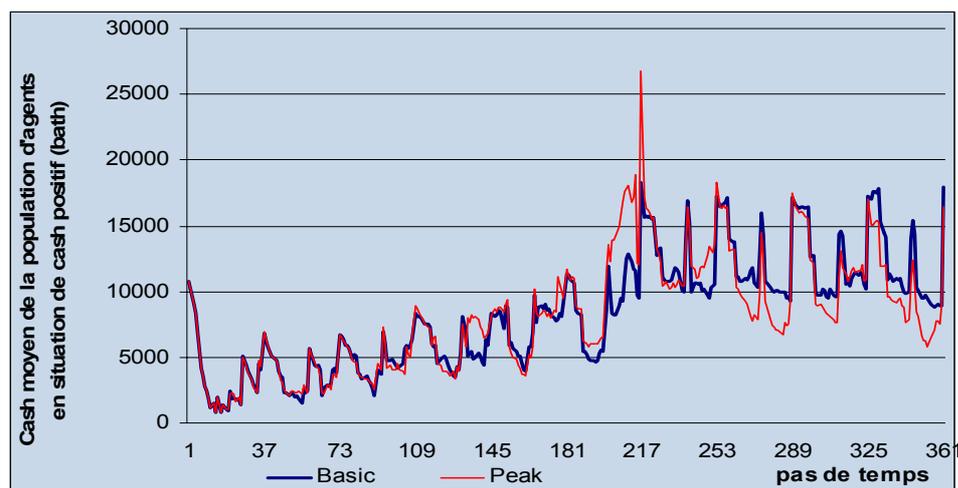


Figure 49 : Comparaison du scénario "pic de prix de l'oignon en 6^{ème} année", avec le scénario de référence. Indicateur : moyenne sur 20 simulations du cash de la population des agents ayant une situation de trésorerie positive

1.6.2 Absence de gestion collective

Le scénario qui suit permet de tester l'importance des méthodes de gestion collective qui ont été incorporées dans le modèle et à posteriori celles qui sont utilisées dans le bassin du Mae Uam. Pour cela nous avons simulé un scénario sans gestion collective. Dans ce scénario l'ensemble des méthodes de la gestion collective ont été retiré du modèle ; à savoir le système de tour d'eau entre deux canaux d'une paire, et le système de négociation entre les paires de canaux qui permet de diminuer les prises d'eau en amont.

➤ **Résultats attendus**

L'effet attendu de scénario est un assolement inchangé pour le canal 1 du fait que son offre en eau sera la même que dans le scénario de référence (débit dans le canal inchangé). Par contre nous nous attendons à un effet négatif sur les autres canaux (débit et nombre de parcelles cultivées) et ce, de plus en plus fortement au fur et à mesure que l'on descend vers l'aval. On prévoit enfin que le dernier canal ne pourra plus subvenir aux besoins de son agriculture et que quasiment plus aucune parcelle ne pourra être cultivée sur ce périmètre.

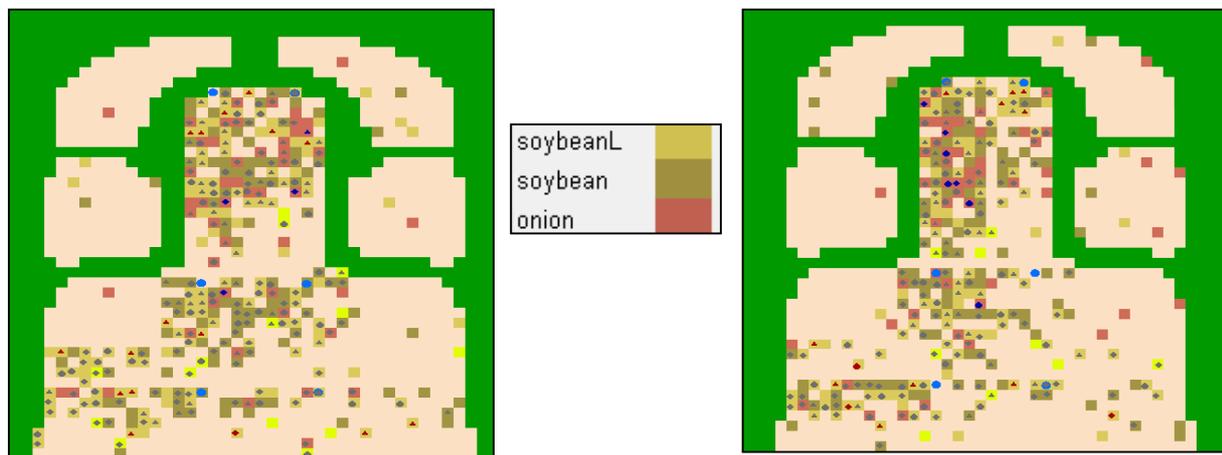


Figure 50 : Assolement de la saison sèche de la 10ème - scénario de référence

Figure 51 : Assolement de la saison sèche de la 10ème - scénario sans gestion collective

➤ **Résultats simulés**

Comme on s'en aperçoit en comparant la Figure 50 et la Figure 51, l'assolement du périmètre du canal 6 (voir Chapitre Deux pour la position des périmètres des canaux), est effectivement moins dense avec le scénario sans gestion collective mais il n'est pas aussi réduit que ce qui était supposé. Par ailleurs on constate également une diminution des parcelles cultivées dans les périmètres 2, 3, 4 et 5, comme cela été supposé. Le fait étonnant provient de l'accroissement de du nombre de parcelles cultivées sur le périmètre du canal 1. Lorsque l'on examine les débits des canaux pour les deux scénarios (Tableau 18) on s'aperçoit qu'effectivement il y a bien une augmentation du débit du canal 1. C'est un effet que nous n'avions tout simplement pas anticipé. Pour l'expliquer il nous faut rappeler les règles de la gestion collective. Lorsque les canaux aval sont face à un manque d'eau dans le scénario de référence, leur gestionnaire demande alors à ceux de l'amont, et donc à ceux du canal 1, de réduire leur prise d'eau. Si ces derniers acceptent, ils subissent alors à leur tour les effets de ce manque d'eau, pénalisant ainsi les agriculteurs de la zone. Ces derniers

vont alors en tenir compte et l'année d'après, moins de parcelles seront mises en culture. Le modèle simule en quelque sorte un signal allant de l'aval vers l'amont.

	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Écart maximum	+19%	-8%	-9%	-11%	+4%	+10%
Écart minimum	+15%	-12%	-13%	-14%	-5%	-11%

Tableau 18 : Comparaison des débits simulés dans les six canaux du scénario sans gestion collective et du scénario de référence. Indicateur : écarts minimum et maximum observés entre les 20 simulations

Par ailleurs, le Tableau 18 indique également, que l'effet sur les débits des canaux 5 et 6 n'est pas stable (écart positif ou négatif par rapport au scénario de référence). Cela peut être attribué à deux phénomènes. Tout d'abord le fait que dans le scénario de référence les débits des deux derniers canaux sont déjà à un niveau très bas. La preuve en est que lorsque qu'on observe l'assolement de leur périmètre sur la Figure 50 on s'aperçoit qu'il est très peu dense. Ainsi, une nouvelle diminution de leurs débits n'a qu'un effet relatif vu le niveau de départ. En réalité, la variabilité de leurs débits provient plus de la variabilité du nombre de parcelles affectées à chaque canal (§1.3). Le deuxième point qui semble être la cause de l'instabilité des débits des canaux 5 et 6, est la faible influence des méthodes de gestion collective sur ces canaux. En effet, avec ou sans gestion collective, les débits de ces canaux semblent inchangés. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons procédé à un test de Mann Whitney dans lequel l'hypothèse H_0 est la similarité de l'échantillon de 20 répétitions des débits du canal 5 (puis dans un deuxième test, du canal 6) entre le scénario de référence et celui sans gestion collective. L'hypothèse H_1 étant alors la différence significative qui existe entre les deux scénarios. Le test à été mené au seuil 5%. Le résultat du test a accepté H_0 , ce qui confirme l'hypothèse que l'absence de gestion collective n'a pas eu d'effet significatif sur les débits des canaux 5 et 6.

Enfin, pour les canaux 2, 3 et 4, on constate effectivement une baisse significative des débits montrant l'importance de la gestion collective pour ces canaux. Toutefois, l'effet n'est pas réellement amplifié au fur et à mesure qu'on va vers l'aval comme on le prévoyait (1 point d'écart entre les canaux 2 et 3 et entre les canaux 3 et 4). L'apport de la gestion collective semble se limiter à contraindre le canal 1 au bénéfice des canaux suivants sans distinction amont aval. Une explication possible à cette dichotomie canal 1 / reste du système, pourrait être **la réaction en chaîne de l'effet de la gestion collective**. A savoir que lorsque le canal 2 bénéficie d'une réduction de la prise d'eau du canal 1, il est lui même contraint par une demande de partage de la part du canal 3, qui en bénéficie à son tour et ainsi de suite. Finalement seul le dernier canal du système ne redonne pas ce qu'il gagne d'un côté, mais nous ne pouvons le confirmer au vu des résultats, non significatifs, observés sur le canal 6. Cet effet en chaîne complexe demanderait à être ramené à la réalité du terrain.

1.6.3 Scénario climatique extrême

L'analyse qui suit permet de tester l'effet d'une situation climatique extrême et continue et l'influence de la chronologie hydrologique du fichier d'entrée. Pour cela le scénario qui est utilisé est une répétition de la même année hydrologique sur les 10 ans de simulation et l'année choisie est l'année 1989 du fichier d'entrée qui est l'année la plus sèche du fichier.

➤ Résultats attendus

Les effets attendus sont une :

- Diminution progressive des parcelles de paddy cultivées jusqu'à un plateau correspondant à l'équilibre entre l'offre et la demande en eau ;
- Diminution du revenu de la population et du pourcentage de culture d'oignons cultivés ;
- Augmentation des inégalités dans le système se traduisant par un écart entre le nombre de parcelles cultivées sur les périmètres amont et celui sur les périmètres aval, plus important que dans le scénario de référence.

➤ Résultats simulés

On constate en premier lieu une diminution effective des parcelles de paddy cultivées comme indiqué sur la Figure 52. Néanmoins par rapport à ce qui était escompté, la diminution n'est pas linéaire et ce bien qu'il n'y ait pas de variation hydrologique entre les années. Par ailleurs l'évolution du cash est de son côté, linéaire. Cette perturbation est donc due à un autre facteur que le facteur économique. Lorsque l'on observe les autres indicateurs on s'aperçoit que les débits dans les canaux évoluent également de manière non linéaire, ainsi que l'ISC des agents – gestionnaire de canal (Figure 53 et Figure 54).

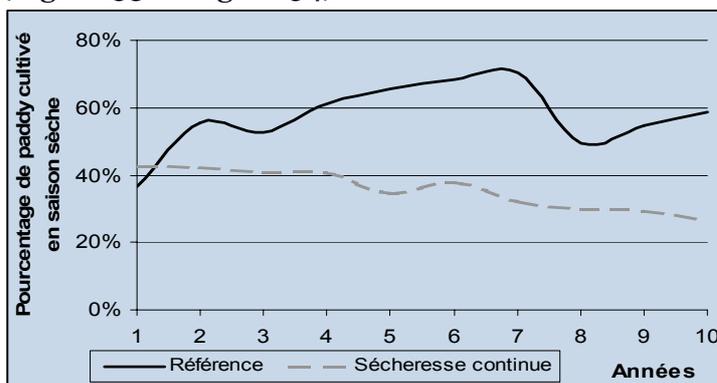


Figure 52 : Assolement comparé de la zone de paddy - Sc. sécheresse continue / Sc. Référence (moyenne de 20 répétitions)

Cela laisse à penser qu'en réalité, la décroissance non linéaire de la Figure 52 est due aux fluctuations des débits et de l'ISC des canaux. Ces fluctuations sont le résultat du jeu de la gestion de l'eau et de l'équilibre entre l'offre et la demande en eau à chaque année (cette équilibre n'étant pas le même tous les ans). Il est possible d'attribuer cela au fait que les agents ajustent leurs parcelles cultivées en fonction de l'offre qu'ils ont obtenue l'année précédente. Il y a donc un décalage diachronique permanent entre le moment où l'agent prend sa décision et la date à laquelle son paramètre de décision a été calculé. Ainsi, les choix d'une année ne correspondent plus à l'offre réelle. Ce signal est alors amplifié via le jeu de la gestion des canaux ; si une année, un canal passe juste en dessous de la valeur seuil déclenchant un tour d'eau par exemple, cela va modifier les équilibres et entraîner de nouvelles variations l'année d'après. Il est donc intéressant de constater que les cycles, et fluctuations observés sur les paramètres de la gestion de l'eau mais également sur des paramètres plus globaux, ne sont pas uniquement dus aux fluctuations des fichiers d'entrée hydrologique et économique, mais que la gestion des parcelles et la gestion de l'eau a une part non négligeable dans l'évolution du système.

Ainsi par rapport au plateau de stabilisation du pourcentage de paddy cultivé que l'on avait escompté, on peut supposer que même au delà des 10 ans de simulations ce plateau ne sera pas observé du fait des fluctuations évoquées plus haut.

Concernant la diminution du cash des exploitations elle est effectivement constatée ; on observe une différence de 5000 baht pour le cash moyen de la population en défaveur du scénario de sécheresse continue (écart type moyen de 800 baht). De même le pourcentage d'oignons a nettement diminué ; il n'est plus que de 5% à la saison sèche de la dixième année alors qu'il est de 20% dans le scénario de référence.

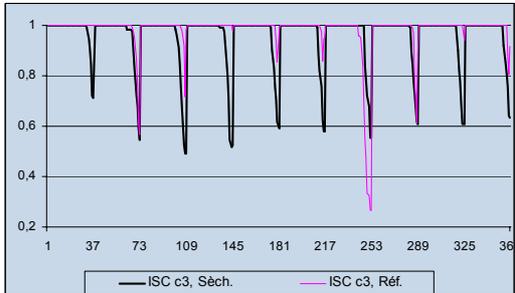


Figure 53 : ISC canal 3, Sc. Sécheresse continue/Sc. réf.

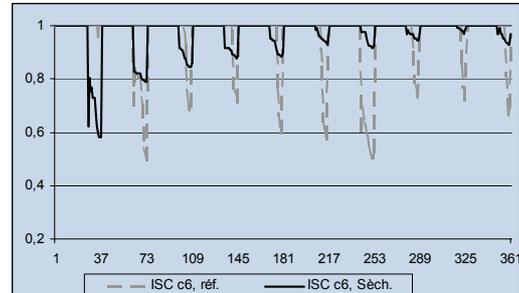


Figure 54 : ISC canal 6, Sc. Sécheresse continue/Sc. réf.

On remarque également un fait intéressant dans la Figure 54 : l'ISC du gestionnaire du canal 6 est supérieur avec le scénario de sécheresse que dans le scénario de référence. En fait le modèle a tellement diminué le nombre de parcelles cultivées dans le périmètre du canal 6 que l'offre en eau pour ce canal est devenue largement supérieure aux besoins. Dans le cas du canal 3, l'effet inverse est observé. En ce qui concerne la Figure 53 de ce dernier canal, on constate qu'en simulant des années hydrologiques constantes on évite des perturbations très fortes dues à une chute brusque de l'offre en eau comme on le voit sur le scénario de référence en 7^{ème} année. Cela laisse donc entrevoir de grandes différences entre les assolements des canaux, ce qui serait alors un indicateur de l'inégalité du système, comme cela était supposé. Au regard du Tableau 19, ces inégalités se confirment. On constate une très forte diminution des parcelles dans les canaux 6, 4 et 5, par ordre croissant, et une diminution moins importante pour les canaux plus à l'amont. **Le manque d'eau chronique entraîne donc un accroissement des inégalités dans le système.** Par ailleurs, la diminution du nombre de parcelles ne suit pas strictement l'ordonnancement des canaux. Cela se voit sur le scénario de référence mais les chiffres sont plus parlant pour le scénario extrême. Cela est dû à un avantage qu'ont les canaux 3 et 5 par rapport aux canaux 2 et 4 respectivement. En effet, le modèle hydraulique réinjecte dans le débit de la rivière, juste avant les canaux 3 et 5, le ruissellement et le drainage rapides des périmètres juste à l'amont ainsi que les débits de sorties de la paire de canaux positionnée directement à l'amont. De ce fait, les canaux 3 et 5 bénéficient d'un apport supplémentaire qui crée la différence avec leur canal amont. Ce système de « by pass » de certains canaux peut s'observer facilement en cours de simulations lorsque l'on suit le point de vue sur les débits des canaux.

	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Référence	79%	62%	66%	51%	55%	40%
Sécheresse continue	56%	34%	45%	12%	25%	9%
Écart type moyen	4%	4%	3%	4%	4%	7%

Tableau 19 : Parcelles cultivées par canal (en pourcentage), Sc. Sécheresse continue/Sc. Réf.

Conclusion

Beaucoup d'informations ont été apportées par la simulation de scénarios extrêmes. Tout d'abord nous avons pu constater que le modèle était bien sensible à des fluctuations de prix et que les agents avaient tendance à investir des apports importants de trésorerie, d'abord dans l'intensification foncière puis dans l'intensification agricole (culture d'oignons). On peut se poser alors la question si il existe dans les exploitations du Mae Yam un système d'épargne ou si encore les agriculteurs ne préfèrent pas investir dans d'autres systèmes. L'achat de pick-up par exemple peut être un investissement comme on l'a vu au Premier Chapitre : 1.3, ou encore l'achat d'animaux qui est souvent un placement pour les agriculteurs de ce type de système agricole.

Par ailleurs, nous avons montré que l'influence de la gestion collective était dichotomique avec d'une part le canal amont qui limite sa prise d'eau et d'autre part le reste du système qui en bénéficie et qui répercute d'amont en aval cette offre en eau supplémentaire. La question sur le déroulement et l'effet de cette gestion sur le terrain reste posée.

Le scénario climatique extrême montre bien les interactions qui existent entre la gestion de l'eau et les autres composantes du modèle ; en effet, les paramètres extérieurs à la gestion de l'eau influencent cette dernière, et la gestion de l'eau influence également le comportement global du système. Ainsi, le scénario met en évidence l'effet d'une diminution de l'offre en eau sur les inégalités observées dans le système ; celles-ci s'en trouvent accrues.

1.7 Suivi de quelques individus types

Plusieurs suivis d'individus ont été effectués à différentes étapes de la construction du modèle afin de vérifier le bon fonctionnement de celui-ci. Par ailleurs le suivi d'individus peut également servir à fournir des éléments de réponses à des questions précises sur la dynamique du modèle. L'une des questions importantes que nous nous sommes posée est : un individu qui est dans une position économique peu favorable peut-il voir sa situation de trésorerie changer au cours de la simulation et inversement est-ce qu'un individu « riche » peut se retrouver par la suite en situation de déficit ? Cette question est importante pour savoir si l'indicateur du nombre d'agents en situation de déficit correspond à une sous population stable ou si au contraire, les individus de la sous population changent constamment. Nous avons donc procédé au suivi de la trésorerie de 50 individus au moyen des techniques classiques de traçage. La Figure 55 est une synthèse des résultats obtenus.

Après analyse de cette figure, on constate qu'il existe cinq sortes d'individus :

- des individus « **très pauvres** » en situation de déficit dès la 3^{ème} année et dont le cash va en diminuant pour atteindre quasiment -60000 baht en 10^{ème} année : individus numéro 6, 35, 37, 46 et 49 ;
- des individus « **pauvres** » également en déficit à la troisième année, mais qui se stabilisent à une trésorerie de -5000 à -10000 baht par la suite et restent dans cet intervalle jusqu'à la fin de la simulation : individus numéro 4, 9, 18, 30 et 33 ;
- une large gamme d'individus (environ 25% de l'échantillon) qui est dans une position stable **autour de zéro** de cash ; on ne constate pas de fluctuations importantes du cash d'un individu dans cette catégorie année : individus numéro 1,8, 14, 19, 21, 25, 26, 32, 36, 38, 40, 41, 43 et 48 ;
- une autre grande gamme d'individus (environ 25% de l'échantillon) correspondant aux individus « **riches** » dont le cash fluctue autour de 20000

baht de manière stable : individus numéro 3, 7, 10, 11, 15, 17, 22, 28, 29, 34, 42, 45 et 47 ;

- les individu « **très riches** » dont le cash lors des dernières années est autour de 40000 baht et va jusqu'à 60000 baht ; le cash de ces individus peut parfois chuter en fonction des investissements fonciers réalisés : individus numéro 5, 13, 16, 20, 24, 27, 31 et 44

Par ailleurs on remarque des individus dont le cash varie brusquement de manière positive ou négative alors qu'il était stable auparavant. Il s'agit des individus numéro 2, 12, 23, 39 et 50. En raison du comportement de leur trésorerie, il n'est pas possible de ranger ces individus dans l'une des classes ci-dessus. On peut parler d'individus **instables**.

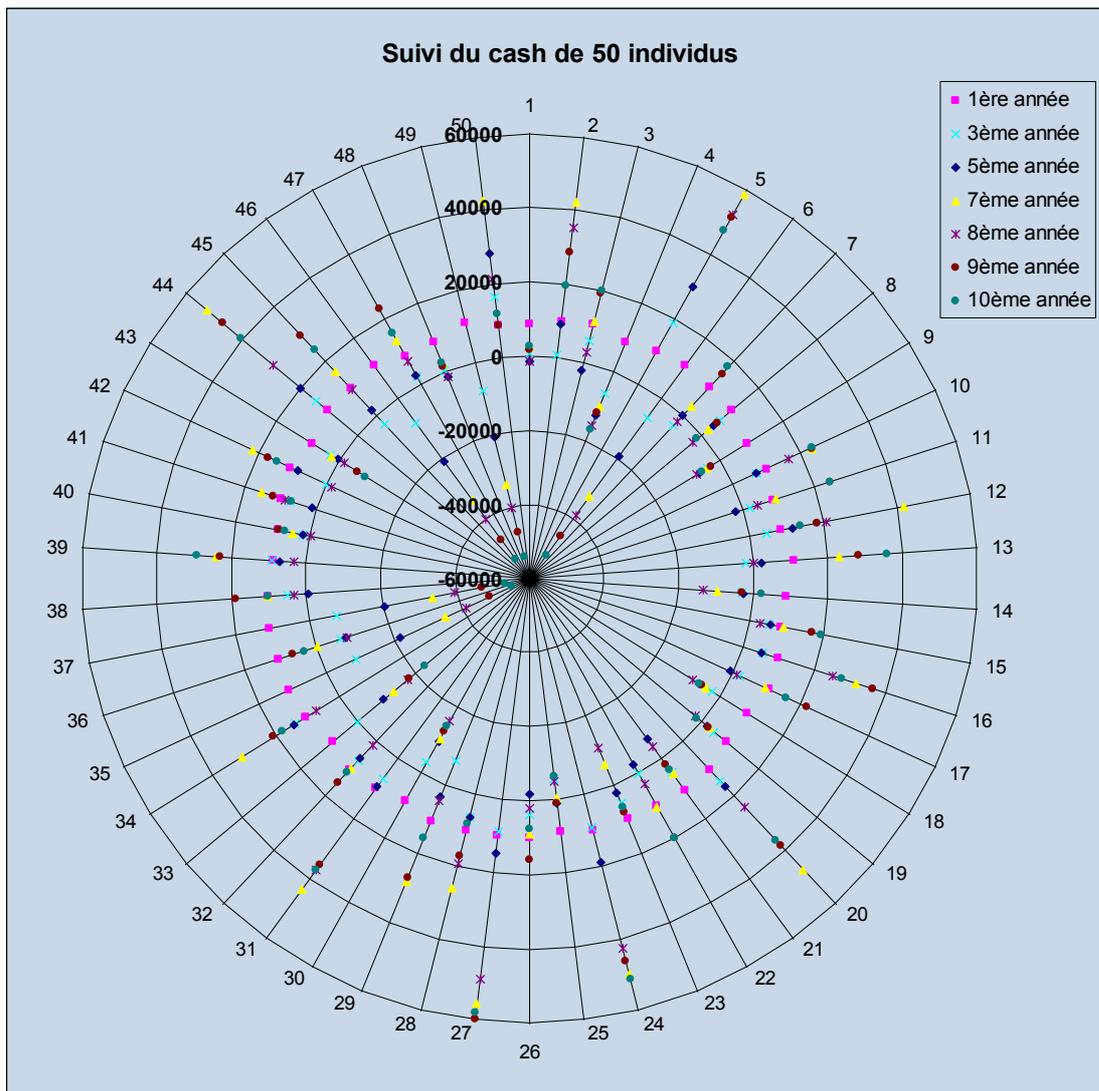


Figure 55 : Suivi du cash de fin d'année de 50 individu sur le scénario de référence

A la vue de ces résultats, outre les individus instables (10% de l'échantillon), les catégories que nous avons pu dessiner, sont des catégories stables d'individus. On constate un grand pool d'individus dans la gamme de 0 à 20000 baht (plus de 50% de l'échantillon) qui crée la tendance générale de l'évolution du cash de la population. Par ailleurs, l'investissement foncier n'est observé que pour les individus très riches. Cela laisse supposer qu'au niveau de la population globale du modèle seule une part

restreinte peut évoluer rapidement vers l'intensification de son exploitation. Nous verrons par la suite que ces suppositions seront confirmées. De même, on observe une catégorie d'individus très pauvres qui ne semblent pas pouvoir retrouver une trésorerie positive et sont contraints dans une situation de déficit permanent. Parmi ces individus on doit certainement retrouver ceux de la classe C32 qui, comme nous l'avons vu au §1.5.3, sont dans une situation non viable en raison du nombre et du type de parcelles qui leur sont affectées à l'initialisation du modèle. On peut donc poser la question de la correspondance de ces constats par rapport au terrain. **Existe-t-il dans le système du Mae Uam une sous population privilégiée et une autre défavorisée vivant cote à cote ?**

1.8 Analyse partielle de sensibilité

Mis à part pour le premier paramètre testé qui est un paramètre d'initialisation du modèle, les différents scénarios qui suivent constituent des tests d'influence des paramètres du modèle. Chaque test de sensibilité donne lieu à un jeu de 20 simulations répétées à partir du même état initial afin de privilégier la variabilité stochastique des procédures par rapport à la variabilité induite par l'initialisation. Ces simulations sont comparées à un même scénario de référence dont la simulation a également été répétée 20 fois à partir d'un même état initial. Ainsi nous pouvons effectuer les comparaisons nécessaires par rapport au scénario de référence et également avoir une estimation de la variabilité des scénarios, bien que, comme nous l'avons vu, celle-ci reste faible jusqu'à présent.

Par ailleurs les simulations de l'analyse de sensibilité contribuent également à l'exploration du système et à la compréhension du déroulement du modèle, et nous continuons à respecter le protocole de scénario qui a été établi au §1.6 consistant à décrire tout d'abord les effets attendus du scénario puis à simuler et enfin à comparer, prévu/simulé ainsi que simulé/référence.

1.8.1 Valeur initiale de l'attente du volume d'irrigation

Afin de tester la sensibilité du modèle au processus d'apprentissage de l'attente en eau des agents (paramètre qui entre dans les critères de décision de culture), nous avons simulé un scénario où cette attente est initialisée à une valeur haute ; trois niveaux d'attentes sont possibles dans le modèle : haute, moyenne, basse. Le scénario de référence est initialisé avec une attente basse. Le scénario ci-dessous initialisé avec une attente haute, est appelé scénario « optimiste ».

➤ Résultats attendus

Nous anticipons pour ce scénario, une augmentation du nombre de parcelles cultivées la première année, en raison de la valeur haute de l'attente en eau. Puis pour la deuxième année, nous nous attendons à trouver un nombre de parcelles cultivées inférieur à celui du scénario de référence. En effet, la forte demande en eau de la première année devrait induire un fort déséquilibre offre/demande qui pénalisera un grand nombre de parcelles du point de vue de la quantité d'eau d'irrigation reçue. De ce fait le choix de culture de la deuxième année se fera dans des conditions d'attente en eau très basses (le critère d'attente en eau d'une année N dépend uniquement de la quantité reçue à l'année N-1 ; l'apprentissage n'est pas « lissé » par une moyenne sur plusieurs années ou par une valeur historique). Nous nous attendons enfin à ce que le nombre de parcelles cultivés du scénario optimiste retrouve celui du scénario de

référence après trois ou quatre années ; le temps que le niveau d'attente en eau se stabilise autour de l'équilibre offre/demande.

➤ Résultats simulés

On note tout d'abord sur la Figure 56 que le pourcentage de parcelles cultivées (dans la zone de paddy) est supérieur à la référence durant la première année, et également durant la deuxième année contrairement à ce qui était attendu. De plus, ce niveau ne retrouve quasiment jamais celui du scénario de référence. Dans les dernières années on note toujours une différence de 4 à 5%, alors que les écarts types sont de 1 à 2%. Ainsi le scénario optimiste devient pénalisant dès la 4^{ème} année du point de vue des parcelles mises en culture. Par ailleurs ce scénario entraîne un effet temporaire sur le nombre d'exploitations en situation de déficit (Figure 57). En effet, on peut lire sur ce graphique qu'il y a moins de déficit permanent (pic bas en fin d'année) pour le scénario optimiste durant sur les cinq premières années ; la différence étant significative au risque 5% suivant le test de Mann-Whitney. Ainsi, l'impact d'une augmentation de l'attente en eau initiale est favorable aux agents durant les premières années mais diminue par la suite les assolements dans la zone de paddy (bien que cela ne soit pas observable au niveau des exploitations en déficit).

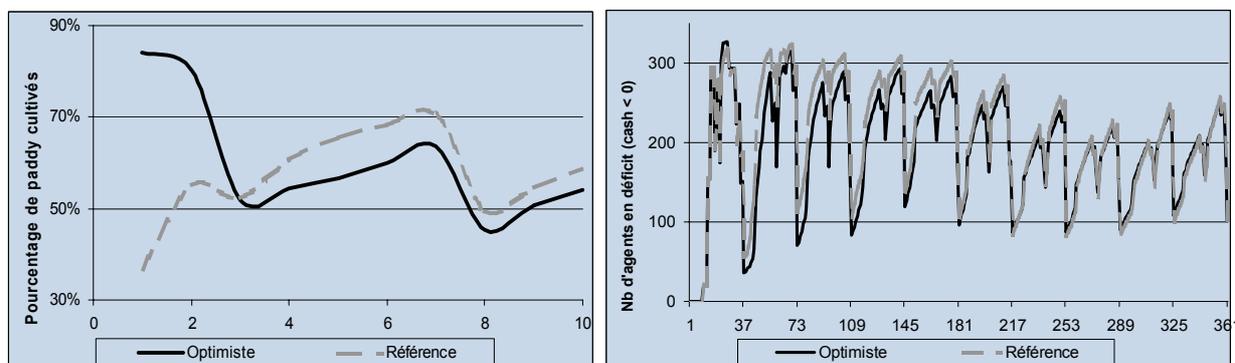


Figure 56 : Assolement de la zone de paddy – moy. sur 20 répétitions (écart type moyen de 1 à 2%)

Figure 57 : Nombre d'exploitations en déficit (moyenne sur les 20 répétitions)

Par ailleurs les différences d'assolement se ressentent au niveau du critère de satisfaction (ISC) des agents-gestionnaire de canal (Figure 58 et Figure 59).

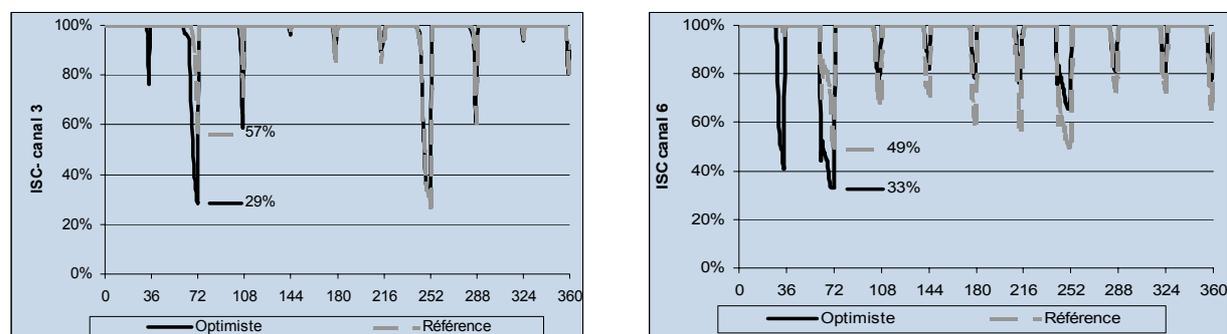


Figure 58 : ISC du gestionnaire du canal 3 (moyenne sur les 20 répétitions)

Figure 59 : ISC du gestionnaire du canal 6 (moyenne sur les 20 répétitions)

Lorsque la différence d'assolement est très importante comme c'est le cas de la deuxième année, l'effet s'en ressent sur l'ISC des deux canaux cités en exemple, par

contre la différence moins importante dès années suivantes ne se lit que sur le canal 6, positionné tout en aval.

➤ **Conclusion**

Le niveau d'initialisation de l'attente en haut du processus d'apprentissage, est un paramètre sensible du modèle, pour les résultats des quatre à cinq premières années. Son effet les années suivantes est moins significatif au niveau du bassin dans son ensemble, mais reste marqué à l'échelle des périmètres des canaux. La satisfaction plus importante pour le canal 6 tout au long de la simulation du scénario optimiste, est en réalité due au fait que son assolement a été fortement réduit. Ainsi, l'augmentation de l'attente en eau initiale induit un accroissement des inégalités amont/aval (particulièrement sur le dernier canal). Autrement dit, lorsque tout le monde augmente sa consommation en eau, se sont ceux de l'aval qui en subissent les conséquences ; ce qui ne nous apprend rien de nouveau par rapport aux fonctionnement des systèmes réels !!!

1.8.2 Facteurs de nature climatique

Comme nous l'avons vu au §1.6.3 ainsi que dans d'autres chapitres, l'ordre des années de la séquence climato-hydrologique, qui est utilisé dans le scénario de référence, a un effet notable sur les résultats des simulations. Afin d'étayer cette question, nous avons cherché à voir la sensibilité du modèle à deux scénarios ayant des séquences climatiques différentes.

Le premier est une succession aléatoire des années climato-hydrologiques (pluie et ETP pour le climat et débits de la rivière pour l'hydrologie), piochées parmi les cinq ans de données du fichier d'entrée. Le deuxième scénario teste l'impact d'années très sèches (El Nino). Les années El Nino apparaissent dans les simulations avec une probabilité de 1 sur 6. Ainsi, la date d'apparition de ces années n'est pas constante d'une simulation à l'autre. L'année « El Nino » correspond à l'année 1989 du fichier d'entrée (année la plus sèche) mais avec des débits et une pluviométrie, diminués de moitié.

a) Succession aléatoire des années climatiques

➤ **Résultats attendus**

Nous nous attendons dans ce cas à un déplacement des effets des années les plus sèches (notamment l'année 1989 qui arrive en année 2 et année 7 dans le scénario de référence). L'effet le plus important d'une année sèche est la diminution du nombre de parcelles cultivées l'année suivante. Ainsi, en regardant une simulation de ce scénario on devrait voir des diminutions d'assolement sur d'autres années que celles du scénario de référence. Par ailleurs, en faisant la moyenne entre les 20 répétitions de ce scénario, on devrait obtenir un effet lissé des variations du nombre de parcelles cultivées.

➤ **Résultats simulés**

Les résultats présentés dans la Figure 60 confirment nos présomptions. Lorsque l'on regarde qu'une simulation, on note bien l'effet de diminution des parcelles cultivées l'année qui suit, une année sèche (les années sèches dans l'exemple de la Figure 60 sont les années 3 et 7, ainsi que l'année 8 où la sécheresse est un peu moins prononcée). Par ailleurs les résultats sur l'ensemble des simulations montrent que dans un premier temps le modèle ajuste les assolements de manière à atteindre un

équilibre offre/demande en eau. Puis les variations d'assolement sont quasi minimales, indiquant ainsi que **des variations brusques de l'assolement du bassin sont dues aux fluctuations climatiques**. La tendance à la baisse de l'assolement est due à un facteur non climatique, mais ayant tout de même une influence sur l'équilibre offre/demande en eau. Le seul paramètre correspondant à ce critère dont une évolution est constatée durant les simulations est la part des cultures d'oignons dans l'assolement du bassin. En effet, le choix pour la culture d'oignons est croissant au cours des simulations en raison d'une augmentation de la trésorerie des exploitations, ou d'une partie des exploitations, ce qui leur permet d'investir dans des cultures à haut potentiel. Or la demande en eau des cultures d'oignons est plus importante que celle des autres cultures. Ainsi, ce scénario permet de mettre en avant l'impact de la culture d'oignons sur la demande en eau et sur le système dans son ensemble, alors que jusqu'à présent nous ne pouvions le deviner puisqu'il était « noyé » dans les effets dus aux fluctuations climatiques. Dans cette modélisation, **l'intensification de l'agriculture (augmentation des cultures à haut potentiel) a donc un effet négatif sur le nombre de parcelles qu'il est possible de mettre en culture**. Il est également tout à fait probable que de ce fait, certains agriculteurs plus en aval, ne puissent plus cultiver, **d'où un accroissement des inégalités dans le système**.

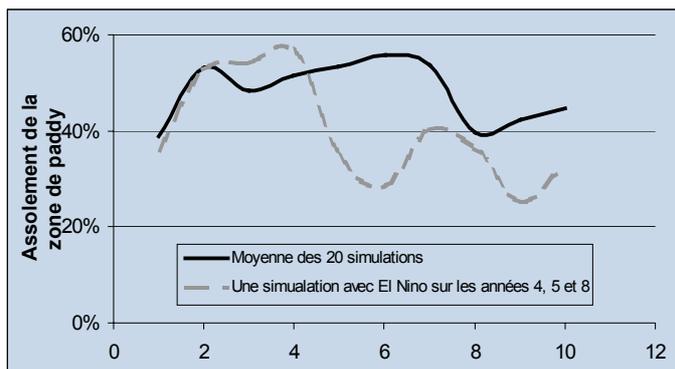


Figure 60 : Évolution au cours des 10 années de simulation de l'assolement de la zone de paddy pour le scénario aléatoire d'années climatiques

b) Une chance sur six, d'avoir un phénomène El Nino à chaque année

➤ Résultats attendus

Nous nous attendons à une diminution des assolements l'année qui suit une perturbation climatique El Nino. Globalement sur le système, on peut anticiper un accroissement des inégalités amont/aval du fait que les canaux amont seront les moins touchés par ce phénomène.

➤ Résultats simulés

On remarque en effet un effet des événements El Nino sur le pourcentage de parcelles cultivées, qui est diminué l'année suivante (Figure 61). La courbe de la moyenne des 20 simulations n'offre pas d'intérêt dans ce cas du fait que, semble-t-il, le tirage aléatoire des années El Nino a été plus important sur l'année 7 (diminution du paddy l'année 8).

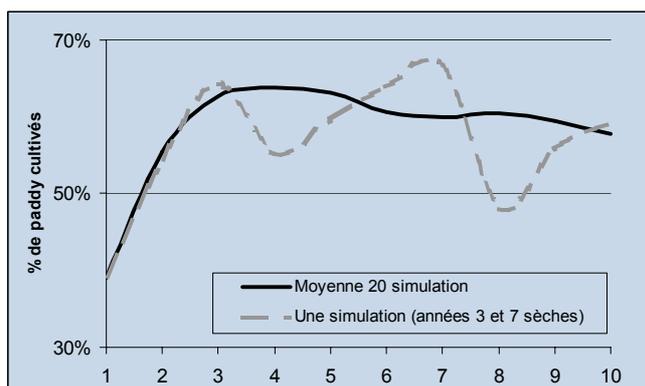


Figure 61 : Assolément de la zone de paddy avec le scénario El Nino aléatoire

c) Conclusion

L'analyse de la sensibilité aux successions climatiques a permis de rendre compte de leur importance pour les assolements du bassin, et de la sensibilité du modèle à l'ordre de ces successions. Par ailleurs nous avons pu également montrer l'importance des effets de la culture d'oignons, qui sont d'ailleurs loin d'être négligeables. La culture d'oignons entraîne, dès la deuxième année où elle apparaît jusqu'à la fin de la simulation, une diminution d'environ 6% du nombre de parcelles cultivées.

1.8.3 Paramètres de la gestion de l'eau

Deux facteurs de la gestion de l'eau sont testés. Le premier est en liaison avec la gestion individuelle et le deuxièmement avec la gestion collective.

a) Valeur de la taille des piangs

Rappelons que les deux seuls paramètres de la gestion individuelle sont la taille et le nombre des piangs. Ces deux paramètres restent constants une fois entrés dans le modèle ; leur valeur initiale a donc une influence sur l'ensemble de la simulation. Par ailleurs, le nombre de piangs est, de part la gestion collective, fixé à un par parcelle. Un agent qui en utilise deux est considéré comme un voleur. Dans le cadre strict de l'analyse de sensibilité nous ne modifierons pas ce deuxième paramètre par contre il paraît important de faire varier la taille des piangs qui a été fixée à 100 dans le scénario de référence (correspond à 1 cm maximum d'irrigation par jour et par unité de surface).

Deux taille de piang sont testés : -30 et +30% de la valeur du scénario de référence. Mis à part le paragraphe sur les effets attendus des scénarios, nous avons regroupé la présentation des résultats et l'analyse des deux scénarios afin d'alléger ce chapitre.

➤ Résultats attendus

Taille des piangs de 70

Les effets attendus de la diminution de la taille des piangs de l'ensemble des parcelles irriguées, sont tout d'abord une meilleure distribution du nombre de parcelles cultivées au sein de la zone de paddy (sous entendu entre les périmètres des six canaux d'irrigation). En effet, la diminution de la taille des piangs devrait entraîner une diminution des prises d'eau des canaux. Cette diminution au niveau des canaux amont permettra alors aux canaux aval de satisfaire plus facilement leur demande en

eau, sachant que même avec un apport de 7 mm / jour, la demande physiologique des cultures est atteinte. Ainsi, nous nous attendons à des rendements identiques au scénario de référence. Par ailleurs, on peut supposer de ce fait que la diminution du "gaspillage" de l'eau permettra à d'autres parcelles d'être mises en culture et notamment durant la saison sèche avec des cultures de rente. On s'attend alors, non pas à une augmentation de la trésorerie de la population, mais à une augmentation des investissements fonciers, comme nous l'avons vu au §1.6.1. Enfin, étant donné que ce scénario agit sur les parcelles et pas sur les agents eux mêmes, nous pouvons nous attendre à des effets dans des proportions identiques pour les six classes d'agents définis à l'initialisation.

Taille des piangs de 130

Un effet inverse au scénario précédent est attendu concernant le nombre de parcelles cultivées et les débits des canaux ; à savoir que nous nous attendons à un déséquilibre amont-aval de ces paramètres plus important que dans le scénario de référence. Par ailleurs, nous pensons que cela aura globalement un effet négatif sur le revenu des exploitations. Plus précisément nous nous attendons à ce que le revenu des exploitations de l'amont reste inchangé (car elles profitent d'un apport en eau supplémentaire), mais que celui des exploitations de l'aval soit pénalisé du fait des prélèvements supplémentaires à l'amont.

➤ **Résultats simulés**

Le premier indicateur que nous observons ici est le pourcentage de parcelles cultivées par canal (Tableau 20). On constate ainsi la faiblesse des écarts avec le scénario de référence. Par ailleurs, les écarts types des 20 répartitions sont également à prendre en considération avant de statuer sur un écart significatif ou non. Finalement au regard de ces deux indicateurs, seuls les assolements des canaux 1 et 6 semblent présenter des écarts significatifs. Nous avons alors poussé l'analyse, en effectuant des tests de Mann Whitney.

		Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Piang 70	Moyenne	72%	66%	67%	46%	50%	31%
	Écart Type	6%	5%	3%	8%	6%	4%
Piang 130	Moyenne	82%	61%	69%	46%	55%	36%
	Écart Type	3%	6%	4%	4%	4%	4%
Référence	Moyenne	79%	62%	66%	51%	55%	40%
	Écart Type	4%	4%	4%	4%	4%	7%

Tableau 20 : Pourcentage de parcelles cultivées par canal - moyenne et écart type sur les 20 répétitions

Au vu de ce test et au seuil de signification total de 5%, la différence entre le scénario piang 70 et le scénario de référence est significative pour les canaux 1 et 6. Par contre pour le scénario piang 130, la différence est significative pour le canal 1 mais pas pour le canal 6.

Bien que l'analyse des moyennes et écarts types, appuyée par des tests non-paramétriques sur ces seuils ait apportée des éléments d'informations, nous ne pouvons pousser l'interprétation plus en avant du fait du manque de données. Cette analyse ne permet pas, par exemple, de rendre compte d'évolutions au cours de la simulation qui pourraient différer suivant les scénarios. Pour appuyer ce propos et affiner l'analyse de la sensibilité de la taille des piangs, nous donnons deux exemples. Ceux-ci se basent sur l'évolution au cours de la simulation du pourcentage de parcelles cultivées ; avec pour le scénario *piang 70*, l'exemple du canal 3 (Figure 63) et pour le scénario *piang 130*, l'exemple du canal 2 (Figure 62). Seule la moyenne des 20 répétitions est figurée, ce qui ne laisse pas entrevoir la variabilité des scénarios (écart type d'environ 5%).

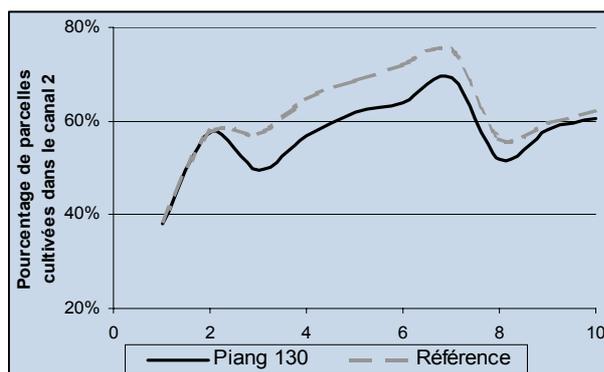


Figure 62 : Assolement du canal 2 pour une taille de piang de 130

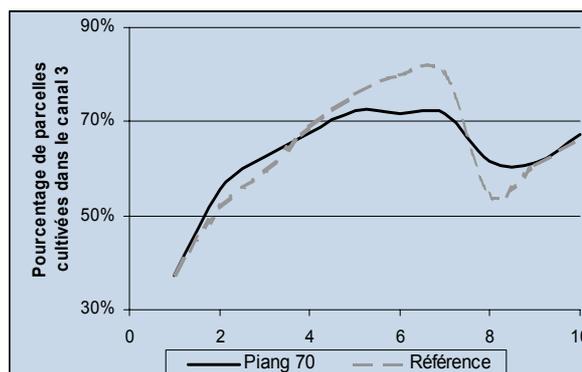


Figure 63 : Assolement du canal 3 pour une taille de piang de 70

On constate via ces deux figures que bien qu'en début et en fin de simulation les résultats des deux scénarios sont similaires, les évolutions au cours de la simulation ne le sont pas forcément.

Les résultats des autres indicateurs choisis pour analyser la sensibilité à la taille des piangs sont données de manière synthétique ci-dessous :

- Investissements fonciers : Aucune différence significative au seuil 5% par le test de Mann Whitney ;
- Rendements : On constate une différence significative au seuil 5%, pour les rendements en soja de la saison sèche de la 10^{ème} année, des deux scénarios de variation de la taille des piangs, respectivement comparés au scénario de référence. Les rendements simulés sont de **2,87 T/ha** pour le scénario piang 70, de **2,40 T/ha** pour le scénario piang 130 et de 2,42 T/ha pour le scénario de référence.
- Écarts de revenus : l'indicateur retenu est le cash moyen de la population à la fin de la 10^{ème} année. Le test de Mann Whitney indique une différence **significative** entre le scénario piang 130 (cash moyen **7308 baht**) et le scénario de référence (cash moyen **9154 baht**) et une différence **non significative** pour le scénario piang 70 (cash moyen 9533 baht).

➤ Conclusion

Comme nous nous y attendions, l'augmentation de la taille des piangs a un effet négatif sur le revenu de la population dans son ensemble. Cela est dû en partie à une diminution des rendements des cultures de rente (on peut supposer que les rendements en oignons sont également diminués) et en partie à une diminution du nombre de parcelles cultivables dans les périmètres des canaux (sauf pour le canal 1)

bien que cette cause soit dans des proportions relativement faibles (écarts d'à peine quelques pour cent ; 1 à 4%). Les écarts d'assolement donnent d'ailleurs des différences non significatives avec le test de Mann Whitney, alors que d'autres indicateurs tendent à montrer tout de même des différences en cours de simulations relativement importantes (7 à 8%). Par ailleurs, nous avons supposé que ce scénario entraînerait un déséquilibre amont-aval. On constate bien un tel phénomène mais il se produit entre le canal 1 (et un peu le canal 3) et le reste des canaux ; il n'est pas progressif d'amont en aval.

L'effet de la diminution de la taille des piangs est beaucoup moins net et contradictoire avec ce qui était attendu. On constate d'une part une hausse des rendements en soja et d'autre part une tendance vers la baisse des parcelles cultivées dans le périmètre. Cela laisse à penser que l'augmentation de l'eau disponible est bien partagée entre les différents canaux (ainsi qu'au sein des canaux), ce qui permet de diminuer le stress hydrique des cultures. Par ailleurs la diminution du nombre de parcelles cultivées pourrait provenir de la méthode du processus d'apprentissage. En effet, la méthode d'estimation de la quantité d'eau est faite de manière absolue (et non pas relative par rapport à la demande physiologique de la plante). Ainsi, lorsque les parcelles ne reçoivent plus que 7mm/jour, l'agent-agriculteur estime qu'il est face à un manque d'eau (bien que la demande physiologique soit satisfaite), et va alors avoir tendance à diminuer son nombre de parcelles cultivées. L'un dans l'autre, la diminution des parcelles cultivées et l'augmentation des rendements, semblent se compenser puisqu'aucun effet notable n'est constaté sur le revenu. A ce propos, nous nous attendions à un effet beaucoup plus fort permettant aux agents de réaliser des investissements fonciers. Il n'en n'est rien.

Ainsi, le modèle montre une sensibilité relative à la taille des piangs. Elle est importante lorsque la taille des piangs est accrue ; on constate tout de même un écart de 20% sur le revenu de la population. Par contre la sensibilité sur la population dans son ensemble est moindre lorsque la taille des piangs est diminuée, notamment en partie à cause des méthodes du processus d'apprentissage et en partie par des effets de compensation. Par contre, dans les deux cas (hausse ou baisse) on constate un effet sur les équilibres existants entre les canaux ; avec d'une part un accroissement des inégalités lorsque la taille des piangs est augmentée et d'autre part une légère tendance vers un meilleur équilibre entre les canaux lorsque la taille est diminuée (cet effet est toutefois à relativiser étant donné que le canal 6 continue d'être défavorisé). Ce constat permet ainsi d'appuyer le fait que le système d'irrigation par les piangs est un système créé pour garantir l'équité dans le périmètre et confirme que ce phénomène est bien pris en compte par le modèle.

b) Paramètres du processus de négociation

Deux scénarios sont testés dans cette partie : l'un simule des négociations plus souples entre les gestionnaires de canaux, et l'autre simule des négociations impossibles entre les deux zones du bassin.

Afin de modéliser le scénario de négociation souple nous avons modifié le seuil d'acceptation d'une demande de partage de l'eau (diminution de la prise d'eau). Ainsi, dans le scénario testé, le partage se déclenche à partir d'un écart de 10% entre l'ISC amont (critère de satisfaction) et l'ISC aval, au lieu de 20% dans le scénario de référence. Le système des tours d'eau entre deux canaux d'une paire est inchangé.

Pour simuler l'absence de négociation entre la zone 1 et la zone 2, nous avons augmenté très fortement le seuil de déclenchement de la négociation de manière à ce qu'il ne soit jamais atteint, mais uniquement dans le cas de négociations entre les

zones. Les négociations au sein de la zone 2 ainsi que le système des tours d'eau entre deux canaux, sont inchangés.

➤ Résultats attendus

Négociations plus souples

Nous anticipons pour ce scénario un effet négatif sur les parcelles de la zone 1 (débits dans les canaux, nombre de parcelles cultivées et peut être un effet sur les rendements) du fait du partage plus important que dans le scénario de référence. Par ailleurs, pour les deux zones, on peut s'attendre à ce que l'assolement en rive droite soit diminué (diminution des parcelles cultivées) du fait de la diminution des prises d'eau de ces canaux lors d'un partage avec les canaux en amont. A l'inverse, pour les parcelles de la rive gauche on s'attend à une augmentation des cultures (les canaux de la rive gauche ne diminuent pas leur prise d'eau lors d'un partage).

Pas de négociations entre la zone 1 et la zone 2

Dans ce cas, on s'attend un effet négatif sur la zone 2 (débits dans les canaux, nombre de parcelles cultivées et peut être un effet sur les rendements); la situation de la zone 1 restant inchangée.

➤ Résultats simulés

Nous avons choisi de baser l'analyse sur les résultats du pourcentage de parcelles cultivées dans chacun des canaux, ainsi que sur la trésorerie globale de la population.

Au vue des résultats du Tableau 21 la première constatation est les très faibles écarts entre les scénarios de tests du processus de négociation et le scénario de référence. Seuls, quelques canaux semblent procurer des écarts (notés en gras italique dans le tableau). Parmi ces canaux, le test de Mann Whitney indique que seuls les écarts des canaux 1, 2 et 4 du scénario de négociation souple, sont significatifs. La tendance, aussi faible soit elle, est donc inverse à ce que nous attendions. A savoir qu'on observe un gain pour le canal 1 et une baisse du nombre de parcelles cultivées pour les canaux 2 et 4. Nous ne voyons pas ce qui pourrait justifier cette tendance inverse. Il semblerait en fait que les échantillons ne comportent pas suffisamment de répétitions pour réellement statuer sur ces écarts. Par ailleurs, pour le canal 1, on constate que l'échantillon du scénario de négociation souple a globalement été initialisé avec un nombre de parcelles exploités plus élevé que pour le scénario de référence, ce qui peut contribuer à expliquer l'écart observé au Tableau 21.

		Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Négociations souples	Moyenne	84%	57%	66%	44%	55%	35%
	Écart Type	4%	5%	5%	4%	4%	5%
Pas de négociation entre les zones	Moyenne	81%	64%	67%	50%	54%	36%
	Écart Type	4%	5%	5%	5%	4%	5%
Référence	Moyenne	79%	62%	66%	51%	55%	40%
	Écart Type	4%	4%	4%	4%	4%	7%

Tableau 21 : Pourcentage de parcelles cultivées dans les six canaux - effet des processus de négociations

Au niveau de la trésorerie globale de la population, seul le scénario de négociation souple a une différence significative avec la référence (Mann Whitney au seuil de 5%, sur le cash de la 10^{ème} année). Elle est de 600 baht de moins dans le cas d'une

négociation souple entre les canaux ; cet écart provient à priori, des différences déjà constatées des assolements.

➤ **Conclusion**

Le modèle n'est donc pas (ou très peu) sensible aux variations des paramètres du processus de négociations, ou plutôt au seuil de déclenchement du partage de l'eau. Par ailleurs, l'effet même de ce partage entre la zone 1 et la zone 2, ne semble pas avoir d'influence sur le système aval. Un début d'explication pourrait provenir du fait que les volumes, que la zone 2 perd via l'absence de négociation, sont en quelque sorte, regagnés via le retour du ruissellement et du drainage des parcelles de la zone 1 et des débits sortant des canaux 1 et 2, dans la rivière juste au début de la zone 2. Toutefois, cette compensation reste hypothétique.

Par ailleurs, la très faible importance de la gestion collective constatée ici, concerne uniquement les négociations entre l'amont et l'aval. En effet, le système de tour d'eau entre canaux a lui, un effet certain sur le système. Nous avons pu nous en apercevoir lors du scénario extrême dans lequel toutes les méthodes de la gestion de l'eau avaient été retirées (§1.6.2). Nous avons alors montré que la gestion collective avait un effet dichotomique (canal amont par rapport au reste du système). Au vu des résultats que nous venons d'obtenir à présent, il semblerait donc que cet effet, soit uniquement dû au système de tour d'eau entre les canaux.

1.8.4 Efficacité technique des barrages

L'un des paramètres du modèle hydraulique de distribution de l'eau dans les canaux est le pourcentage maximum du débit de la rivière qu'un barrage peut prélever. Ce paramètre correspond à l'efficacité technique des barrages du Mae Yam, qui a été fixé à 90% dans le modèle, selon les informations que nous avons de la littérature. Afin de tester la sensibilité du modèle à ce paramètre, le scénario que nous avons défini utilise un coefficient de prélèvement maximum des barrages de la zone 1 de 60%, ceux de la zone 2 demeurant inchangés. Ainsi, nous pouvons à la fois mesurer l'impact de ce coefficient sur la zone 1, et explorer les effets d'une diminution de la consommation en eau de la zone 1, sur la zone 2.

➤ **Résultats attendus**

Les impacts attendus de ce scénario sont d'une part, une situation inchangée dans la zone 1 du point de vue des assolements (une diminution, même de 30% des prélèvements, ne devrait pas être suffisante pour que l'offre en eau dans la zone amont devienne une contrainte), et d'autre part un accroissement des parcelles cultivées dans la zone 2, du fait qu'elles bénéficient d'une offre en eau supérieure sans laquelle, la contrainte en eau est une contrainte.

➤ **Résultats simulés**

Contrairement à ce qui était attendu, on constate un effet significatif (confirmé par le test de Mann-Whitney) sur la zone 1 (Tableau 22). Comme pour le scénario avec une taille de piang réduite (§1.8.3), la raison vient du fait que le processus d'apprentissage est basé sur une valeur absolue et fixe de la quantité d'irrigation. L'agent-agriculteur est alors incapable de s'adapter à des apports en eau inférieurs (bien qu'ils restent supérieurs à la demande physiologique) sans diminuer le nombre de parcelles cultivées.

		Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Efficacité 30% moindre pour les barrages de la zone 1	Moyenne	72%	56%	68%	51%	57%	37%
	Écart Type	4%	3%	4%	5%	5%	4%
Référence	Moyenne	79%	62%	66%	51%	55%	40%
	Écart Type	4%	4%	4%	4%	4%	7%

Tableau 22: Pourcentage de parcelles cultivées. Effet de l'efficacité technique des barrages de la zone 1

Par ailleurs, on constate également une légère augmentation de 6% du nombre d'agents-agriculteurs ne cultivant pas de parcelles durant la saison sèche (différence significative avec le scénario de référence, au seuil 5%). Cette augmentation est justement liée à la diminution du nombre de parcelles cultivées.

On peut donc en conclure que d'une part le pourcentage maximum de prélèvement d'un barrage est un paramètre sensible du modèle, et d'autre part que le processus d'apprentissage lié à l'attente en eau a parfois des effets plus importants que ce que l'on souhaiterait. Ce dernier, constitue réellement un point clé du modèle et influence directement les assolements, de manière plus importante que les autres facteurs du processus d'apprentissage. Il influence de ce fait un grand nombre de facteurs qui y sont liés, dont notamment la trésorerie de la population, l'équilibre entre l'offre et la demande en eau, ou encore les rendements de cultures.

1.8.5 Conclusion

L'analyse de sensibilité a permis de mettre en avant les paramètres importants du modèle. Ainsi, parmi les paramètres et procédures ayant le plus d'effet sur le modèle, il y a le processus d'apprentissage de l'attente en eau qui est utilisé dans le choix de culture. Comme nous l'avons vu dans pratiquement tous les exemples cités plus haut, ce dernier influence notamment les assolements de la zone de paddy, qui est la zone clé du système. Par ailleurs, concernant la gestion de l'eau, nous avons mis en avant le fait que les processus de négociations et leurs paramètres n'avaient que peu d'influence sur le modèle ; contrairement au système de tour d'eau qui permet aux canaux de la rive gauche de subvenir à leurs besoins en eau durant la saison sèche. De même, le système des piangs est un paramètre important du modèle et le changement de la valeur des piangs (surtout à la hausse) influence jusqu'au revenu des exploitations.

1.9 Le modèle est-il accrédité ?

L'ensemble des simulations et des tests que nous venons de présenter avait pour but d'une part d'explorer le système et le fonctionnement du modèle et d'autre part de savoir si le modèle pouvait être accrédité. A savoir, le modèle fournit-il **des simulations cohérentes** par rapport au système réel, et permet-il à l'utilisateur de l'utiliser comme **moyen d'exploration du fonctionnement du système réel** ?

Concernant la première question, nous avons pu observer que les ordres de grandeur des indicateurs du modèle sont en correspondance avec ceux du Mae Uam. De même les grandes tendances du système, comme par exemple l'intensification de l'agriculture, sont également représentées de manière correcte dans le modèle. Par contre, le modèle rencontre une limite lorsqu'il s'agit de simuler les activités d'exploitations à faible revenu agricole, comme dans le cas du Mae Uam. De plus, certaines évolutions observées avec le modèle, ne peuvent pas être comparées avec le bassin du Mae Uam, soit parce que nous n'avons pas les informations requises, soit parce que nous sommes aux limites de la prospection du système. Ce qui nous amène donc à la deuxième question de l'accréditation du modèle.

Nous avons vu à plusieurs reprises au cours des chapitres précédents que les résultats des simulations nous amenaient à nous poser des questions sur le système réel et son fonctionnement. Par exemple :

- Existe t-il dans le système du Mae Uam une sous population privilégiée et une autre qui ne l'est pas ?
- Le manque d'eau chronique entraîne t-il un accroissement des inégalités dans le système ?
- L'intensification de l'agriculture entraîne t-elle un accroissement des inégalités ?
- L'évolution de l'intensification des zones de paddy va t-elle se stabiliser, comme c'est le cas dans le modèle, et si oui, pour quelles raisons ?

Ces différentes questions constituent déjà un début d'exploration du fonctionnement du Mae Uam. Par ailleurs, la stabilité du modèle, qui est tout à fait acceptable compte tenu de l'utilisation que nous souhaitons en faire, permet de dresser des conclusions sur les résultats du modèle, de manière sûre. C'est pourquoi, l'exploration du système, et la simulation de scénarios prospectifs peuvent se faire avec confiance. Bien entendu, les utilisateurs devront garder à l'esprit les limites de cette modélisation. Ainsi, des scénarios sur la façon dont les agriculteurs gèrent individuellement l'irrigation de leurs parcelles, rencontreront une limite du modèle provenant du fait que la hauteur d'eau dans les parcelles de paddy n'est pas modélisé. De même, les effets de séries pluviométriques provenant d'autres sources que celles actuellement utilisées ne pourront se faire sans au préalable calculer le débit de la rivière via le modèle iHACRES. Néanmoins, à l'intérieur de son domaine de validité pour lequel il est accrédité, le modèle laisse entrevoir une utilisation possible, via l'expérimentation de scénarios en laboratoire virtuel.

2 *Expérimentations en laboratoire virtuel*

En début de ce chapitre il nous paraît important de rappeler que le modélisateur est avant tout un expérimentateur qui se pose des questions, les modélise sous une forme adaptée au modèle, puis les simule afin de trouver, ou pas, des éléments de réponses (Grimm, 1999). Cette démarche est également liée à la modélisation d'accompagnement qui amène l'utilisateur à se poser de nouvelles questions à chaque simulation, et l'incite à retourner sur le terrain pour vérifier ses hypothèses et éventuellement modifier le modèle en fonction des nouveaux éléments trouvés (Bousquet et al., 2001).

Dans le cadre de ce mémoire, il n'a pas été possible de vérifier des hypothèses sur le terrain. Cela fera l'objet d'une mission en Thaïlande qui devrait se dérouler au début du mois d'octobre 2001.

Nous présentons à présent différentes expérimentations réalisées avec le modèle, permettant d'entamer les premières étapes de l'utilisation du modèle dans le cadre de la problématique de ce travail de recherche.

2.1 **Origine des inégalités retrouvées dans les simulations**

A plusieurs reprises dans les simulations déjà effectuées nous avons pu constater une séparation entre des individus « riches » et des individus « pauvres ». Cela a notamment été mis en évidence au §1.7 lors du suivi d'individus types. Nous allons chercher à présent à connaître l'origine de ces inégalités au niveau du modèle.

2.1.1 Constatation d'une séparation entre le cash des riches et le cash des pauvres

La constatation faite au moment du suivi d'un échantillon d'individus demande à être confirmée par d'autres types d'indicateurs. C'est pourquoi nous avons essayé de distinguer deux sous populations d'individus, en fonction de leur situation de trésorerie, et de comparer leurs évolutions. Le critère retenu est une situation de trésorerie positive pour la première catégorie d'individus et une situation de trésorerie négative (en déficit) pour la deuxième catégorie. Cette distinction ne permet pas de prendre en compte la large gamme d'individus dont le cash oscille autour de zéro.

La Figure 64 présente l'évolution du cash de ces deux populations. On constate une distinction nette entre les deux catégories. Avant d'aller plus loin il faut préciser que les tendances à l'augmentation et à la diminution ne sont pas biaisées par la sous population d'agents oscillant autour de la valeur zéro étant donné qu'elle est stable comme nous l'avons vu lors du suivi d'individus. Ainsi, cette sous population ne fait que procurer un léger bruit dans les résultats de la Figure 64. Nous pouvons donc conclure que les évolutions contraires des deux catégories de la Figure 64 traduisent bien une séparation entre deux sous populations du système qui sont d'une part, un groupe d'agents-agriculteurs riches devenant de plus en plus riche, et d'autre part un groupe d'agents-agriculteurs pauvres devenant de plus en plus pauvre.

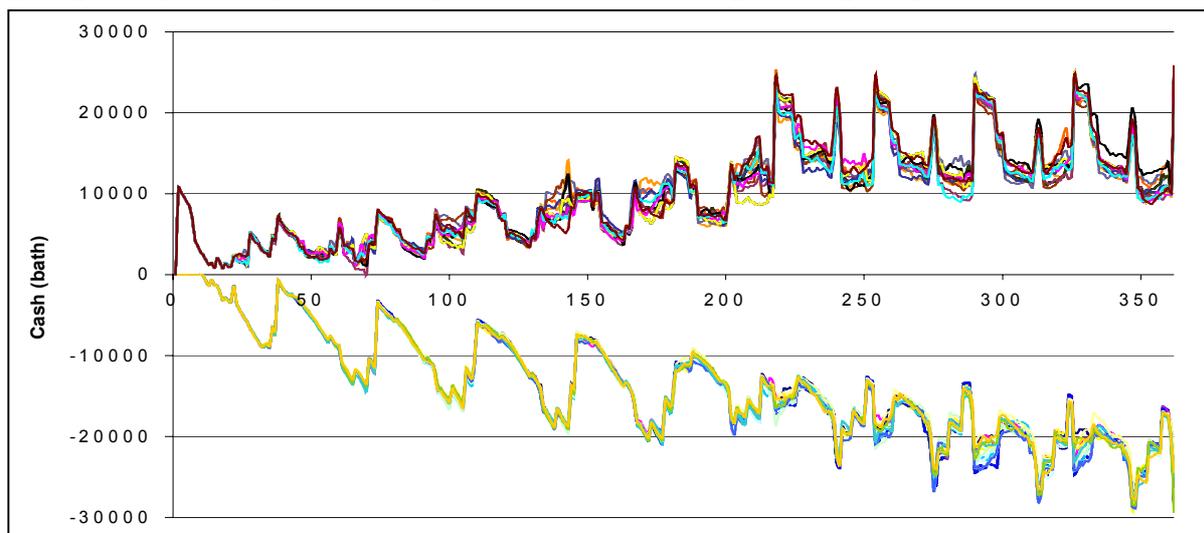


Figure 64 : Évolution du cash des agents à trésorerie positive et des agents en déficit (répété 20*)

A partir de ce constat nous avons cherché à savoir, si ce système très inégalitaire pouvait provenir des différences entre les six catégories d'exploitations qui sont utilisées à l'initialisation du modèle.

2.1.2 Même constatation entre les différentes catégories d'exploitations

Afin de savoir si la séparation entre les « riches » et les « pauvres » provient des catégories d'exploitations nous avons calculé le cash de chacune de ces catégories (la définition des catégories est donnée dans le Chapitre Deux).

Les résultats sont présentés ci dessous. On note trois types de tendances :

- Des catégories d'agents dont le cash est nettement négatif (C12 et C32) avec, pour les agents C32, une évolution vers la baisse ;

- Des catégories d'agents dont le cash varie dans une gamme d'environ -20000 à +20000 baht (C11, C21 et C31). Dans ces cas l'évolution est d'abord à la baisse, puis on note une augmentation du cash moyen ;
- Une catégorie d'agents (C22) dont le cash est positif, et se stabilise en fin de simulation

Ainsi, il semble que certaines de ces catégories, notamment la C22 et la C32, peuvent être à l'origine des écarts entre les deux sous populations citées plus haut. Néanmoins après une analyse plus détaillée, nous nous sommes rendu compte qu'il existait des variations au sein même de ces catégories. En effet, on remarque que dans chacune des catégories (sauf pour les C32), des agents sont dans des situations de trésorerie nettement positive et d'autres sont au contraire en déficit, ce qui nous amène alors à chercher l'origine des inégalités du système, ailleurs que dans les catégories d'agents.

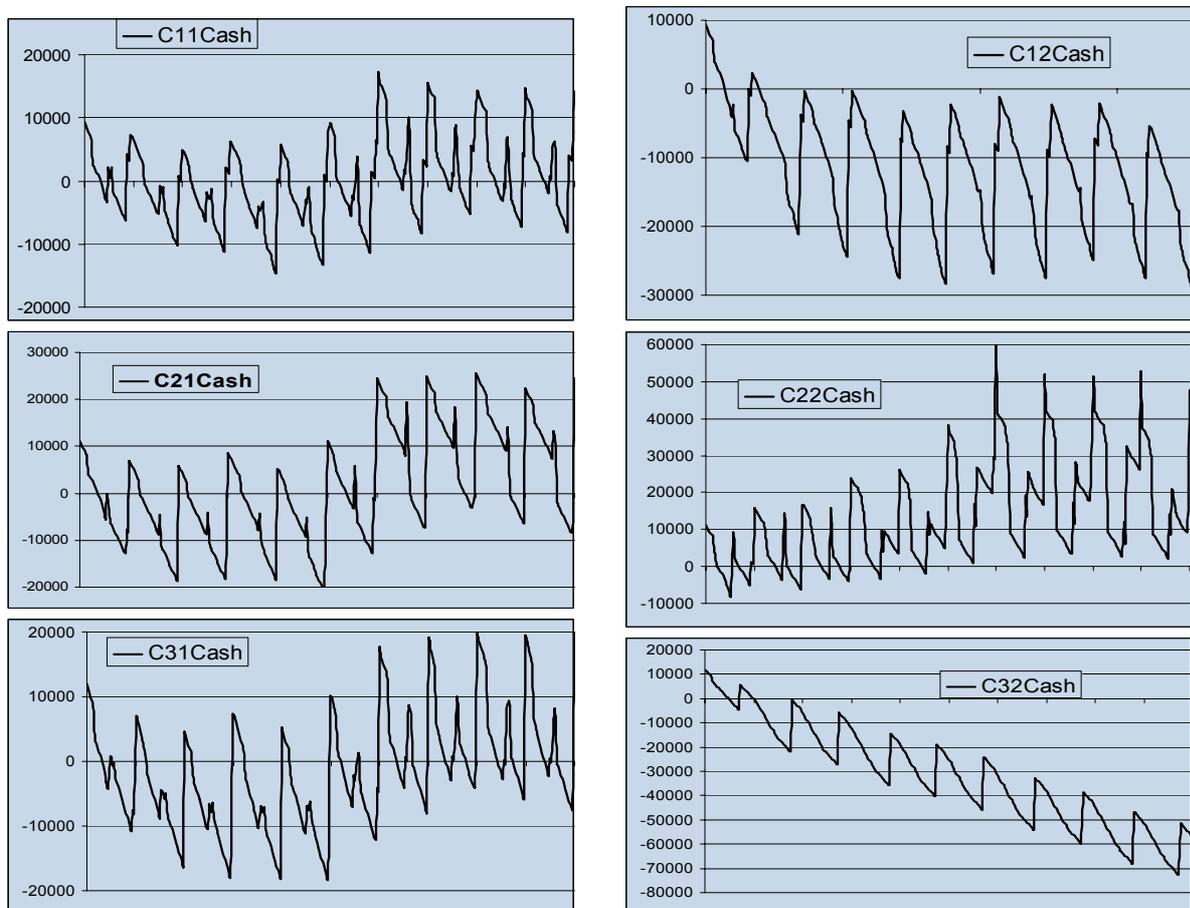


Figure 65 : Cash des six catégories d'exploitations (moyenne sur 20 répétitions)

2.1.3 La disponibilité en eau mise en cause

Nous avons supposé que l'accès à l'eau pouvait expliquer les écarts entre « riches » et « pauvres ». En effet, la disponibilité en eau d'une parcelle influence ses rendements cultureux ainsi que sa mise en culture via le processus de choix de culture du modèle. Or cette disponibilité, pour une parcelle située tout à l'aval du système, est un paramètre plus ou moins constant année après année ; l'offre en eau durant la saison sèche n'étant pas suffisante pour irriguer l'ensemble des parcelles même durant les bonnes années hydrologiques, une parcelle aval, ne pourra jamais être irriguée

correctement et ses cultures de saison sèche ne pourront jamais rapporter un revenu important à l'exploitation. Ainsi on voit apparaître un effet persistant du fait du positionnement des parcelles dans le système irrigué. D'autre part, comme le souligne Castelfranchi, les phénomènes d'apprentissages tendent à renforcer le positionnement des individus dans un système (Castelfranchi, 2001). Cela se voit également dans ce modèle, puisque le processus d'apprentissage lié à l'attente en eau, entraîne une absence de culture sur les parcelles insuffisamment irriguées, accentuant ainsi le positionnement de l'exploitation dans une catégorie non rentable, ou du moins, c'est ce que nous supposons.

Afin de tester l'hypothèse mettant en cause la disponibilité en eau des parcelles et leur position au sein du périmètre irrigué, nous avons effectué une simulation permettant d'indiquer la répartition spatiale au sein du périmètre des exploitations à fort revenu et celles en déficit. Pour ce faire, nous avons utilisé un point de vue où sont figurés, au niveau des parcelles, les niveaux de cash des exploitations auxquelles appartiennent les parcelles.

Les résultats après 10 ans de simulation, pour la fin de la saison des pluies et la fin de la saison sèche sont données dans la Figure 66 (voir Figure 17 page 39, pour la position des périmètres des canaux).

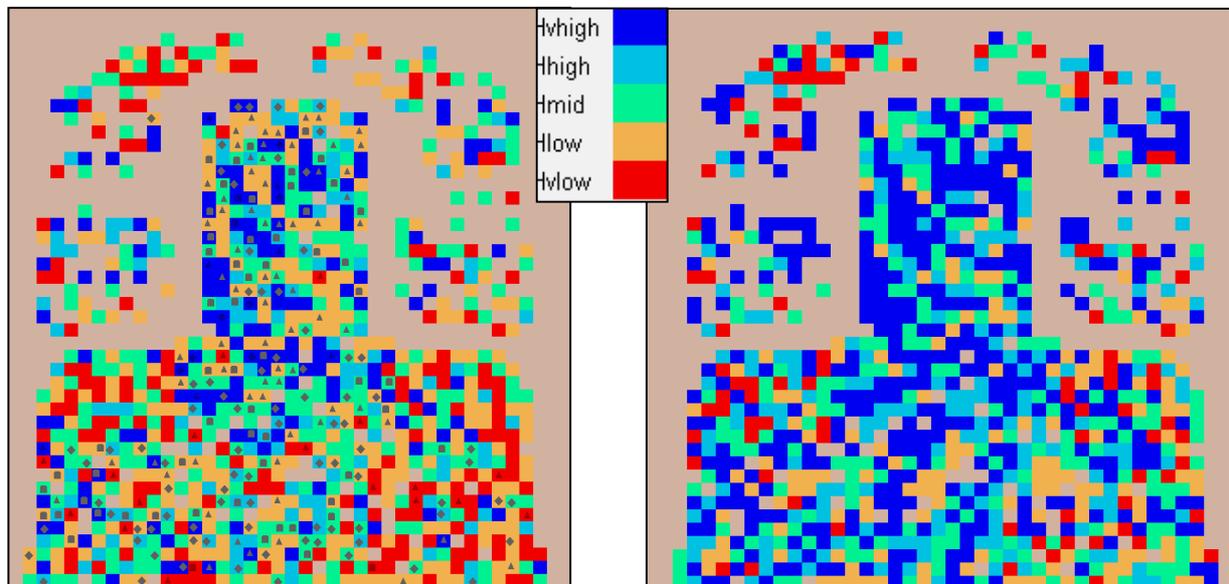


Figure 66 : Répartition spatiale du cash des exploitations (cinq niveaux de cash) – résultats de la 10^{ème} en fin de saison des pluies (à gauche) et en fin de saison sèche (à droite)

On constate tout d'abord dans les deux cas, que certains exploitations ayant des parcelles dans la zone d'agriculture pluviale sont en situation de fort déficit. Il s'agit en fait des exploitations de la catégorie C32 qui n'ont que des parcelles pluviales et qui sont non-viables de ce fait. Par ailleurs on note également que le cash moyen des exploitations est inférieur en fin de saison des pluies par rapport à la fin de la saison sèche. Cela est dû au fait que les cultures de rente sont essentiellement produites durant la saison sèche. Enfin, on remarque que dans les deux cas, on retrouve plus de parcelles appartenant à des exploitations à bas revenu, à l'aval du bassin, qu'à l'amont. De plus, et cela se voit plus nettement en fin de saison des pluies, on constate également une dichotomie rive droite / rive gauche : les parcelles en rive gauche appartiennent à des exploitations moins riches que les autres. Cela est bien entendu dû au fait que les canaux de la rive gauche sont positionnés dans le système

hydraulique à l'aval de leur voisin de la rive droite. Enfin, on notera une légère tendance, au sein de chaque canal, à ce que les parcelles aval soient plus défavorisées que les parcelles à l'amont du canal. Toutefois, le point de vue ne permet pas d'être précis à ce sujet et il n'est pas possible de savoir si cette différence, au sein d'un canal, est significative ou non.

L'hypothèse de l'accroissement des inégalités du système provenant du positionnement des parcelles des exploitations dans le système irrigué ainsi que l'hypothèse de renforcement de la position des agents sont donc confirmées à la vue de la Figure 66.

2.2 Exploration des modes de gestion de l'eau et interaction amont - aval

Dans ce chapitre nous avons cherché à savoir quelle était l'influence de la gestion de l'eau à l'amont, sur le système à l'aval.

2.2.1 Premières conclusions provenant des résultats précédents

Tout d'abord nous pouvons nous appuyer sur les résultats des simulations déjà effectuées lors des expérimentations précédentes.

Nous avons constaté que la modification des paramètres du processus de négociation (scénario « négociation souple ») n'avait que très peu d'influence sur le système. Par contre nous avons également observé que lorsque l'on retire l'ensemble des règles de la gestion collective, le résultat était positif pour le canal 1 et négatif pour le reste du système et donc à fortiori sur la zone aval (zone 2). Par ailleurs nous avons montré la grande importance de la taille des piangs pour maintenir l'équité du système, que ce soit entre la zone 1 et la zone 2, mais également au niveau intra zone et intra canal.

Notre première conclusion est donc que la gestion individuelle de l'eau a beaucoup plus d'importance que la gestion collective.

De plus, lorsque l'on simule un scénario où les négociations ne se font plus entre l'amont et l'aval, on ne constate aucun effet significatif. Par contre, une diminution du coefficient technique des barrages de la zone amont est favorable à la zone 2 ce qui montre bien qu'une interaction amont/aval est possible.

C'est pourquoi notre deuxième conclusion est le fait que la négociation entre l'amont et l'aval n'a pas d'influence sur le système aval.

Afin de développer ces interactions, de nouveaux scénarios ont été simulés.

2.2.2 De nouveaux scénarios exploratoires

a) Introduction de voleurs dans le système

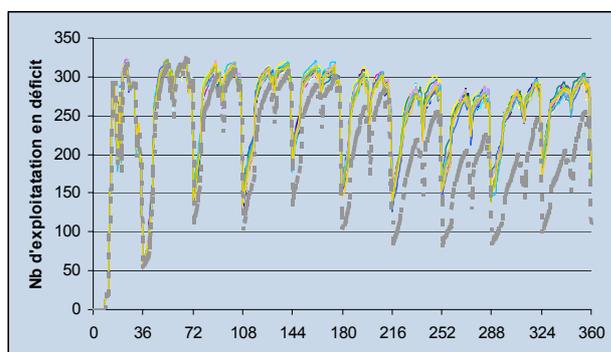


Figure 67 : Nombre d'exploitations en déficit des 20 répétitions du scénario voleur (moyenne de référence en pointillé gris)

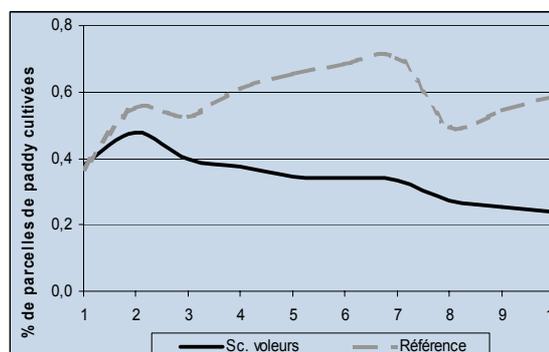


Figure 68 : Assolements de la zone de paddy (moyenne sur 20 répétitions)

Le premier scénario consiste à introduire des « voleurs d'eau » dans le système qui agissent au niveau du nombre de piangs employés par parcelle. Un voleur dans ce scénario va employer deux piangs pour chacune de ces parcelles irriguées. Le point intéressant de ce scénario est que le gestionnaire de canal continue à considérer que tous les agents emploient un seul piang par parcelle. Ainsi il ajuste la prise d'eau du barrage en fonction d'une demande théorique et ne tient pas compte des « voleurs d'eau » présents dans son canal.

Afin de simuler ce système, la proportion de voleurs parmi les agriculteurs a été fixée à 33% de façon homogène entre les deux zones et les canaux de chaque zone.

Le résultat immédiat et global de ce scénario est une très forte diminution de la trésorerie moyenne de la population. En fin de 10^{ème} année la trésorerie est en moyenne, sur les 20 simulations, de -2000 baht lorsque l'on introduit des voleurs, alors que la référence est de +10000 baht à la même date. De même, on constate une augmentation du nombre d'agents en déficit, comme on peut le voir sur la Figure 67.

Cet effet sur la rentabilité des exploitations provient de la très forte diminution du nombre de parcelles cultivées (voir Figure 68 pour les différences d'assolements de la zone de paddy). Lorsqu'on examine cette réduction des assolements on s'aperçoit que l'effet a été le même pour tous les canaux du système et ce dans des proportions similaires. Ainsi, l'introduction de voleurs dans le système, dans des proportions égales pour chacun des canaux, a un effet homogène sur la viabilité des différents périmètres des canaux : ce scénario n'introduit pas d'interactions entre les canaux, ni entre l'amont et l'aval du bassin.

b) Hétérogénéité amont/aval de la gestion individuelle

Afin de tester l'impact d'une gestion individuelle spécifique de la zone amont sur l'agriculture de la zone aval, nous avons choisi un scénario où la taille des piangs de la zone 1 est beaucoup plus importante que dans la zone 2 (piangs de 150 en zone 1 et piangs de 100 en zone 2). Par ailleurs, ce scénario correspond à une gestion qui peut être observée dans les systèmes du Mae Chaem où la taille des piangs est parfois discutée et négociée entre les comités des différents canaux d'un périmètre irrigué.

Alors que nous nous attendions à un fort effet de ce scénario sur les assolements de la zone de paddy entre les canaux amont et aval, on constate qu'il n'y a aucun effet significatif sur ce paramètre (Tableau 23).

		Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6
Taille des piangs de 150 dans la zone 1	Moyenne	79%	56%	66%	48%	60%	37%
	Écart Type	3%	5%	3%	6%	5%	6%
Référence	Moyenne	79%	62%	66%	51%	55%	40%
	Écart Type	4%	4%	4%	4%	4%	7%

Tableau 23 : Assolements des périmètres des six canaux lors d'une augmentation de la taille des piang de la zone 1

De même aucune différence n'est constatée avec le scénario de référence, ni sur le cash moyen de la population, ni sur le nombre d'agents en situation de déficit.

Par contre on constate qu'effectivement, les prélèvements en eau des canaux 1 et 2 se sont accrus et on note que ceux des canaux de la zone 2 demeurent inchangé. Ainsi, nous confirmons une hypothèse avancée lors de l'accréditation du modèle qui est que le système de retour du ruissellement et du drainage rapide des parcelles, vers la rivière à chaque pas de temps fait que la zone 2 ne subit pas les conséquences d'une augmentation des prélèvements des canaux de la zone 1 (ou d'une diminution comme cela avait été vu au §1.8.4). Notons à ce propos que le retour du ruissellement et du drainage rapide à la rivière, est effectué à un même pas de temps et avant que les prélèvements des zones en aval soient effectués.

Ainsi, d'après le modèle, une différence de gestion de l'eau au niveau individuel n'a pas d'impact sur les périmètres se trouvant en aval. Deux hypothèses peuvent alors être avancées : soit c'est effectivement qui se passe dans le cas du bassin du Mae Uam, soit le pas de temps de 10 jours du modèle ne permet pas de rendre compte d'effets de l'amont sur l'aval qui se dérouleraient à une échelle de temps plus fine (journalière peut être).

➤ Conclusion

En conclusion de ce chapitre sur les modes de gestion de l'eau et les interactions amont – aval, nous avons pu déterminer que la gestion de l'eau collective comme individuelle, mis à part les tours d'eau, ne montrait pas d'impact de la zone amont sur la zone aval. Or, nous ne pouvons pas, dans l'état actuel de nos connaissances des modes de gestion de l'eau dans le Mae Uam, déterminer si cela provient de limitations du modèle ou si au contraire cette indépendance entre les zones est une réalité. La démarche de la modélisation d'accompagnement, nous amène à ce niveau à poser cette question comme une nouvelle hypothèse de travail afin de la tester par la suite auprès des acteurs locaux du Mae Uam. Dans ce cas, les gestionnaires des canaux ou les services techniques locaux devraient être les bons interlocuteurs.

2.3 Un scénario prospectif d'aménagement du territoire : Application d'une réglementation interdisant la culture des zones protégées des bassins versants thaïlandais

Comme nous l'avons vu au Premier Chapitre, des politiques d'aménagement du territoire ont été créées par les institutions étatiques afin de déterminer les zones sensibles protégées des bassins versants du Mae Chaem. L'une de ces politiques a répertorié et classé les bassins versants en différentes zones de sensibilité aux activités agricoles ou à la déforestation. Or, les zones dites « sensibles » correspondent dans beaucoup de cas à des zones d'agriculture pluviale qui sont utilisées par les populations locales, comme c'est le cas du bassin du Mae Uam. Dans ce genre de situation, l'une des mesures proposées par les institutions consiste à interdire toutes les pratiques agricoles sur ces zones.

Bien qu'il n'y ait pas de volonté réelle des autorités de mettre en application une telle mesure pour le cas spécifique du Mae Uam, il est tout de même intéressant de le simuler pour deux raisons : d'une part cette problématique est importante dans le Mae Chaem et concerne des bassins versants voisins très proches ; et d'autre part, ce scénario est un bon exemple d'une démarche d'exploration des impacts d'une politique d'aménagement via la simulation de scénarios prospectifs.

A l'aide des cartes de classification des zones faites par le cabinet de réglementation en 1998, il a été possible de déterminer la part de la surface du Mae Uam répertoriée comme zone sensible et de recouper ces informations avec la carte d'occupation du sol (Walker et al.). Les surfaces sont relativement importantes et après croisement des cartes, nous avons pu calculer que les zones sensibles correspondaient à 46% des surfaces des zones d'agriculture pluviale de la zone amont, et à 44% des surfaces des zones d'agriculture pluviale de la zone aval. Aucune zone de paddy n'est touchée par la réglementation.

Afin de modéliser ce scénario, nous avons interdit dans le modèle, l'accès à 45% des surfaces d'agriculture pluviale, et ce pour les zones 1 et 2. De ce fait certains agents se retrouvent avec une ou deux parcelles pluviales en moins. La distribution de cette diminution a été faite aléatoirement entre les différents agents du modèle.

Comme on peut le voir sur la Figure 69, l'effet de ce scénario est très significatif sur le revenu des exploitations. Dès la fin de la première année on constate que dans le cas d'application de la réglementation sur les zones sensibles, la trésorerie moyenne des exploitations est plus faible que dans le scénario de référence. L'écart va alors en s'accroissant au fur et à mesure de la simulation. En fin de 10^{ème} année, le cash des exploitations avec réglementation est d'environ 4000 baht alors qu'il est plus de deux fois plus important dans le cas de référence.

Par ailleurs, cet effet n'est ressenti que par les catégories d'exploitations possédant des parcelles pluviales. Comme on le voit sur le Tableau 24, la diminution du cash moyen de ces catégories va jusqu'à 18000 baht pour les C31 qui possèdent deux parcelles pluviales. L'écart est un peu moins fort pour les C11 qui n'ont qu'une seule parcelle pluviale et encore moindre pour les C22, qui possèdent un grand nombre de parcelles de paddy permettant de compenser le manque à gagner. Dans le cas des C32, qui possèdent uniquement des parcelles pluviales, on ne constate pas de différence car leur revenu est en fait constitué uniquement par le travail non-agricole.

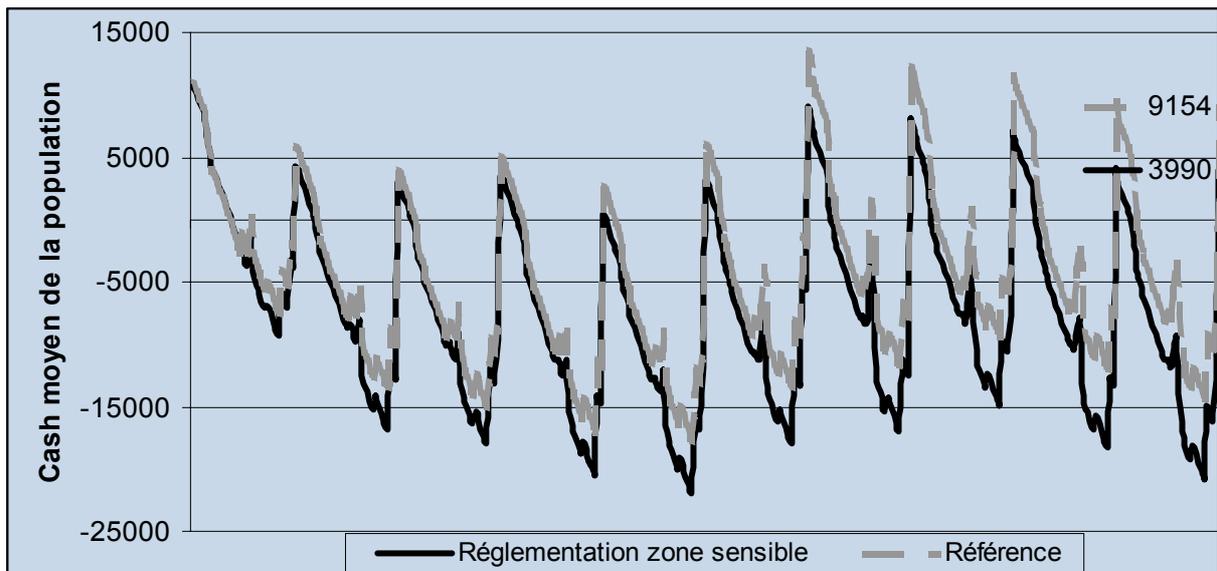


Figure 69 : Cash moyen de la population (moyenne sur 20 répétitions)

	C11	C22	C31	C32
Nombre de parcelles pluviales dans le scénario de référence	1	2	2	2
Réglementation zone sensible	5000 baht	40000 baht	6000 baht	-60000 baht
Référence	18000 baht	57000 baht	24000 baht	-60000 baht

Tableau 24 : Effets sur le revenu de fin de 10ème année, des catégories d'agents ayant des parcelles pluviales

Toutes ces diminutions de revenus sont dues à la diminution des cultures de rente possibles durant la saison des pluies sur la zone d'agriculture pluviale. Or, durant cette saison, la zone de paddy est entièrement cultivée par du riz et ne peut compenser le manque à gagner. Par ailleurs, les exploitations cultivent également des cultures de rentes durant la saison sèche mais cette fois, uniquement sur la zone de paddy. Néanmoins, ces cultures ne sont pas suffisantes pour compenser le manque à gagner de la saison des pluies.

Au niveau des autres indicateurs et paramètres, nous n'avons pas constaté de différences significatives. Ainsi, on ne note pas d'effet sur la zone de paddy ; ni au niveau de son pourcentage de parcelles cultivées, ni au niveau de la répartition du type de culture.

Ce scénario a permis de montrer quels sont les paramètres qui sont touchés dans le cas d'une application de la réglementation des zones sensibles du Mae Chaem, et il a également souligné, l'importance de la zone d'agriculture pluviale pour le revenu des exploitations du Mae Um.

3 *Exploration du système par la simulation : qu'avons nous appris ?*

En synthèse de cette troisième partie du mémoire, différents points sont importants à rappeler :

- Tout d'abord, nous avons pu accréditer le modèle, dans sa validation interne (bon fonctionnement des méthodes et procédures du modèle), sa cohérence par rapport aux indicateurs de terrain (assolement, rendements) et aux évolutions du système réel (intensification de l'agriculture via de nouveaux types de culture ou via l'équipement de matériel d'irrigation sur les parcelles pluviales), ainsi qu'au travers de son utilisation comme outil d'exploration du système. De plus, CatchScape offre à l'utilisateur suffisamment de souplesse pour que ce dernier puisse simuler correctement et facilement diverses scénarios, qu'ils soient exploratoires ou prospectifs.
- D'autre part, dans cette partie, nous avons pu soulever des aspects de la modélisation importants et parfois limitants. Nous avons mis l'accent à plusieurs reprises sur l'apprentissage de l'attente en eau car c'est un point sensible du modèle. Par ailleurs, nous avons constaté des limitations quant à la modélisations des exploitations à bas revenus dépendant d'autres activités que l'agriculture et nous nous sommes heurté à la limite temporelle induite par le pas de temps de 10 jours du modèle. Il est également important de rappeler les limites du modèle au niveau de la représentation des processus hydrologiques, qui n'est pas complète ainsi qu'au niveau des paramètres de choix et de satisfaction des irrigants qui ne sont pas en adéquation avec la réalité.
- Enfin, nous avons pu soulever des questions par rapport aux système réel du Mae Yam. Une partie de celles-ci a été synthétisée au §1.9 et l'autre est rappelée ici. Nous avons pu mettre en avant que les inégalités sur le revenu des exploitations provenaient en partie des catégories d'exploitations et surtout de l'emplacement des parcelles au sein des périmètres irrigués, conditionnant la quantité d'irrigation qui pourra être reçue par parcelle lors de la saison sèche. L'importance de ce facteur sur le revenu des exploitations réelles du Mae Yam reste posée. Par ailleurs, nous avons constaté le peu d'impact, dans le modèle, de la gestion de l'eau de la zone amont sur l'agriculture aval. Toutefois, nous ne pouvons dire si cela est dû à une incohérence du modèle ou si il s'agit bien d'un phénomène réel. Enfin, l'importance de la zone d'agriculture pluviale a pu être mesurée, et s'avère avoir une grande influence sur le revenu des exploitations du système.

Par ailleurs, tout au long de l'exploration du système par la simulation, nous avons donné avant une simulation les résultats attendus afin de pouvoir les comparer aux résultats simulés. Cette démarche permet de justifier l'intérêt de la modélisation multi-agents pour l'exploration du système. En effet, les simulations apportent réellement des informations nouvelles par rapport à la connaissance qu'à le modélisateur a posteriori ; il ne s'agit pas simplement de représenter des processus

que nous connaissons déjà, mais également de les simuler pour tenter de saisir toute la complexité du système. La preuve en est qu'à plusieurs reprises au cours du plan d'expérience, nous avons été surpris, ou interrogé par les résultats des simulations. Afin d'en donner un aperçu, le tableau ci-après est une synthèse du plan d'expérience et présente, autant que faire ce peut, les effets qui ont été attendus et ceux qui ont été observés via la simulation.

Scénario

Effets attendus

Observations

Validation interne : Réaction à des scénarios extrêmes		
Pic sur le prix de l'oignon en 6 ^{ème} année	Hausse sur le revenu en fin de 6 ^{ème} année permettant ainsi à une partie de la population de passer pour les années suivantes d'une agriculture de subsistance à une agriculture de rente (production d'oignons) et donc une hausse des revenus pour les années suivantes	On constate effectivement une hausse du revenu en 6 ^{ème} année mais elle s'estompe dès l'année suivante. En fait, les bénéficiaires ont été placés dans l'achat de nouvelles parcelles ou d'équipement d'irrigation ; les pourcentages d'oignons cultivés les années suivantes sont similaires En fait l'effet a été très ponctuel et ce n'est qu'avec un scénario de prix élevés plusieurs années de suite que l'on constate une amélioration durable. Cela peut être un sujet de réflexion sur l'économie locale du Mae Um
Absence totale de gestion collective (négociation et rotation)	Situation (parcelles cultivées et volume prélevé) inchangée pour le canal 1, puis effet négatif de plus en plus fort de l'amont vers l'aval. Pratiquement plus de parcelles cultivées dans le canal 6	En fait on observe un effet positif sur le canal 1. Dans les canaux suivants les effets sont négatifs, et plus particulièrement sur les canaux 2, 3 et 4 Pas d'effet significatif sur les canaux 5 et 6.
Scénario climatique extrême (10* l'année la plus sèche – 1989)	Diminution progressive des parcelles de paddy jusqu'à atteindre un plateau lorsque l'équilibre entre offre et demande est atteint. Diminution du revenu de la population et de la part de culture d'oignon. Augmentation des inégalités dans le système (amont aval)	Diminution des parcelles cultivées et du cash des exploitations
Analyse de sensibilité : Facteurs socio-économiques		
Prix élevés de l'oignon Prix en moyenne 25% plus élevés avec des années plus fortes	Augmentation du revenu, plus particulièrement sur les paysans riches car tout le monde n'a pas accès à la culture d'oignon (coûts élevés des intrants). Donc accroissement des inégalités. Diminution du nombre de parcelles cultivées car les oignons ont une consommation d'eau plus importante.	Il y a bien une augmentation globale du revenu qui se fait surtout sur les riches. Les catégories de paysans ayant le plus de parcelles en bénéficient plus particulièrement (car leurs parcelles supplémentaires leur donnent plus facilement accès à la culture d'oignon). Pas d'effet sur le nombre de parcelles cultivées par contre on voit nettement une augmentation du pourcentage d'oignon.
Augmentation de la valeur d'achat des parcelles	Une augmentation du prix diminuera le nombre de parcelles achetées mais pas de manière importante (et surtout pas linéairement) car le prix de base est déjà très élevé par rapport aux revenus des exploitations. Les paysans qui pourront acheter se détacheront de la catégorie moyenne de manière plus frappante. L'argent non dépensé aux achats courants se retrouvera dans les équipements d'irrigation jusqu'à la limite autorisée puis enfin dans le portefeuille des exploitants.	
Analyse de sensibilité : Processus d'apprentissage		
Attente du volume d'irrigation initialisée au niveau le plus élevé	On devrait trouver plus de parcelles cultivées la première année mais une forte diminution la deuxième (plus bas que dans le scénario de référence). On devrait retrouver le scénario de	C'est bien le cas la 1 ^{ère} année, mais la deuxième année il y a toujours plus de parcelles cultivées car la première année est relativement favorable au niveau climatique.

	référence après 4 ou 5 ans d'oscillations.	De plus, le niveau de référence est retrouvé dès la 3 ^{ème} année plus tôt qu'il était supposé.
Analyse de sensibilité : Facteurs de nature climatique		
Succession aléatoire des années climatiques	Juste un déplacement des effets des années particulières. Par exemple, l'année 2 (ou 7) est très sèche et se traduit par une diminution des parcelles cultivées l'année suivante; si elle se retrouve en position 4, l'unique changement sera que cette fois si ça sera lors de l'année 5 que le nombre de parcelles cultivées diminuera.	Confirmé
Des années très sèches : El Niño	Diminution des parcelles cultivées l'année suivante. Diminution des revenus l'année sèche et l'année suivante. Augmentation des inégalités car les canaux en amont ne seront pas trop touchés par la pénurie.	
Analyse de sensibilité : Paramètres de la gestion de l'eau		
Taille des piangs 70 (au lieu de 100)	Meilleure distribution et équité dans les volumes d'eau distribués et dans les pourcentages de parcelles cultivées ; sans diminution des rendements et des revenus. Plus d'achats de terre et d'équipement d'irrigation. Effets identiques sur les différentes groupes d'agents	Moins de parcelles cultivées sur l'ensemble du bassin versant : -5 à -10% sur les canaux 1, 3 et 5 ; +5% dans le canal 2 ; -5% dans les canaux 4 et 6 Aucun effet notable sur le revenu ; + 3% de culture d'oignon Diminution des volumes prélevés. Augmentation de la satisfaction dans les canaux rive gauche, plus le canal 1
Taille des piangs 130 (au lieu de 100)	Les canaux de la rive gauche et en aval reçoivent moins d'eau. Diminution du pourcentage de parcelles cultivées en aval. Légère diminution du revenu sur l'ensemble des groupes d'agriculteurs	Légère diminution du revenu des agents les plus riches. Très légère augmentation du nombre de personnes en déficit. Augmentation des parcelles cultivées des canaux 3 et 5 Diminution des parcelles cultivées des canaux 4 et 6 Donc augmentation des inégalités. Augmentation des volumes prélevés. Diminution de la satisfaction en rive droite et une tendance vers l'augmentation en rive gauche.
Négociations plus souples (seuil d'acceptation 0.9 au lieu de 0.8 ; niveau de partage 0.8 et 0.8 au lieu de 0.6 et 0.8)	Effet négatif sur la zone 1 Diminution du nombre de parcelles cultivées en rive droite car ils donnent plus facilement ; et augmentation en rive gauche plus particulièrement en aval	Diminution des parcelles de la rive gauche : Effet inverse !! Pas d'effet sur la satisfaction
Pas de négociation entre la zone 1 et la zone 2	Effet négatif en zone 2	Globalement l'effet n'est pas très fort. Tout de même on voit une augmentation des parcelles cultivées dans le canal 2 mais pas dans le canal 1 De même, il y a une légère diminution des parcelles en canal 6 et encore plus légère dans le canal 4

Analyse de sensibilité : Facteurs de nature technique		
Diminution du coefficient technique de diversion maximum des barrages de la zone 1 (amont) ; - 60% au lieu de 90%	Pas d'effet en zone 1 car bien que les canaux prennent moins d'eau, les parcelles se suffisent de la quantité prélevée (il y a avait du gaspillage avant) Effet positif dans la zone 2. Offre en eau plus importante	Très légère augmentation du nombre de gens qui ne cultivent pas pendant la saison sèche. Diminution de 10% des parcelles cultivées en zone 1 ; c'est dû au fait que les agents basent leurs choix de culture sur la quantité absolue d'irrigation et pas sur la santé hydrique (physiologique) des cultures Augmentation de 5% des parcelles cultivées en zone 2
Efficacité technique des barrages	Dans la gamme +/- 10% ça ne devrait pas entraîner d'effets très importants , ou du moins que sur le canal 1 (car ceux d'après bénéficient de l'eau non prélevée par les canaux en amont Dans la gamme -30%, on devrait voir une diminution significative des volumes prélevés, des parcelles cultivées et des revenus ; augmentant ainsi l'inégalité amont/aval	
Système « tout ou rien » pour la distribution d'eau (pas de distribution dégressive en bout de canal)	Augmente les inégalités Devrait se voir sur les points de vues des cultures et sur la séparation des revenus des riches et des pauvres.	
Expérimentations : La gestion de l'eau et l'interaction amont/aval		
33% des irrigants utilisent deux piangs au lieu d'un seul	Augmentation des inégalités (augmentation de l'écart entre les riches et les pauvres) avec au début les mêmes quantités d'eau prélevée et par la suite une diminution (car moins de parcelles cultivées). Augmentation des rendements pour les voleurs Des parcelles cultivées sur toute la surface des canaux et non pas uniquement à l'amont des canaux	Diminution du revenu global même pour les riches ; forte augmentation du nombre de personnes en déficit ; effet plus notoire sur les classes d'agriculteurs habituellement aisées. Diminution des parcelles cultivées sur l'ensemble des canaux. Diminution des volumes prélevés sur tous les canaux dès la deuxième année Effet sur les rendements. Globalement un effet beaucoup plus fort que celui attendu
Distribution de l'eau dans les parcelles en fonction de la demande physiologique des cultures et non pas en fonction des piangs	Même rendements car on satisfait toujours la demande physiologique mais par contre on élimine le gaspillage Effet global positif ; Augmentation des parcelles cultivées dans tout le bassin avec peut être une préférence pour l'amont. Diminution des volumes prélevés dans la partie amont et augmentation dans la partie aval	Forte diminution du revenu moyen de l'ensemble de la population ; augmentation du nombre de gens en déficit. Diminution des parcelles cultivées dans tous les canaux. Diminution des volumes prélevés dans les canaux et notamment dans les canaux rive droite et avals En fait, le scénario distribue l'eau au pas de temps N+1 en fonction de la demande du pas de temps N : or, il faut tenir compte de la croissance racinaire entre temps et la demande a augmenté.
Taille des piangs 150, uniquement en zone 1 (amont)	Effet positif en zone 1 (pourcentage de parcelles en culture et satisfaction), qui se fait ressentir négativement en zone 2. Globalement pas d'effet sur le revenu (compensation)	

Conclusion

Tout au long des trois chapitres de ce mémoire nous avons vu comment il a été possible de représenter l'agriculture et la gestion de l'eau du bassin versant du Mae Uam, ainsi que les activités liées à ce système. Au travers des interactions avec la dynamique bio-physique du modèle, nous avons pu modéliser la complexité des usages de la ressource en eau, ou tout du moins en partie. Enfin nous avons montré que le modèle était stable, qu'il simulait des tendances et évolutions cohérentes par rapport aux observations de terrain, et que son usage amenait le modélisateur à se poser de nouvelles questions sur le système et sa représentation. Ainsi, le modèle constitue un bon outil de recherche et d'exploration des dynamiques existantes dans ce bassin.

Mais quel peut-être l'apport de ce modèle pour les usagers de la ressource en eau du Mae Uam ? Nous avons vu qu'un conflit était émergeant dans le bassin entre les irrigants de l'amont et ceux de l'aval. Ce que nous proposons ici est de "donner" ce modèle à ses vrais utilisateurs : les agriculteurs du bassin, les comités de gestion des ressources, et les autres acteurs locaux. Nous pensons qu'il peut constituer un bon outil de communication et de concertation entre les acteurs, comme nous l'avons vu au cours de ce mémoire. Au travers de simulations ou de cessions d'utilisations, il est possible de décrire le fonctionnement du modèle, d'argumenter les hypothèses qui ont été prises et leurs conséquences ; de clarifier la représentation qui a été utilisée pour décrire le système. Une fois cette étape d'appropriation réalisée et dans le cas où les acteurs locaux ne la rejette pas, le modèle pourra être amélioré, modifié, adapté aux besoins de ses utilisateurs ou encore être transformé sous un autre format que sa version informatique. L'objectif étant qu'au travers de ces cessions, les acteurs du conflit puissent discuter sur le fonctionnement et l'évolution de leurs systèmes, sur les conséquences de leurs choix et celles des autres acteurs. C'est pour cela que nous parlons dans ce mémoire de vision "par les acteurs".

Une mission en Thaïlande devrait faire suite à ce travail (dates prévues : du 1^{er} au 12 septembre 2001). Elle sera l'occasion de rencontres avec des scientifiques et instituts techniques travaillant sur la gestion de l'eau, dans le Nord Thaïlande. Dans le cadre de cette modélisation l'objectif est de valider ou d'invalider les hypothèses du modèle auprès des experts du terrain, de recadrer ou modifier les orientations et la démarche citée précédemment, et enfin de réfléchir à l'outil (le moyen) le mieux adapté pour franchir le pas entre le modèle et les acteurs locaux. Cela peut se faire à l'aide de discussions, d'un tableau noir, de jeux, de commentaires sur le modèle et les simulations informatiques ; et peut s'adresser aux agriculteurs, ou aux vulgarisateurs ou encore uniquement à une partie des acteurs impliqués dans le conflit.

De nombreuses questions sont posées et, avant de trouver des réponses, nous en aurons certainement posé de nouvelles.

Bibliographie

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. Rome, Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 56 p.
- Anan, G. (1998). "The politics of conservation and complexity of local control of forest land in northern Thai highlands". *Mountain Research and Development* 18(1), p. 71-82.
- Anon (1993). Villagers in call for an end to large scale pine logging. *Bangkok Post*. Bangkok.
- Axelrod, R. (1997). "Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences". ?, p. 21-40.
- Barreteau, O. (1998). Un Système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués: dynamique des interactions et modes d'organisation. *Sciences de l'Eau*. Montpellier, ENGREF, 259 p.
- Barreteau, O. and F. Bousquet (1999). "Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents". *Ingénierie des systèmes multi agents*, p. 67-80.
- Barreteau, O. and F. Bousquet (2000). "SHADOC: a multi-agent model to tackle viability of irrigated systems". *Annals of Operations Research* 94, p. 139-162.
- Barreteau, O. and F. Bousquet (2001). *From a conceptual model to it artifacts: building on experiments with SHADOC model*. MODSIM, Canberra, Australia.
- Barreteau, O., F. Bousquet and J.-M. Attonaty (2001). "Role-Playing games for opening the black box of MAS: method and teachings of its application to Senegal River Valley irrigated systems". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4(2).
- Becu, N. (1999). Importance du facteur social dans la gestion collective de la ressource en eau: exemple d'un périmètre de riziculture irriguée. Rouen, ESITPA, 43 p.
- Beven, K. J. and M. J. Kirkby (1979). "A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology". *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1), p. 43-69.
- Beven, K. J., M. J. Kirkby, N. Schofield and A. F. Tagg (1984). "Testing a Physically-Based Flood Forecasting Model (TOPMODEL) for Three U.K. Catchments". *Journal of Hydrology* 69, p. 119-143.
- Bousquet, F. (1996). "Usage des ressources renouvelables et modélisation des représentations: Une approche par les systèmes Multi-Agents". *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, p. 187-193.
- Bousquet, F., I. Bakam, H. Proton and C. Le Page (1998). *CORMAS : common-pool resources and multi-agent systems*. Artificial Intelligence, Barcelone

(Spain).

- Bousquet, F., O. Barreteau, C. Le Page, C. Mullon and J. Weber (1999). "An environmental modelling approach. The use of multi-agent simulations". *Advances in Environmental and Ecological Modelling*.
- Bousquet, F., O. Barreteau and J. Weber (1995). *Systèmes multi-agents et couplage des modèles biophysiques et socio-économiques*. Couplage de modèle en agriculture, Montpellier, CIRAD.
- Bousquet, F., G. Trébuil, S. Boissau, C. Baron, P. Aquino (d') and J.-C. Castella (2001). "Knowledge Integration for Participatory Land management: The Use of MAS and a Companionable Modelling Approach". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*.
- Bruijnzel, L. A. (1990). Hydrology of moist tropical forests and effects of conservation: a state of knowledge review. Amsterdam: Free University.
- Castelfranchi, C. (2001). "The theory of social functions: challenges for computational social science and multi-agent learning". *Cognitive Systems Research* 2(1), p. 5-38.
- Castella, J.-C., S. Boissau, H. L. Anh and O. Husson (2001). *Enhancing communities adaptability to a rapidly changing environment in Vietnam uplands: the SAMBA role-play*. International Conference Sustaining Upland Development in Southeast Asia: Issues, tools & institutions for local natural resources management,, Manilla (Philippines), Makati, Metro.
- Chusak, W. and P. Dearden (1999). "Decision making arrangements in community-based watershed management in northern Thailand". *Society and Natural Resources* 12, p. 673-691.
- Cohen, M. D., J. G. March and J. P. Olsen (1972). "A garbage can model of organizational choice". *Administrative science quarterly* 7(1).
- Conte, R. and C. Castelfranchi (1995). *Norms as mental objects, from normative beliefs to normative goals*. From reaction to cognition, Springer.
- Conte, R. and M. Paolucci (2001). "Intelligent Social Learning". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4(1).
- Cooper, O. (1984). *Resource scarcity and the Hmong response: patterns of settlement and economy in transition*. Singapore: Singapore University Press.
- Courbon, J.-C. (1982). "Processus de décision et aide à la décision". *Economie et Sociétés* 16(12).
- Cox, P. G. (1996). "Some issues in the design of agricultural decision support systems". *Agricultural Systems* 52, p. 355-381.
- Darley, V. M. and S. A. Kauffman (1997). Natural Rationality. *The Economy as an Evolving Complex System*. B. W. Arthur and L. D. Durlauf, Addison-Wesley. 27, p. 45-80
- Deneubourg, J. L. and e. a. ? (1991). The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots. *Animals to animals*. J.-A. Meyer and S. W. Wolson. Paris, MIT Press, p. 356-363

- Desbordes, M. (2000). Cours d'Hydrologie du DEA "Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental", ENGREF.
- Doorenboos, J. and A. H. Kassam (1979). Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 33 p.
- Doorenboos, J. and W. O. Pruitt (1977). Crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. Rome, Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 24 p.
- Doran, J. E. (2000). "Trajectories to Complexity in Artificial Societies: Rationality, Belief and Emotions". *Dynamics in Human and primate Societies*, p. 89-105.
- Drogoul, A., B. Corbara and S. Lalande (1995). MANTA: new experimental results on the emergence of (artificial) societies. *Artificial societies*. N. Gilbert and R. Conte, UCL Press, p. 190-211
- Dupont, J., J. Smits, A. N. Rousseau, A. Mailhot and G. Gangbazo (1998). "Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau". *Revue des Sciences de l'eau* 10, p. 5-18.
- El Idrissi, A. and E. Persoons (1995). MHM : le modèle hydrologique maillé. Rome, Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 16 p.
- Ferber, J. (1994). "La Kénétique: des Systèmes Multi-Agents à une Science de l'Interaction". *Revue Internationale de Systémique* 8(1), p. 13-27.
- Ferber, J. (1995). *Les Systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective*. Paris: InterÉditions.
- Ferber, J. (1996). "La modélisation multi-agent: un outil d'aide à l'analyse de phénomènes complexes". *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*.
- Ferber, J. and A. Drogoul (1992). Using reactive Multi-Agent Systems, in simulation and problem solving. *Distributed Artificial Intelligence: Theory and Practice*. L. Gasser and N. Avouris. Kluwer
- Feuillette, S. (2001). Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre: exploration des interactions ressource usages par les systèmes multi-agents. Application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale. *Sciences de la Terre et de l'Eau*. Montpellier, Université Montpellier II, 296 p.
- Grimm, V. (1999). "Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future ?" *Ecological Modelling* 115, p. 129-148.
- Hamilton, L. S. (1987). "What are the impacts of deforestation in the Himalayan on the Ganges-Brahmaputra lowlands and delta? Relations between assumptions and facts". *Mountain Research and Development* 7, p. 256-263.
- Hanneman, R. (1995). "Simulation modeling and theoretical analysis in sociology". *Sociological Perspectives* 38(4), p. 457-462.

- Ives, J. D. and B. Messerli (1989). *The Himalayan dilemma : reconciling development and conservation*. London: Routledge.
- Jakeman, A. J., I. G. Littlewood and P. G. Whitehead (1990). "Computation of the Instantaneous Unit Hydrograph and Identifiable Component Flows with Application to Two Small Upland Catchments". *Journal of Hydrology* 117, p. 275-300.
- Janssen, M. A., B. H. Walker, J. Langridge and N. Abel (2000). "An adaptative agent model for analysing co-evolution of management and policies in a complex rangeland system". *Ecological Modelling* 131, p. 249-268.
- Jintrawet, A. (1995). "A Decision Support System for Rapid Assessment of Lowland Rice-based Cropping Alternatives in Thailand". *Agricultural Systems* 47, p. 245-258.
- Kanok, R. and R. Benjavan (1994). *Shifting Cultivation in Thailand: its Current Situation and Dynamics in the Context of Highland Development*. London, International Institute for Environment and Development.
- Kanwanich, S. (1997). *Agricultural war - the case of the drying rivers*. *Bangkok Post*. Bangkok.
- Kanwanich, S. (1997). *Disaster - downstream dikes are dying*. *Bangkok Post*. Bangkok.
- Keyes, C. F. (1979). *The Karen in Thai history and the history of the Karen in Thailand. Ethnic adaptation and identity: the Karen on the Thai frontier with Burma*. C. F. Keyes. Philadelphia, Institute for the Study of Human Issues
- Kirman, A. P. (1997). *The Economy as an Interactive System. The Economy as an Evolving Complex System II*. B. W. Arthur, E. Durlauf and D. E. Lane, Addison-Wesley. XXVII.
- Lansing, S. J. (2000). "Anti-Chaos, Common Property, and the Emergence of Cooperation". *Dynamics in Human and primate Societies*, p. 207-223.
- Lansing, S. J. and J. N. Kremer (1994). "Emergent Properties of Balinese Water Temple Networks: Coadaptation on a Rugged Fitness Landscape". *Artificial Life* 3.
- Lefroy, R. D. B., H.-D. Bechstedt and M. Rais (2000). "Indicators for sustainable land management based on farmer surveys in Vietnam, Indonesia, and Thailand". *Agriculture, Ecosystems & Environment* 81(2), p. 137-146.
- Lynam, T., F. Bousquet, C. Le Page, P. Aquino (d'), O. Barreteau, F. Chinembiri and B. Mombeshora (2001). "Adapting science to adaptive managers - spidergrams, belief models and multi-agent systems modelling". *Conservation Ecology* 5(2).
- Maton, L. (2001). *Mémoire de DEA, à paraître*.
- Merritt, W. S. and S. Y. Schreider (2000) *Relating Geomorphological, Vegetation and Climate Attributes to Hydrologic Response in Humid Subcatchments*. Canberra, ICAM.
- Michaud, J. (1997). "Economic transformation in a Hmong village of Thailand". *Human Organisation* 56(2), p. 222-232.

- Moisdon, J.-C. (1997). *Du mode d'existence des outils de gestion*. Paris: Seli Arslan, 286 p.
- Molden, D., R. Sakthivadivel, C. J. Perry and C. Fraiture (de) (1998). Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems, IWMI, 27 p.
- Narintarangkool na Ayudhaya, P. (1988). *From conflicting to shared visions for a commons: stakeholder's visions for integrated watershed management in Thailand's Highlands*. International Association for the Study of Common Property Conference, Vancouver.
- Perez, P., N. Ardlie, P. Kuneepong, C. Dietrich and W. S. Merritt (2001). "CATCHCROP: Modeling crop yield and water demand for Integrated Catchment Assessment in Northern Thailand". *Environmental Modelling and Software*.
- Petit, M. (1981). *Théorie de la décision et comportement adaptatif des agriculteurs*. Formation des agriculteurs et apprentissage de la décision, Dijon (France), ENSSAA, INPSA, INRA, INRAP.
- Petit-Singeot, F. and T. Fuhs (1994). "Simulate Negotiation for Common Farm Equipment with Cognitive Replicators". *Cognitive Science in Industry*.
- Petit-Singeot, F., P. Jannot and T. Fuhs (1994). "Modeling Negotiation process between Farmers". *ASAE: International Winter Meeting*.
- Quinn, P. F., K. J. Beven and R. Lamb (1995). "The $\ln(a/\tan\beta)$ Index: How to calculate it and How to use it within the TOPMODEL Framework". *Hydrological Processes* 9, p. 161-182.
- Rykiel, E. J. (1996). "Testing ecological models: the meaning of validation". *Ecological Modelling* 90, p. 229-244.
- Schreider, S. Y., A. J. Jakeman, J. Gallant and W. S. Merritt (1999). The IHACRES Model Application for Surface Runoff Modelling in the Mae Chaem Catchment, Northern Thailand: Methodology and First Pass Approach Results, Canberra, ICAM.
- Scoccimarro, M. and A. Walker (1999). Agricultural intensification and emerging water resource constraints: a case study from northern Thailand, Canberra, ICAM.
- Scoccimarro, M., A. Walker, C. Dietrich, S. Y. Schreider, A. J. Jakeman and H. Ross (1999). A Framework for Integrated Catchment Assessment in Northern Thailand. Canberra (Australia), ICAM, 24 p.
- Sebillothe, M. and L.-G. Soler (1990). Les processus de décision des agriculteurs. *Modélisation systémique et système agraire: décision et organisation*. J. Brossier, B. Vissac and J.-L. Le Moigne. Paris, INRA, p. 93-117
- Simon, H. A. (1957). *Administration Behaviour : Study making processive in Administrative Organization*. Paris: Economica, 322 p.
- Simonovic, S. P. (2000). "Tools for water management". *Water International* 25(1), p. 76-88.

- Tanabe, S. (1994). *Ecology and Practical Technology: Peasant Farming Systems in Thailand*. Bangkok: White Lotus Co.
- Tenneson (1998). Méthode de modélisation de la gestion intégrée d'unj bassin versant: application au cas du fleuve Sénégal. Montpellier, ENGREF.
- Vanpen, S. (1986). *Historical Development and Management of Irrigation Systems in Northern Thailand*. Chiang Mai (Thailand): Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Chiang Mai University.
- Vorapien, P. (1994). Villagers say fires set deliberately. *Bangkok Post*. Bangkok.
- Walker, A. and C. Dietrich (2000). Identification and implementation of management scenarios through a Decision Support System with application to the upper-Mae Yort sub-catchment.
- Walker, A. and M. Scoccimarro (1999). A Resource Management Unit Approach to Catchment Analysis in Northern Thailand. Canberra, ICAM, 19 p.
- Zander, P. and H. Kachele (1999). "Modelling multiple objectives of land use for sustainable development". *Agricultural Systems* 59, p. 311-325.

Annexes

<u>Proposition de modification du modèle de bilan hydrique</u>	
<u>i</u>	
<u>Les diagrammes UML</u>	ii
<u>Quantités de travail affectées aux productions végétales</u>	
<u>iv</u>	
<u>Matrice du modèle de programmation linéaire utilisé</u>	
<u>v</u>	
<u>Matrice des solutions du modèle de programmation linéaire</u>	
<u>vi</u>	
<u>Exemples de diagrammes UML de CatchScape</u>	vii
<u>Article présenté au congrès ModSim, décembre 2001</u>	xi
<u>Liste non exhaustive des paramètres de CatchScape</u>	
<u>xvii</u>	
<u>Détail de l'occupation du sol défini sur la grille</u>	
<u>xvii</u>	

Annexe A Proposition de modification du modèle de bilan hydrique

Cette modification ne concerne que les parcelles de paddy. L'idée est d'introduire d'une part un réservoir de surface dont le niveau est la hauteur de la lame d'eau en surface, d'autre part d'inclure le calcul de ce réservoir au niveau de la fonction d'infiltration/ruissellement de CATCHCROP et enfin d'ajouter les apports en irrigation à cette même étape (dans la version actuelle ils ne sont pris en compte qu'au niveau du réservoir sol et du réservoir racinaire).

Ainsi, la fonction d'infiltration/ruissellement actuelle (voir Deuxième Chapitre : 2.2.1) est remplacée par une fonction du type de celle montrée sur la Figure A.

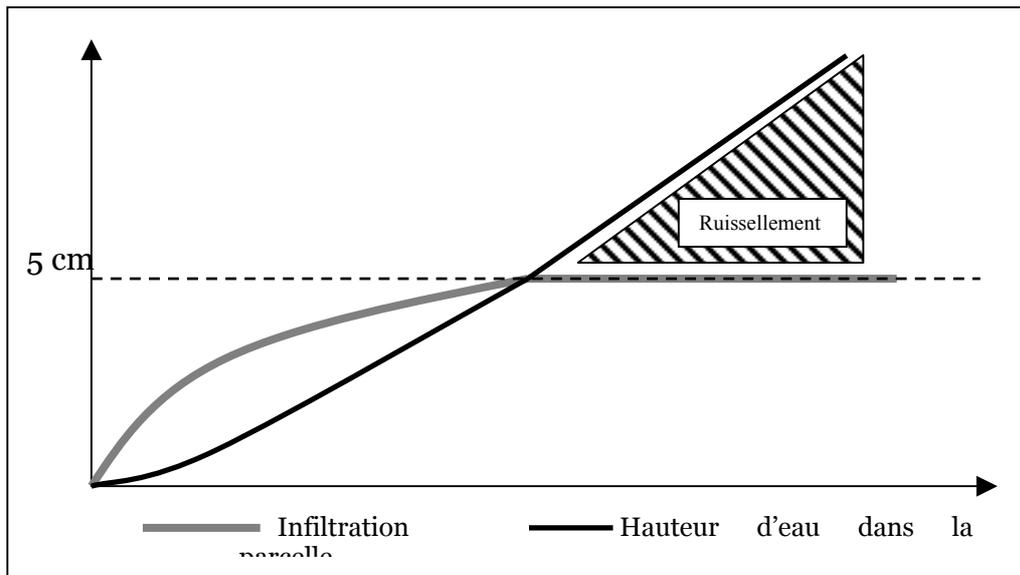


Figure A : Fonction d'infiltration/ruissellement intégrant une lame d'eau superficielle

En fait la courbe de ruissellement devient la courbe de hauteur d'eau dans la parcelle. Cette dernière est limitée à une certaine valeur. Nous prenons ici l'hypothèse que la hauteur maximale dans la parcelle est de 5 cm. Ainsi ce n'est que lorsque le niveau d'eau dans la parcelle est supérieur à 5 cm, que le ruissellement commence à apparaître. Nous avons représenté cette modification à l'aide de la fonction d'infiltration utilisée par CATCHCROP sur la Figure B.

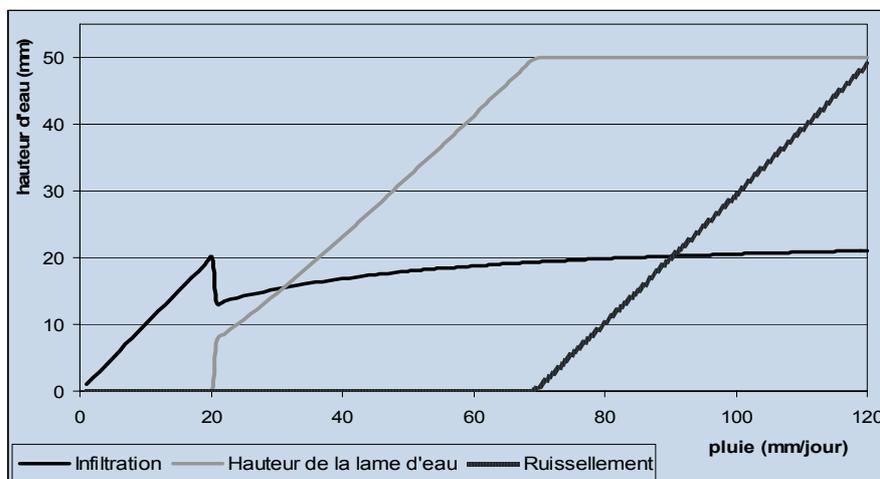


Figure B : Nouvelle équation de ruissellement et calcul de la hauteur d'eau dans le réservoir de surface

Par ailleurs les équations de calcul du réservoir sol et du réservoir racinaire sont modifiées et remplacées par les équations suivantes :

$$\text{INF}_i = \text{RR}_i + \text{IR}_i - \text{RO}_i + \text{varLEV}_i$$

$$\text{DD}_i = \text{MAX} [0 ; (\text{SR}_i + \text{INF}_i - \text{SAW})]$$

$$\text{SR}_i = \text{MIN} [\text{SAW} ; (\text{SR}_i + \text{INF}_i)]$$

$$\text{varCAW}_i = (\text{RD}_i - \text{RD}_{i-1}) / \text{SD} * \text{SR}_i$$

$$\text{CR}_i = \text{MIN} [\text{CAW}_i ; (\text{CR}_i + \text{INF}_i + \text{var CAW}_i)]$$

Avec : INF_i , infiltration au temps i

VarLEV_i , variation de la hauteur d'eau dans la parcelle entre le temps $i-1$ et le temps i

DD_i , drainage profond au temps i

SR_i et CR_i les volumes au temps i des réservoirs sol et plante (zone racinaire) respectivement

RR_i , la pluie ; RO_i , le ruissellement ; IR_i , l'irrigation

SAW et CAW_i , les capacités maximum des réservoirs sol et plante (au temps i) respectivement

RD_i , profondeur racinaire au temps i

SD , profondeur total du sol

Annexe B Les diagrammes UML

L'UML (United Modelling Language) est un langage de représentation d'un modèle, d'une structure, appliqué à la programmation Orientée Objet.

Sur ce principe, quatre diagrammes UML sont généralement utilisés pour schématiser la structure d'un SMA

Le diagramme de classes

Il permet de visualiser les différentes entités du modèle et leur hiérarchisation. C'est à travers ce diagramme que l'on sait à quelle catégorie appartient chaque objet : entité spatiale, agents communiquant et objet situé ou pas. Il décrit et énumère également les attributs et les procédures des entités.

Plus précisément

Un diagramme de classes est une collection d'éléments de modélisation statiques (classes), qui montre la structure d'un modèle.

Un diagramme de classes fait abstraction des aspects dynamiques et temporels.

Pour représenter un contexte précis, un diagramme de classes peut être instancié en diagrammes d'objets

Une association exprime une connexion sémantique bidirectionnelle entre deux classes.

L'association est instanciable dans un diagramme d'objets ou de collaboration, sous forme de liens entre objets issus de classes associées.

Le diagramme de séquences

Ce diagramme met en valeur d'une part l'ordre dans lequel le programme lit les instructions. Il montre également l'objet de ces instructions. Enfin il souligne les interactions d'objet à objet, d'objet à agent et d'agent à agent.

Plus précisément

Les diagrammes de séquences permettent de représenter des collaborations entre objets selon un point de vue temporel, on y met l'accent sur la chronologie des envois de messages. La représentation se concentre sur l'expression des interactions.
Les diagrammes de séquences peuvent servir à illustrer un cas d'utilisation.
L'ordre d'envoi d'un message est déterminé par sa position sur l'axe vertical du diagramme ; le temps s'écoule "de haut en bas" de cet axe.
La disposition des objets sur l'axe horizontal n'a pas de conséquence pour la sémantique du diagramme.

Le diagramme d'activités

Il décrit de manière précise au travers de fonctions et procédures, l'activité des instructions. Par exemple l'action de passer une porte sera décrite de la façon suivante : je demande à l'objet porte son état ; si la porte est ouverte je passe ; si la porte est fermée j'ouvre la porte et je passe.

Plus précisément

UML permet de représenter graphiquement le comportement d'une méthode ou le déroulement d'un cas d'utilisation, à l'aide de diagrammes d'activités.
Une activité représente une exécution d'un mécanisme, un déroulement d'étapes séquentielles.
Le passage d'une activité vers une autre est matérialisé par une transition.
Les transitions sont déclenchées par la fin d'une activité et provoquent le début immédiat d'une autre (elles sont automatiques).
En théorie, tous les mécanismes dynamiques pourraient être décrits par un diagramme d'activités, mais seuls les mécanismes complexes ou intéressants méritent d'être représentés

Le diagramme d'états

Il décrit les différents états d'un objet. Par exemple le niveau d'eau dans une parcelle indique les processus qui permettent de passer d'un état à un autre ; autre exemple : une irrigation fait passer le niveau d'eau dans la parcelle d'un état 1 à un état 2.

Plus précisément

Ce diagramme sert à représenter des automates d'états finis, sous forme de graphes d'états, reliés par des arcs orientés qui décrivent les transitions.
Les diagrammes d'états-transitions permettent de décrire les changements d'états d'un objet ou d'un composant, en réponse aux interactions avec d'autres objets/composants ou avec des acteurs.
Un état se caractérise par sa durée et sa stabilité, il représente une conjonction instantanée des valeurs des attributs d'un objet.
Une transition représente le passage instantané d'un état vers un autre.
Une transition est déclenchée par un événement. En d'autres termes : c'est l'arrivée d'un événement qui conditionne la transition.

Annexe C Quantités de travail affectées aux productions végétales

Age	ricePaddy	riceUpland	soybean	maizeGrain	cabbage	potato	Onion
-20	0.7	nil	nil	nil	nil	nil	Nil
-10	0.7	1	0.6	1	0.6	0.6	0.6
10	1.2	1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
20	0	0	0	0	0	0	0
30	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
40	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0.6	0.6	0	0	0.6	0
60	0.4	0	0	0.6	0.6	0	0.6
70	0	0.6	0.6	0	0	0.6	0
80	0	0	0	0.6	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0
100	0.4	0	0	0	0.6	0	0.6
110	0	1	0	0	0	0	0
120	0	0.8	0	0	0	0	0
130	0	nil	0.4	0.4	0	0.4	0
140	0	nil	0.2	0.2	0	0.2	0
150	1.6	nil	nil	nil	0.4	nil	0.4
160	1.2	nil	nil	nil	0.2	nil	0.2

Annexe D Matrice du modèle de programmation linéaire utilisé

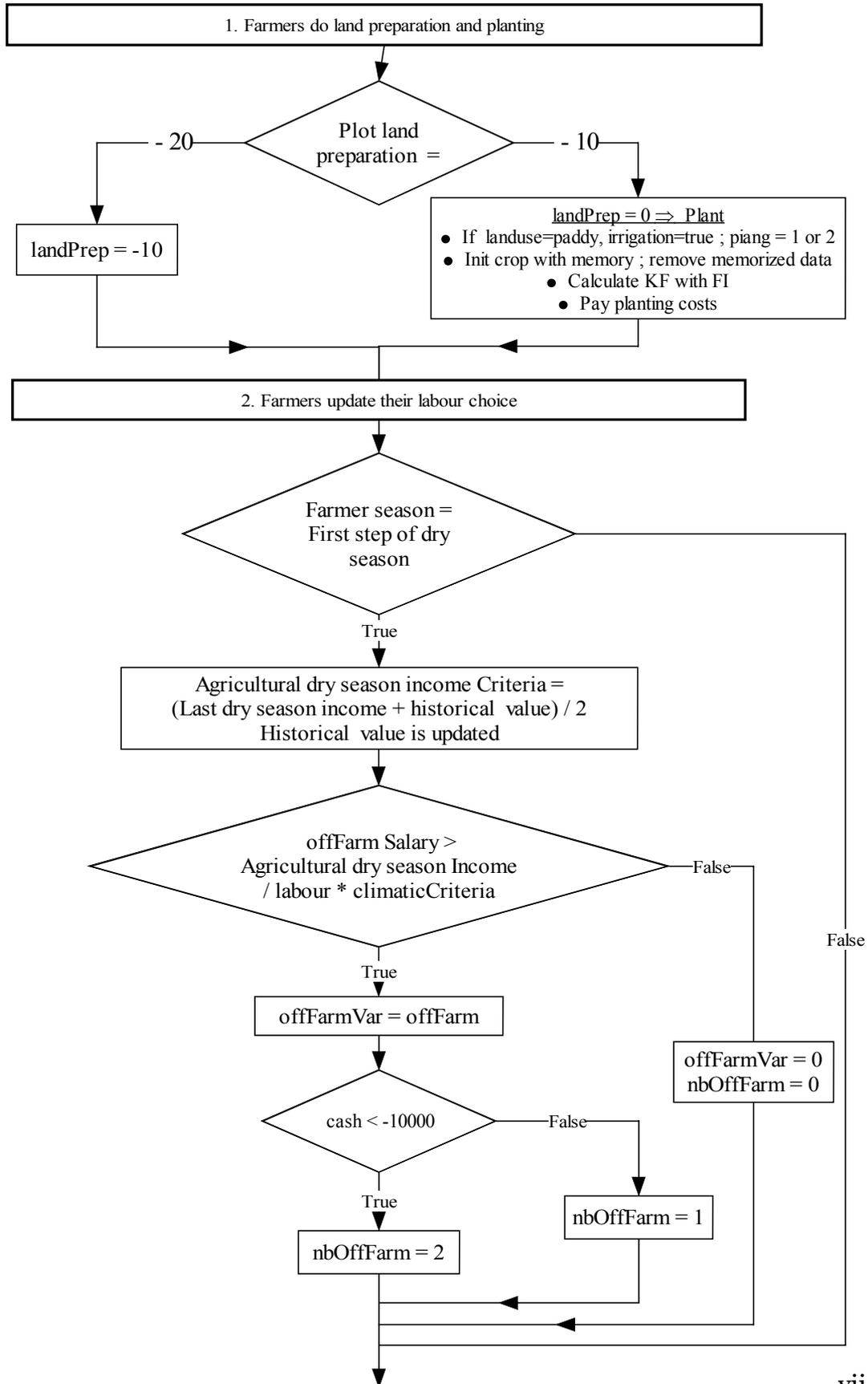
Null	null	null	soy (pi) (l)	soy (pi) (m)	soy (pi) (h)	piml	pimm	pimh	piom	pioh	hirel p1	hirel p2	hire 10	hire 20	hire 30	hire 40	hire 50	hire 60	hire 70	hire 80	hire 90	hire 100	hire 110	hire 120	hire 130	hire 140	hire 150	hire 160	
Null	null	null	2680	4000	5360	1630	2530	3430	1121 2	37292	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80
Iplot	1	11	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cash	5000	11	640	960	1280	810	1130	1450	1574 6	16068	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Labprep1	3	11	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Labprep2	3	11	0.7	0.7	0.7	1.1	1.1	1.1	0.7	0.7	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab10	3	11	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab 20	3	11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab30	3	11	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab40	3	11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab50	3	11	0.7	0.7	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab60	3	11	0.1	0.1	0.1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab70	3	11	0.7	0.7	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab80	3	11	0.1	0.1	0.1	0.7	0.7	0.7	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab90	3	11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
Lab100	3	11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
Lab110	3	11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
Lab120	3	11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
Lab130	3	11	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
Lab140	3	11	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
Lab150	3	11	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
Lab160	3	11	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
Irrigation	500	11	220	310	400	190	280	350	380	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

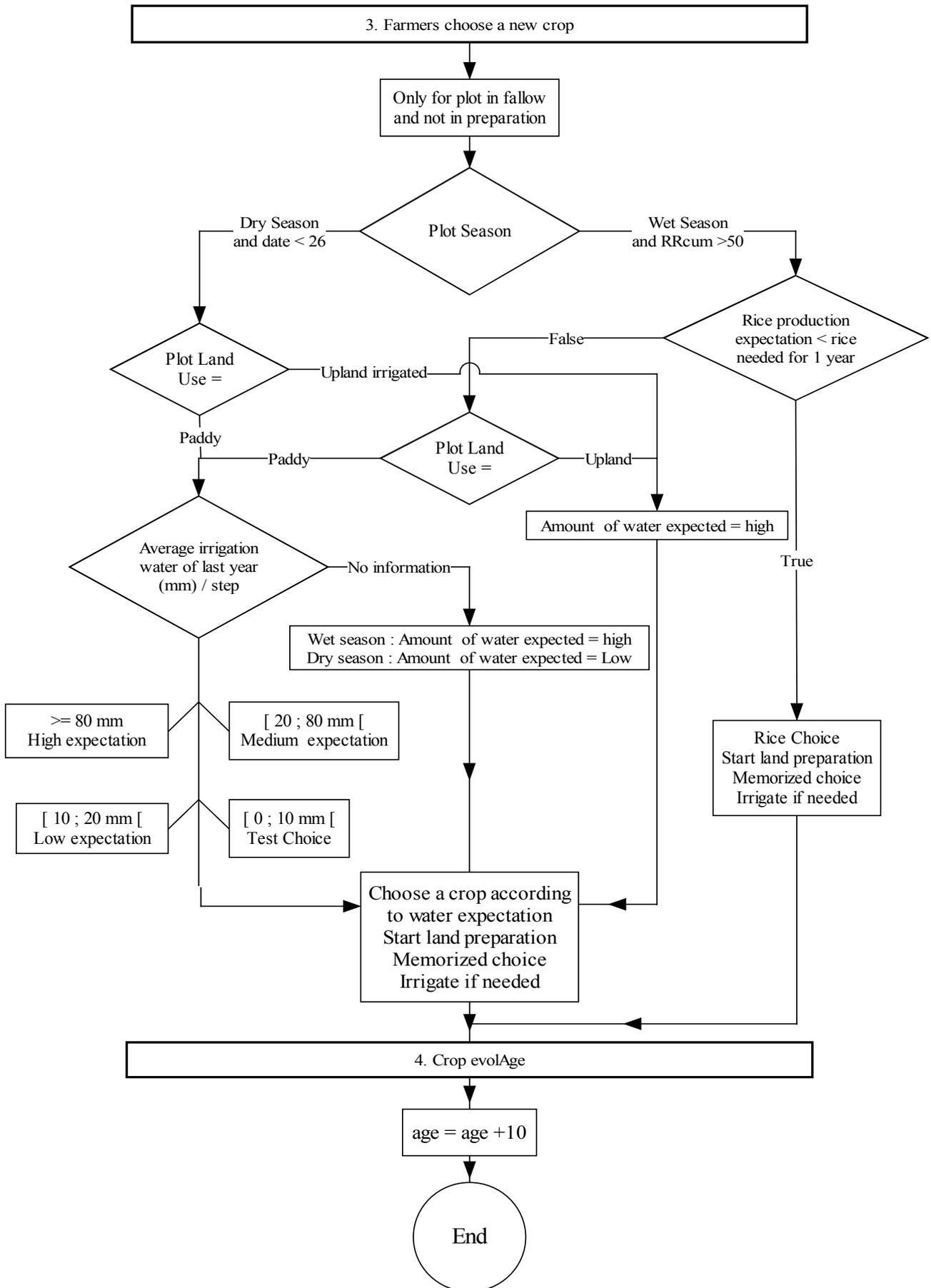
Annexe E Matrice des solutions du modèle de programmation linéaire

Nb of Crop / Plot	Total Water			2/3 Water			1/3 Water		
CASH / PLOT	Soy IR H	On IR H	Fallow	Soy IR H	On IR H	Fallow	Soy IR H	On IR H	Fallow
1000	0,8	0,0	0,2	0,8	0,0	0,2	0,4	0,0	0,6
1500	1,0	0,0		0,8	0,0	0,2	0,3	0,1	0,6
2000	1,0	0,0		0,8	0,0	0,2	0,3	0,1	0,6
2500	0,9	0,1		0,7	0,1	0,2	0,3	0,1	0,6
3000	0,9	0,1		0,7	0,1	0,2	0,2	0,2	0,6
3500	0,8	0,2		0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6
4000	0,8	0,2		0,6	0,2	0,2	0,1	0,3	0,6
4500	0,8	0,2		0,5	0,3	0,2	0,1	0,3	0,6
5000	0,7	0,3		0,5	0,3	0,2	0,0	0,3	0,7
6000	0,7	0,3		0,4	0,3	0,3		0,3	0,7
7000	0,6	0,4		0,3	0,4	0,3		0,3	0,7
8000	0,5	0,5		0,2	0,5	0,3		0,3	0,7
9000	0,5	0,5		0,1	0,6	0,3		0,3	0,7
10000	0,4	0,6		0,1	0,6	0,3		0,3	0,7
12500	0,2	0,8		0,0	0,7	0,3		0,3	0,7
15000	0,1	0,9		0,0	0,7	0,3		0,3	0,7
17500	0,0	1,0		0,0	0,7	0,3		0,3	0,7
20000	0,0	1,0		0,0	0,7	0,3		0,3	0,7
30000	0,0	1,0		0,0	0,7	0,3		0,3	7,0

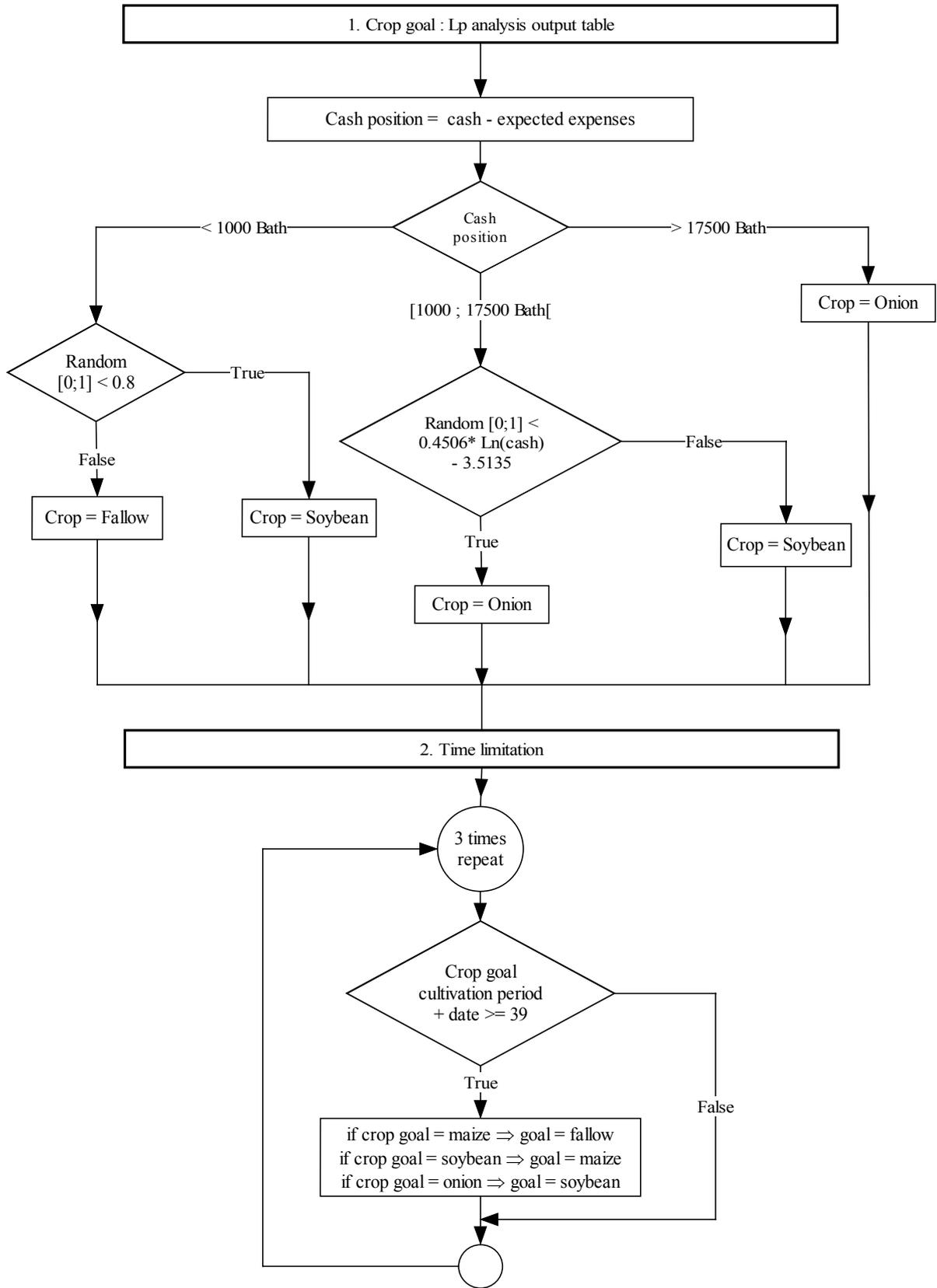
Annexe F Exemples de diagrammes UML de CatchScape

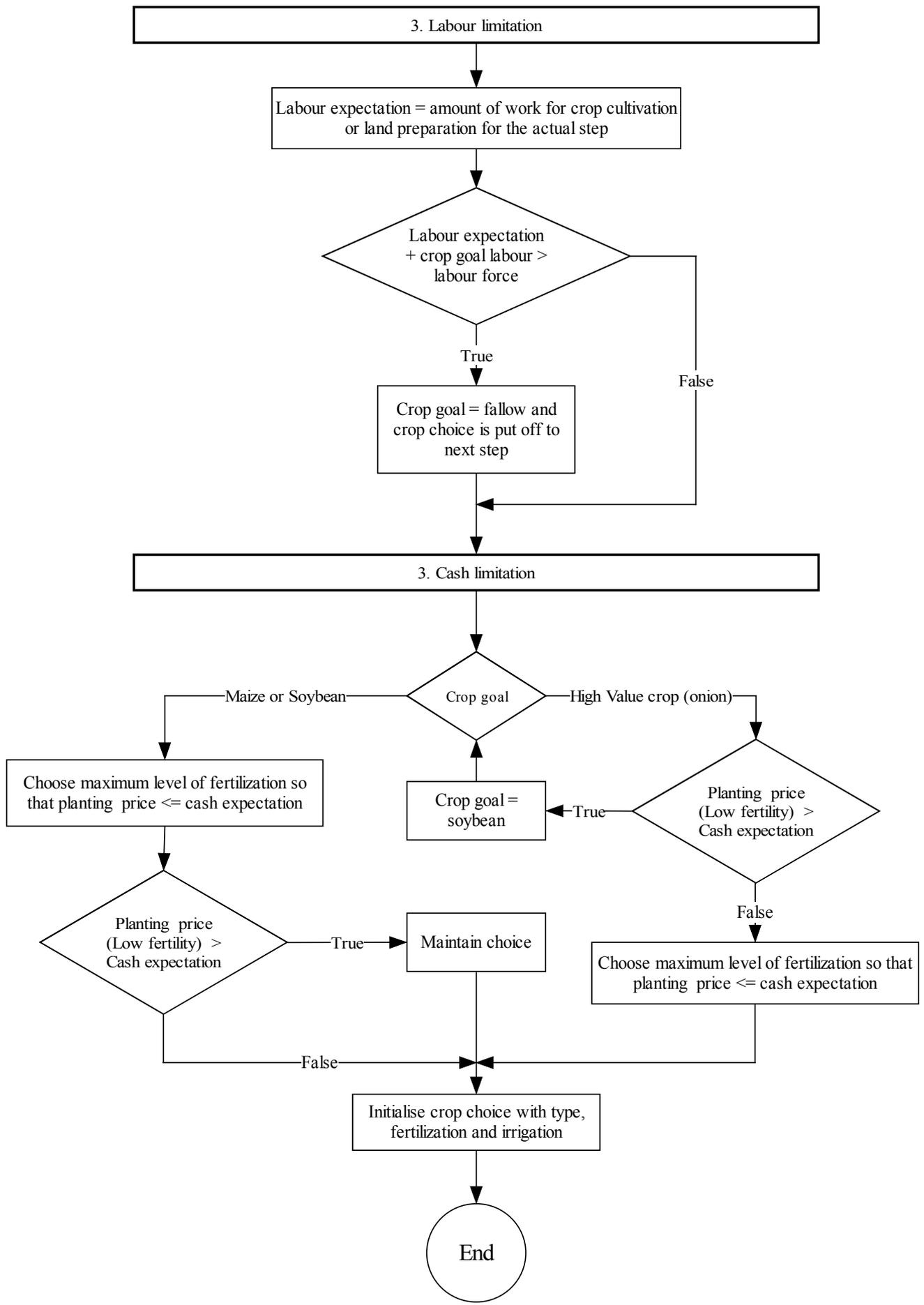
Farmers update some factors and take decisions about labor allocation and cropping pattern





Crop choice method for a high water expectation



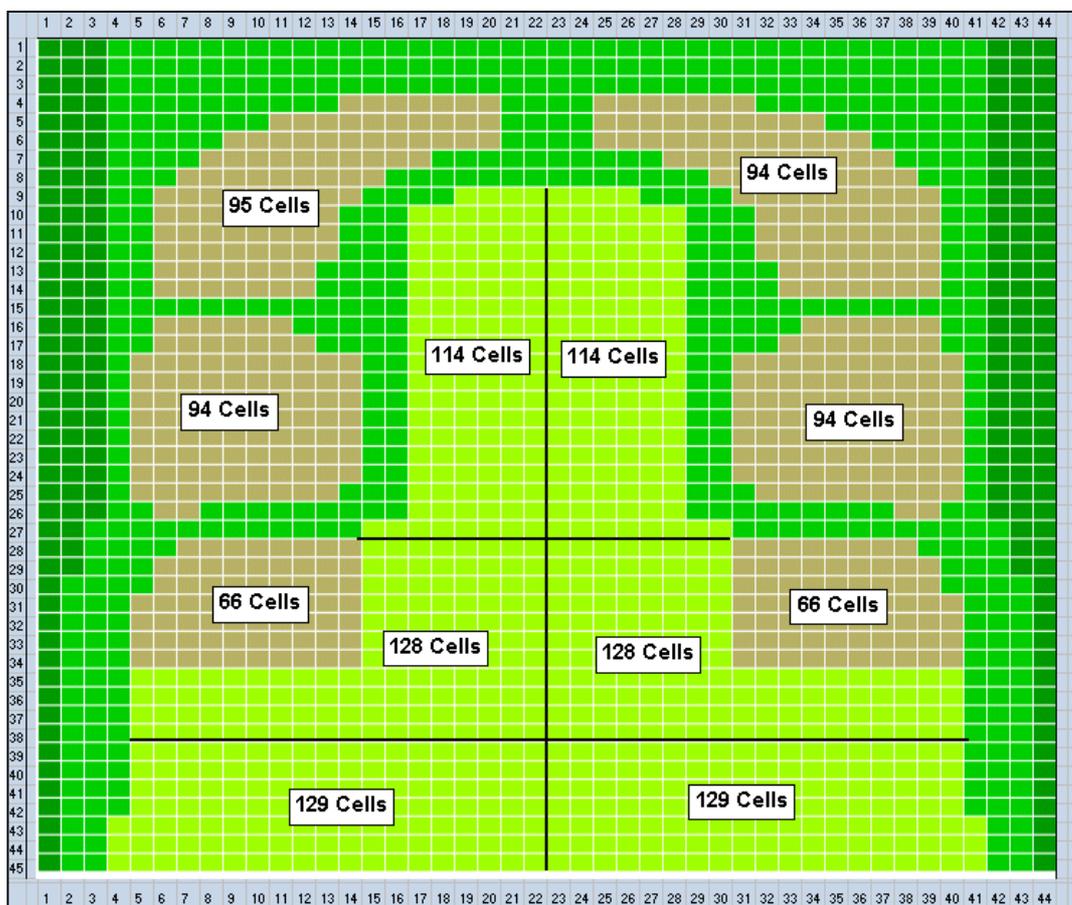


**Annexe G Article présenté au congrès ModSim -
décembre 2001**

Annexe H Liste non exhaustive des paramètres de CatchScape

Crop	Irrigation management	Soil	Land	Labour	Hydro	FI	Price /Year	Cost / Crop	Parameter / Zone
Lini	piangSize	TAW	paddyPrice	ricePaddy	RR	L	ricePaddy	ricePaddy	GeneralExpanses
Ldev	selfishRatio	TEW	uplandPrice	riceUpland	NRDi	M	riceUpland	riceUpland	RiceBuyingPrice
Lmid	uplandEquipedQuota	REW	forestConversionPrice	soybean	ETo	H	soybean	soybean	ConsumptionRate
Lend	maxDiversion	IS	forestConversionWork	maizeGrain	Flow		maizeGrain	maizeGrain	OffFarmSalary
KCini	wetSeasonLevel	SD	uplandIrrigationPrice	cabbage			cabbage	cabbage	HiredLabourPrice
KCmid	drySeasonLevel	CS	uplandIrrigationWork	potato			potato	potato	
KCend	requestThreshold	LF		onion			onion	onion	
RDini	sharingCondition			fallow					
RDend	sharingLevel								
Pfactor	endRotaLevel								
CC	farmerSatisfactionCriteria								
KY	maxAlertLevel								
YM									

Annexe I Détail de l'occupation du sol défini sur la grille



	Forest	Upland	Paddy
Zone 1	160 (40 rai) + 422 (2 rai)	378	228
Zone 2	40 (40 rai) + 106 (2 rai)	132	514
Total	200 (40 rai) + 528 (2 rai)	510	742