

CIHEAM



Centre
International
de Hautes Etudes
Agronomiques Méditerranéennes

International
Centre for
Advanced
Mediterranean Agronomic Studies

Thèse / Thesis

requis pour
l'obtention du Titre

submitted
for the Degree of

Master of Science

**La gestion de l'eau
dans les puits collectifs
du Bajío de Guanajuato :
analyse et propositions
à l'aide d'un modèle de
programmation mathématique**

Sarah Janaud

Série "Master of Science" n°75
2005

**Institut Agronomique Méditerranéen de
Montpellier**



**La gestion de l'eau dans les puits collectifs du Bajio de Guanajuato :
analyse et propositions à l'aide d'un modèle de programmation mathématique.**

Sarah Janaud

Série "*Master of Science*" n°75

2005

Série Thèses et Masters

Ce *Master* est le numéro 75 de la série Thèses et *Masters* de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

Cette collection réunit les thèses *Master of Science* du CIHEAM-IAMM ayant obtenu la mention « Publication », ainsi que les travaux doctoraux réalisés dans le cadre des activités scientifiques et pédagogiques de l'Institut et de ses enseignants-chercheurs.

La thèse *Master of Science* du Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes :

La gestion de l'eau dans les puits collectifs du Bajio de Guanajuato : analyse et propositions à l'aide d'un modèle de programmation mathématique

a été soutenue par Sarah Janaud en novembre 2003 devant le jury suivant :

Mme F. Jacquet, enseignant-chercheur CIHEAM-IAMM, Montpellier	Présidente
M. D. Jourdain, chercheur CIRAD.....	Membre
M. P. Le Goulven, directeur de recherche, IRD,.....	Membre
M. P. Le Grusse, enseignant-chercheur, CIHEAM-IAMM Montpellier.....	Membre
M. G. Flichman., enseignant-chercheur, CIHEAM-IAMM, Montpellier	Membre

Le travail de recherche a été encadré par M. G.-M. Flichman.

Le texte a été mis en forme pour cette publication par l'Atelier d'édition de l'Institut de Montpellier.

CIHEAM-IAMM
Institut Agronomique Méditerranéen de
Montpellier

Directeur : Vincent Dollé

3191, route de Mende – BP 5056
34093 Montpellier cedex 05
Tél. 04 67 04 60 00
Fax : 04 67 54 25 27
<http://www.iamm.fr>

L'Institut Agronomique Méditerranéen
n'entend donner aucune approbation ni improbation
aux opinions émises dans cette thèse
Ces opinions n'engagent que leur auteur

ISBN : 2-85352-299-7. ISSN : 0989-473X

Numéros à commander au :
CIHEAM-IAMM
Bureau des Publications
e-mail : balmefrezol@iamm.fr

Prix : 50 €

© CIHEAM, 2005

**La gestion de l'eau dans les puits collectifs du Bajío de Guanajuato :
analyse et propositions à l'aide d'un modèle de programmation mathématique.
Sarah Janaud**

Fiche bibliographique.

Janaud (Sarah) – La gestion de l'eau dans les puits collectifs du Bajio de Guanajuato : analyse et propositions à l'aide d'un modèle de programmation mathématique – Montpellier : CIHEAM-IAMM, 2003 – 118 p. (thèse *Master of Science*, IAMM, 2005, Série Thèses et Masters n°75)

Résumé : Face à la crise économique et aux signes évidents de surexploitation des ressources en eau, la question du développement durable de l'agriculture devient prédominante dans la zone du Bajio de Guanajuato. la gestion de l'eau par les agriculteurs doit gagner en efficacité. Cette étude veut participer à l'amélioration de la compréhension des règles de gestion en se concentrant sur le cas précis de la gestion collective de l'eau souterraine par des groupes d'agriculteurs de petits périmètres irrigués. Le travail s'est basé sur la construction de modèles économiques représentant les groupes d'agriculteurs. L'outil construit doit aider à évaluer l'impact de divers changements intervenant dans l'environnement global de ces groupes et permettre de proposer des pistes d'amélioration pour la gestion de la ressource. Les étapes de construction du modèle sont développées dans ce mémoire.

Mots-clés : Gestion des eaux ; modèle mathématique ; méthode d'optimisation ; puits ; épuisement des ressources ; eau souterraine ; ressources en eau ; simulation ; comportement des acteurs; Mexique

Title. *Water management at the community wells of Bajio de Guanajuato: analysis and proposals using a mathematical programming model*

Abstract: *With the economic slump and clear signs of the over-exploitation of water resources, the question of sustainable development of agriculture is becoming predominant in the Bajio de Guanajuato zone. Water management by farmers must become more efficient. The study is intended to be a participation in the improvement of the understanding of the management rules by concentrating on the precise case of joint ground water management by groups of farmers in small irrigated perimeters. The work is based on the construction of economic models representing these groups. The tool developed should help in the appraisal of the impact of the various changes in the overall environment of the groups and make it possible to put forward lines of improvement in resource management. The stages in the construction of the model are described in this paper*

Keywords: *Water management, mathematical model, optimisation method, well, exhaustion of resources, ground water, water resource, simulation, farmers' behaviour, Mexico*

Remerciement

Je tiens à remercier les techniciens d'Asosid ainsi que tous les agriculteurs de San Juan, de Los Lobos et de Huanimaro pour s'être prêtés au jeu des questions-réponses, et pour leur accueil toujours chaleureux. J'espère vivement que ce travail pourra d'une façon ou d'une autre leur être utile un jour...

Un très grand merci à Damien Jourdain et M. Flichman pour leur implication constante et très précieuse tout au long de ce travail. Cette étude n'aurait pu être menée à bien sans leur participation.

Table des matières

Introduction	5
 Première partie : Rassemblement des données nécessaires à la construction du modèle économiques ressources naturelles	
I- Présentation de la zone d'étude dans le contexte politique actuel : caractéristiques économiques	9
1- Situation géographique de la zone d'étude : le Bajío Guanajuato	9
A- L'Etat du Guanajuato et le Bajío Guanajuatense	9
B- Localisation des 4 zones du Bajío concernées par le projet ASOSID	10
2- Caractéristiques agro-économiques et pédoclimatiques de la zone d'étude	11
A- L'état du Guanajuato : paradoxe des richesses et de la crise sociale	11
B- Le Bajío Guanajuatense : pôle de l'agriculture intensive irriguée	11
3- bouleversements politiques et contexte de crise économique	12
A- Ouverture économique du pays et rupture des équilibres en place	12
B- Désengagement de l'Etat du secteur agricole et de la gestion de l'eau	12
C- Désengagement de l'état et transfert de la gestion de l'eau aux usagers	13
II- Disponibilité et exploitation des ressources en eau dans le Guanajuato	14
1- Inventaire des ressources hydrauliques au niveau de la zone d'étude	14
A- Ressources en eau de la région « <i>Lerma-Santiago-Pacífico</i> »	15
B- Approvisionnement en eau des <i>municipios</i> de Valle et de Huanimaro	16
2- Compétition pour l'eau superficielle et extraction massive des eaux souterraines dans l'état du Guanajuato	17
A- Historique de l'exploitation des eaux souterraines dans le Guanajuato	17
B- Surexploitation des aquifères dès la première moitié du XX ^e siècle	17
C- Pollution des eaux de surface et menaces sur les eaux souterraines	18
III- Méthodologie et organisation du travail	18
1- Travail de terrain, étude du fonctionnement des puits collectifs	19
A- Prospection et sélection des 3 puits d'étude	19
B- Appréhension de la diversité de fonctionnement des puits collectifs du Bajío	20
C- Collecte de données sur les puits d'étude : méthodologie et sources d'information	20
2- Travail de modélisation et d'analyse	21
A- Caractéristiques du modèle choisi	21
B- Construction des modèles	22
C- Scénarios et simulations	23
IV- Recensement des règles d'organisation et des fonctionnements collectifs dans les puits du Bajío	23
1- Description et caractéristiques des périmètres irrigués étudiés	24
A- Des pratiques d'irrigation peu économes en eau	24
B- Dimensions du périmètre irrigué : surface théorique/surface réellement irriguée	25
C- Débit du puits	25
D- Surface cultivée par agriculteur	26
E- Cultures implantées durant le cycle d'hiver 2002/2003	26
F- Historique des puits	27
G- Pression sur l'eau	27
2- Caractéristiques fonctionnelles et organisationnelles	29
A- Etablissement des règles de fonctionnement par le puits	29
B- Etablissement et réglementation du tour d'eau	29
C- Allocation du droit d'extraction	32
D- Systèmes de paiement des frais d'extraction	33

E- Gamme des cultures admises par le groupe.....	35
F- Pression sur l'eau : adaptation des règles collectives et stratégie individuelles.....	36
V- Caractéristiques et organisation du puits collectif de Los Lobos	37
1- Hétérogénéité de ressources parmi les membres du puits de Los Lobos	38
A- Caractéristiques des exploitations de Los Lobos, construction d'une typologie.....	38
B- Hétérogénéité des surfaces mises en culture	39
C- Hétérogénéité des sources de revenus complémentaires	39
2- Cultures et techniques adoptées dans le puits	40
A- Peu de diversité dans les cultures adoptées à Los Lobos	40
B- Pratiques d'irrigation	40
C- Dates et durée des irrigations.....	41
3- Caractéristiques techniques des équipements de pompage des puits	41
A- Faible efficacité du système de pompage du puits	42
B- Coûts d'extraction de l'eau	42
C- Evaluation de la pression sur la ressource en eau	43
4- Tour d'eau et règles d'organisation au sein du puits	43
A- Caractéristiques du tour d'eau mis en place à Los Lobos	43
B- Système de répartition des coûts d'extraction.....	43
C- Luttres internes pour l'adoption des cultures maraîchères	44

Deuxième partie : Construction d'un outil de représentation des puits collectifs

I- Représentation d'une exploitation individuelle dans un modèle micro-économique	47
1- Mise en application des principes d'optimisation sous contrainte.....	47
A- Entrée des données exogènes	47
B- Mise en équation du problème d'optimisation	48
2- Détail des étapes de construction du modèle individuel	49
A- Etat de nature défini par le chiffre d'affaires.....	49
B- Découpage du cycle OI en périodes de temps	50
C- Dichotomie des besoins en main-d'oeuvre.....	51
D- Prise en compte des retards éventuels des tours d'eau	53
II- Agrégation des modèles individuels de Los Lobos	55
1- Application des concepts d'agrégation	55
A- Typologie et agrégation des modèles individuels de Los Lobos.....	55
B- Indexation des ressources et partage de l'eau.....	56
2- Etapes de construction du modèle collectif.....	57
A- Traitement du risque dans le modèle collectif.....	57
B- Système de paiement de l'eau : mise en équation	57
C- Modélisation du tour d'eau	58
3- Validation du modèle collectif de Los Lobos	59
A- Présentation des résultats du modèle	59
B- Analyse et critiques	61

Troisième partie : Critique du modèle construit, utilisation comme outil d'analyse et de prospective socio-économique

I- Potentialité du modèle collectif de Los Lobos	63
1- Proposition de scénarios à partir du modèle collectif de Los Lobos.....	63
2- Scénario A : évaluation de différentes règles de gestion collectives de l'eau.....	64
A- Pertinence du scénario A dans le contexte actuel.....	64
B- Description et réalisation des étapes de simulation	64
C- Présentation et interprétation des résultats des simulations A	67
D- Analyse critique de ces résultats	71

3- Scénario B : modification de l'accès à l'eau souterraine	72
A- Pertinence du scénario B dans le contexte actuel	72
B- Réalisation de la simulation B : mise en place d'un quota sur l'eau	73
C- Présentation et interprétation des résultats des simulations B	74
D- Analyse critique de ces résultats.....	77
Conclusion : intérêts et limites du modèle collectif, propositions d'améliorations.....	79
Bibliographie.....	81
Annexes	83

Liste des acronymes, sigles et figures

ALÉNA	Accord de libre-échange nord-américain
ASOSID	<i>Agriculture Sostenible a base de Siembra Directa</i> (Agriculture Durable basée sur le Semis Direct)
CFE	<i>Comision Federal de Electricidad</i> – Mexique
CIMMYT	Centre International pour l'Amélioration du Maïs et du Blé
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNA	<i>Comisión Nacional del Agua</i> (Commission nationale de l'eau)- Mexique
FIRA	<i>Fideicomisos para el Desarrollo Rural</i> (Fiducie de développement rural)
INIFAP	<i>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias</i> (Institut National de Recherche en Foresterie et en Agriculture) – Mexique
OI	Cycle Automne Hiver (saison sèche)
PV	Cycle Printemps Été (saison des pluies)

Tableaux

1. Statistiques générales, place du Guanajuato dans la République Fédérale Mexicaine	12
2. Niveaux moyens de précipitation	13
3. Production agricole du Guanajuato : quelques cultures d'importance économique.....	13
4. Déroulement en 5 phases du travail	20
5. Récapitulatif des données réunies et des sources d'information correspondantes	23
6. Caractéristiques, avantages et inconvénients des différentes cultures du cycle OI	29
7. Principaux atouts et contraintes des 2 systèmes de paiement.....	35
8. Valeur des ETM utilisées dans le modèle (le calcul figure en annexe 4)	36
9. Stratégies mises en place en réponse aux situations de pression sur l'eau	38
10. Caractéristiques des exploitations du puits de Los Lobos	39
11. Extrait 1 du diagnostic CEAR : caractéristiques physiques de la pompe	42
12. Extrait 2 du diagnostic CEAR : paramètres électriques	43
13. Factures d'électricité payées par le groupe de Los Lobos pendant le cycle OI 2003	43
14. Types de paramètres utilisés pour définir les différentes cultures.....	48
15. Récapitulatif des opérations d'optimisation en langage mathématique	50
16. Paramètres de culture et indexation du paramètre par un indicateur	54
17. Disponibilité hebdomadaire en eau par individu et pour le groupe modèle de Los Lobos	61
18. Tableaux comparatifs entre la solution du modèle A1 et les observations de terrain	62
19. Tableau récapitulatif des étapes de simulations A	68
20. Indicateurs utilisés pour l'interprétation des résultats (valable pour les scénarios A)	68
21. Tableau et indicateurs pour l'analyse du scénario A	69
22. Comparaison des surfaces de cultures horticoles (SCH) dans les différents modèles	73
23. Résultats du modèle et indicateurs pour l'analyse du scénario B	75
24. Principales évolutions dans chaque cas lors de la mise en place du quota sur l'eau	76
25. Evolution différentielle des revenus individuels suite à la mise en place du quota	77
26. Evolution différentielle des surfaces cultivées suite à la mise en place du quota	77
27. Evolution différentielle des consommations en eau suite à la mise en place du quota	77

Histogrammes

1. Répartition des CA d'une orge C ₁	55
2. Répartition des CA d'une orge C ₂	55
3. Evolution du revenu global hors prélèvements privés et du coefficient de variation du revenu individuel	70
4. Evolution de la consommation totale en eau comparée à la part des différentes cultures dans l'assolement.	71
5. Evolution de la rentabilité de l'eau (pesos/m ³) et de la part des cultures	72

Introduction

Introduction générale

La pression croissante sur les ressources en eau dans les régions agricoles pratiquant l'irrigation et les nombreux conflits d'usages qui en découlent sont des constats courants, vérifiables aujourd'hui dans la quasi-totalité des zones irriguées. En réaction à cette situation critique, la recherche scientifique s'est largement mobilisée ces dernières années pour réfléchir à la manière de bien gérer la ressource commune et aux moyens de mieux partager l'eau entre les usagers.

La recherche d'outils de gestion et de politiques appropriées aux périmètres irrigués collectifs (PIC) s'est engagée dans différentes voies faisant intervenir plus ou moins fortement les sciences de l'économie et de la sociologie appliquées à l'irrigation : examens comparatifs de différents instruments politico-économiques de gestion de l'eau, (Montignoul 1997, Adamowicz et *al.* 1996, Carles 1998), réflexions autour du transfert de gestion aux usagers (Kloezen et *al.*, 1998 pour le Mexique, Ducrot et *al.*, 2001 pour le Brésil), analyses des modes d'organisation et de fonctionnement internes d'es périmètres irrigués collectifs (Le Gal et *al.*, 1998, Jeffrey D. Brewer, et *al.*, Faysse 2001, Bandaragoda 1998, Latif 1994).

Dans le cadre de ces travaux, une approche globale intégrée s'avère souvent nécessaire pour prendre en compte la complexité croissante des systèmes irrigués : implication des usagers, nécessité d'intégrer de nouveaux objectifs environnementaux, qualitatifs... Les équipes de recherche ont souvent jugé utile de baser leur travail sur une *représentation* du système afin d'en cerner efficacement la complexité. « La base de cette approche (intégrée) repose sur la construction d'une représentation du périmètre irrigué » (Garin et *al.*, 1998).

Plusieurs méthodes de représentation des PIC ont été proposées par des équipes de recherche, appliquées à diverses zones irriguées du monde : modèle intégré INTEGIS développé par l'IIMI et le Cemagref au Pakistan, modèle multi-agent SHADOC appliqué à la moyenne vallée du Sénégal développée par le CIRAD par exemple. Chaque méthode de représentation est spécifique, plus ou moins exhaustive, et met l'accent sur un aspect particulier du système (social, bio-physique, hydrologique, financier...) selon la finalité de l'observateur.

Certains travaux de recherche ont été spécifiquement consacrés aux aspects socio-organisationnels des systèmes irrigués, c'est-à-dire à l'organisation des usagers autour de la ressource en eau. La gestion de l'eau au sein d'un PIC résulte en effet de l'interaction de facteurs techniques et agronomiques, de contraintes physiques et de phénomènes sociaux. (Descotes, 1998). « La distribution de l'eau devrait être considérée comme un processus dynamique autant social que technique » (Bandaragoda, 1998). Le facteur social peut s'avérer un paramètre plus ou moins influent selon le contexte historico-culturel de la zone irriguée étudiée.

L'organisation interne d'un système PIC se définit en plusieurs règles de fonctionnement collectives : relations entre usagers, droits d'accès à l'eau et à la propriété foncière, contribution aux coûts de maintenance du système...

Les droits d'accès à l'eau au sein des périmètres irrigués (ou « allocation de l'eau ») notamment ont suscité beaucoup de travaux relatifs à l'existence d'un « dilemme entre valorisation économique de l'eau et équité » (Faysse, 2001). Certains auteurs se sont consacrés à la recherche de solutions équitables d'allocation de l'eau, dans les situations plus particulières de pénurie ou d'irrigation en tour d'eau (Latif, 1994, pour le Pakistan). Dans ce domaine particulier, Faysse, 2001 et Le Gal, 1998 ont travaillé sur l'évaluation comparée de différentes règles d'allocation de l'eau entre usagers, dans des zones irriguées collectives situées respectivement en Tunisie et à la Réunion et ont basé leur travail sur un outil de représentation modélisant les aspects socio-organisationnels du PIC concerné.

Le travail présenté dans ce mémoire se situe dans la lignée des travaux de recherche sur le fonctionnement social et organisationnel des PIC. Il s'applique à une zone du Mexique pratiquant l'agriculture intensive irriguée. L'objectif fixé est d'analyser le poids global du « collectif » dans les décisions individuelles des agriculteurs relatives à leurs pratiques d'irrigation. Par « collectif », nous entendons le partage de la ressource (l'eau) et du système d'extraction de la ressource (matériel).

L'ensemble de tous les aspects organisationnels du périmètre irrigué susceptibles de contraindre ou de conditionner les décisions de l'agriculteur a voulu être pris en compte. Ceci inclut donc les modes d'allocation quantitative de l'eau, question souvent prédominante dans un périmètre irrigué et traitée dans les travaux cités précédemment, mais également d'autres aspects organisationnels, que nous avons étudiés en fonction de leur impact potentiel sur les stratégies individuelles. L'allocation chronologique de l'eau ou « tour d'eau » notamment représente l'un des points centraux de notre travail. L'organisation du tour d'eau s'est effectivement révélée une caractéristique particulièrement significative du fonctionnement des périmètres irrigués de notre zone d'étude.

Conformément à la plupart des études précédemment réalisées dans ce domaine, notre travail est intrinsèquement lié à la construction d'un outil de représentation-simulation du système irrigué. La méthode et l'outil de simulation choisis dans notre étude s'apparentent en partie à la méthode appliquée par Faysse, 2001 : les stratégies individuelles des agriculteurs ont d'abord été simulées à l'aide de modèles d'optimisation sous contrainte, puis agrégées à l'échelle du groupe. Lors de l'agrégation, nous avons cherché à représenter l'impact de la collectivité aux travers de contraintes « collectives » et en utilisant une fonction objectif commune.

Il est rapidement apparu, au cours du travail de terrain, que l'organisation du tour d'eau était une des contraintes les plus exigeantes du fonctionnement collectif. Afin de représenter cette contrainte, nous avons créé une variable d'allocation individuelle différenciée dans le temps selon les différents utilisateurs et leur place dans le tour. En jouant sur cette variable, il a été possible de modéliser les différents types de fonctionnement collectif observés sur le terrain, du plus souple au plus rigide.

L'intérêt et l'originalité de cette étude résident donc dans l'intégration de l'ensemble des aspects de la gestion collective de l'eau afin de renforcer la compréhension globale des stratégies individuelles en matière de pratiques d'irrigation dans les PIC. L'outil de représentation finalement obtenu nous a permis d'analyser de façon dynamique les fonctionnements collectifs des PIC de la zone d'étude. En effectuant des variations de l'ensemble des paramètres collectifs, selon des scénarios vraisemblables basés sur des observations de terrain, il a été possible d'évaluer globalement le poids de la collectivité dans différents cas de figure, et de les comparer en fonction d'indicateurs économiques, environnementaux et sociaux. Le modèle permet également d'envisager un travail prospectif, et l'évaluation de scénarios que nous avons jugés pertinents vis-à-vis des problématiques spécifiques de la zone et du contexte politico-économique de l'eau.

L'ensemble de ce travail est appliqué à la grande région agricole mexicaine du Bajío de Guanajuato. Il s'intègre à un projet de recherche-développement conduit, principalement, par le CIRAD¹.

Problématiques de l'agriculture irriguée du Bajío et contexte institutionnel de l'étude

Le Bajío de l'Etat du Guanajuato, une des régions agricoles les plus importantes et les plus anciennes du Mexique, a subi de plein fouet les conséquences de la crise économique mexicaine des années 80 et s'adapte difficilement aux nouvelles orientations de la politique nationale depuis les années 90. Les difficultés actuelles sont d'ordre économique en raison de la chute du prix des céréales, écologique, liées à la surexploitation des ressources en eau et social puisque l'unique solution restante pour beaucoup d'agriculteurs est l'émigration vers les Etats-Unis.

¹ CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

Dans ce contexte difficile, des solutions sont recherchées pour refaire du Bajío une région agricole d'avenir.

Parmi elles, le projet de recherche-développement ASOSID² s'est mis en place, sur l'initiative du CIRAD, en partenariat avec le CIMMYT³ et de nombreuses institutions mexicaines. Il se donne pour but de chercher les nouvelles pistes d'un développement agricole durable, principalement au travers de la technique du semis direct.

Le projet a débuté en 2000 par un diagnostic général du niveau d'adoption du semis direct dans l'Etat du Guanajuato et une enquête auprès de 170 agriculteurs des zones irriguées et non irriguées.

L'analyse de ce diagnostic a fait apparaître le poids considérable de la problématique «eau» dans les comportements et les décisions agricoles. Il met en évidence une gestion souvent non optimale de la ressource par les agriculteurs du Bajío. L'équipe d'ASOSID a donc fait le choix d'orienter une partie de son travail sur la compréhension de la gestion de l'eau par les agriculteurs et la recherche d'alternatives à la surexploitation des ressources. Le projet m'a accueilli entre 2002 et 2003 dans ce cadre, dans la continuité d'une étude réalisée en 2002 sur la compréhension des règles de gestion de l'eau des agriculteurs.

Le travail qui m'a été confié concernait spécifiquement des périmètres irrigués collectifs utilisant la ressource en eau souterraine, au sein duquel les agriculteurs sont réunis en société autour de l'exploitation d'un même puits (ou puits collectif).

L'objectif de ce travail est de renforcer la compréhension globale des stratégies individuelles en matière de pratiques d'irrigation, au sein des puits collectifs du Bajío. Nous avons donc cherché à créer un outil de représentation (modèle) capable de déchiffrer les comportements des utilisateurs vis-à-vis de la ressource eau, et qui puisse également être utilisé pour simuler des scénarios impliquant diverses modifications internes au groupe ou de l'environnement extérieur global : politique, économique ou naturel.

La modélisation sous-entend une parfaite compréhension préalable des modes de gestion actuellement en place, et des éléments qui régissent les stratégies actuelles. Nous nous donc sommes appliqués, au cours du travail de terrain, à identifier au mieux les contraintes, individuelles et collectives, susceptibles de conditionner les choix des agriculteurs et leur consommation en eau d'irrigation.

Ce mémoire présente le compte rendu des étapes de travail nécessaires à la construction de ce modèle. Nous avons essayé tout au long de la rédaction de procéder de façon rigoureuse pour établir un lien systématique entre les observations faites sur le terrain d'une part, et leur application ou la traduction dans le modèle d'autre part.

Une première partie du rapport présente les résultats du travail de terrain préalable à la phase de modélisation et nécessaire à la compréhension du fonctionnement des puits collectifs. La seconde partie développe la construction des modèles, étape par étape. Dans la dernière section, nous montrons des exemples d'utilisation du modèle dans des simulations que nous avons jugées pertinentes vis-à-vis des problématiques spécifiques de la zone et de la crise actuelle.

² *Agricultura Sostenible a base de Siembra Directa* : Agriculture Durable basée sur le Semis Direct

³ CIMMYT : Centre International d'Amélioration du Maïs et du Blé

Première partie :

Rassemblement des données nécessaires à la construction du modèle

I- Présentation de la zone d'étude dans le contexte politique actuel : caractéristiques économiques, ressources naturelles

Dans ce chapitre, nous présenterons la région de manière à cerner de plus en plus précisément la zone d'étude, qui se concentre sur les deux sous-régions administratives («*municipios*») de Valle de Santiago et Huanimaro. Ce chapitre fournit des informations générales sur les caractéristiques agronomiques, économiques, sociales et écologiques, qui permettent d'analyser le fonctionnement de la région et par la suite de mieux comprendre certains choix faits dans le travail de modélisation. Il a pour second objectif de présenter les noms et dénominations des différentes divisions administratives ou géographiques réutilisées dans la suite du mémoire.

1– Situation géographique de la zone d'étude : le Bajío de Guanajuato-

Ce que l'on appelle «Le Plateau mexicain» est la région géomorphologique la plus étendue du pays. Cet immense plateau s'étend de la frontière nord-américaine jusqu'au sud de la ville de Mexico, en une altitude croissante : de 1 200 m à 2 400 m. Sa surface est marquée par l'alternance de bassins et de sommets montagneux. La partie sud du Plateau mexicain (également appelée «*Mesa Centrale*»), d'origine volcanique est relativement plus humide que la partie nordique («*Mesa del Norte*»). L'altitude y est aussi plus élevée.

La Mesa Centrale est traversée par toute une série de bassins encadrés par des sommets volcaniques marqués par une érosion intense. Ces bassins, généralement très fertiles, sont depuis plusieurs années les régions les plus peuplées du Mexique et font partie des zones les plus anciennement cultivées. Parmi eux, la vallée du fleuve Rio Lerma, connue sous le nom de Bajío de Guanajuato, est l'une des plus grandes régions céréalières du pays. C'est là que s'est localisée la zone d'étude du projet ASOSID.

A – L'Etat du Guanajuato et le Bajío Guanajuatense

Le Bajío de Guanajuato ou Bajío Guanajuatense appartient, d'un point de vue administratif, à l'Etat du Guanajuato. L'Etat du Guanajuato est un des 32 états de la République fédérale du Mexique. Il se situe sur la Mesa Centrale, au-dessus de la ville de Mexico. (Voir carte 1).

Carte 1 : République Fédérale Mexicaine et Etat du Guanajuato



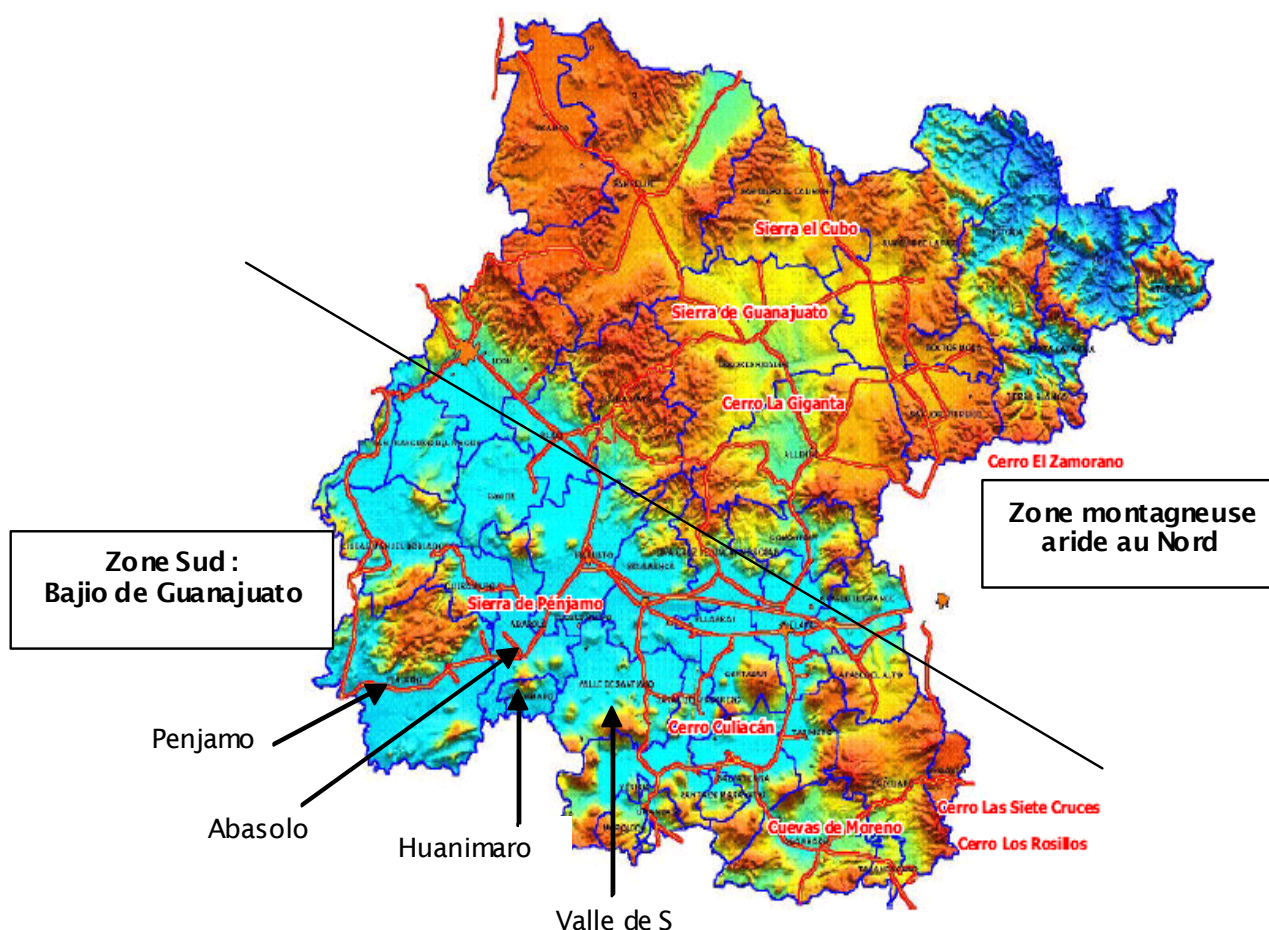
L'Etat du Guanajuato peut être lui-même séparé en deux grandes zones selon des critères géomorphologiques et climatiques : la zone Nord correspond à une zone de montagne relativement élevée (autour de 2000 m) et semi-aride. Celle au sud, correspond à un plateau moins élevé (1700-1800m) à la pluviométrie plus abondante. Intégrée à ce plateau, on trouve le bassin fertile du Bajío de Guanajuato.

La carte 2 ci-dessous représente l'Etat du Guanajuato et les délimitations des principaux reliefs. On peut y situer, au sud, la région du Bajío dans une zone plane de plus basse altitude.

B – Localisation des 4 zones du Bajío concernées par le projet ASOSID

Le «*municipio*» correspond, au Mexique, à la sous-division administrative de l'Etat fédéral. L'Etat du Guanajuato compte 46 *municipios*. Le projet ASOSID a concentré son travail de recherche sur 4 *municipios* de la zone du Bajío : ce sont les *municipios* de Penjamo, Abasolo, Valle de Santiago et Huanimaro (indiqués dans la carte 2). Notre zone d'étude se concentre plus précisément, à l'intérieur de la zone ASOSID, sur les deux *municipios* de Valle de Santiago et de Huanimaro.

Carte 2 : Etat de Guanajuato, zone du Bajío et *municipios* concernés par le projet ASOSID



2 – Caractéristiques agro-économiques et pédoclimatiques de la zone d'étude

A – L'Etat du Guanajuato : paradoxe des richesses et de la crise sociale

Dynamisme économique : potentiel agricole, touristique et industriel

L'activité agricole a été une base de la construction économique de l'Etat et reste une des grandes richesses du Guanajuato. A l'origine uniquement céréalière, l'agriculture se tourne peu à peu vers des productions à haute valeur ajoutée : culture maraîchère d'exportation, production de semences... L'Etat du Guanajuato possède également un patrimoine culturel considérable hérité du colonialisme, et par conséquent, un grand potentiel touristique et des ressources minières (or et argent). Il a développé une activité industrielle intense, notamment dans les secteurs de la chimie-pétrochimie et du textile. Sa situation géographique centrale est également avantageuse : l'état est notamment traversé par la route nord-sud Panaméricaine.

Tab. 1 - Statistiques générales, place du Guanajuato dans la République Fédérale Mexicaine

	Superficie (km ²)	SAU (% superficie)	Population 2001(m° hab.)	Densité de population	% PIB 2000
Etat du Guanajuato	31	43 % *	4.79	156	3.1 %
Moyenne nationale	1959	2,3 % **	100.14	51	100 %

Source : CNA (Comision Nacional del Agua), *Estadísticas del Agua en Mexico*, 2003.

* CEAR, *XI CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN*, sept 2001

** Calculs personnels d'après Goulet, 2002

L'Etat du Guanajuato est donc :

- => Le 6^e état en terme de densité de population.
- => Le 22^e en terme de surface.
- => Le 7^e ex aequo en terme de contribution au PIB.

Crise sociale et départ de la population agricole

Malgré ces signes évidents de dynamisme économique, le Guanajuato connaît aujourd'hui une crise sociale grave matérialisée par un exode important : l'Etat du Guanajuato est un des états de la République présentant le plus fort taux migratoire, principalement d'agriculteurs, vers les Etats-Unis. Il est courant au sein des ménages agricoles qu'une partie des membres de la famille, surtout les fils, ait quitté l'exploitation et émigré vers le nord.

L'ouverture commerciale et la politique nationale de désengagement de l'Etat sont la cause de bouleversements dont les petits agriculteurs du Guanajuato ont du mal à supporter les conséquences. Ce point est développé ultérieurement (Cf. Chap II).

B – Le Bajío Guanajuatense : pôle de l'agriculture intensive irriguée

La zone du Bajío, située dans la vallée du Rio Lerma, concentre la majeure partie de la production agricole de l'Etat du Guanajuato. Le Bajío est effectivement doté de caractéristiques agro-pédologiques particulièrement favorables à l'agriculture.

Le climat du Bajío est sub-tempéré humide, il bénéficie de davantage de précipitations que la partie nord de l'Etat, qui, sec et montagneuse, se prête moins bien aux cultures.

Tab . 2 - Niveaux moyens de précipitation

Précipitations moyennes	cycle PV (mm)	cycle OI (mm)
Ensemble de l'Etat du Guanajuato ¹	532	62
Zone du Bajío ²	670	40

Source : ¹ CNA, *Estadísticas del Agua en Mexico*, 2003. moyennes historiques 1941-2001

² IWMI, 1997. Moyennes historiques 1963-1996

D'origine basaltique, de type vertisol, les sols du Bajío sont très fertiles et comptent également pour beaucoup dans la richesse agricole de la région. (Cf. Chap IV, I-A)

Cependant, c'est l'introduction de l'irrigation qui, en permettant 2 cycles de cultures par an, a rapidement fait de la zone l'un des pôles de production agricole mexicain :

- le cycle printemps-été (Primavera-Verano - PV), de mai à octobre, comprend la saison des pluies concentrées sur les mois de juin à septembre ;
- Le cycle automne-hiver (Otoño-Invierno – OI), de novembre à avril représente la saison sèche, pendant laquelle la mise en culture est permise grâce à l'irrigation.

La productivité des zones irriguées est presque le double de celles qui pratiquent l'agriculture «pluviale ». Ce sont les eaux du fleuve Rio Lerma qui ont tout d'abord naturellement fourni l'eau d'irrigation avant qu'il ne faille faire en plus appel aux eaux souterraines.

Le tableau 3 donne quelques exemples des productions de l'Etat du Guanajuato. La surface agricole utile reste principalement céréalière, notamment pendant le cycle PV où maïs et sorgho gardent la prédominance de l'assolement. Seules les zones irriguées sont mises en cultures pendant le cycle OI. Les céréales de la saison sèche : orge et blé, occupent encore la plus grande part de l'assolement. Les cultures horticoles ne représentent toujours que des petites surfaces. Cependant, elles ont une grande importance économique : le brocoli et la fraise, symboles du maraîchage du Guanajuato, placent l'Etat du Guanajuato au 1^{er} rang de la production nationale.

Tab. 3 - Production agricole du Guanajuato : quelques cultures d'importance économique

	Surface cultivée (ha)	Surface cultivée % de la sau totale	Classement dans la Production nationale*
Maïs	324 000	24.3 %	n.d.
Sorgho	210 000	15.8 %	2 ^e
Blé	156 000	11.7 %	2 ^e
Orge	n.d.	n.d.	2 ^e
Luzerne	52 000	3.9 %	2 ^e
Brocolis	11 000	0.8 %	1 ^e
Chile vert	7 659	0.6 %	2 ^e
Ail	2 652	0.2 %	2 ^e
Fraise	2 371	0.2 %	1 ^{er}
total	1 332 000	100 %	

Sources : CEAR, XI CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN, sept 2001

* Site du gouvernement, Information agricole générale : <http://www.fira.gob.mx/>

3– bouleversements politiques et contexte de crise économique

Des bouleversements politiques majeurs sont venus perturber l'équilibre de l'Etat du Guanajuato dans le dernier quart du XX^e siècle.

A – Ouverture économique du pays et rupture des équilibres en place

L'entrée dans le GATT en 1986 et la signature des accords de ALENA (Accords de Libre Echange Nord Américain) en 1994 entre le Canada, les Etats-Unis et le Mexique mettent fin à la politique nationale de subventions et de soutien aux prix agricoles. Cette ouverture commerciale entérine l'obligation de s'aligner progressivement sur les cours mondiaux. Une baisse des prix de vente des céréales s'ensuit depuis 1994, plus sensible depuis 1999, et qui affecte fortement les systèmes de production du Guanajuato, toujours basés principalement sur les cultures céréalières.

B- Désengagement de l'Etat du secteur agricole et de la gestion de l'eau

Le désengagement de l'Etat des secteurs agricole et de la gestion de l'eau s'intègre à un mouvement de réforme bien plus large de l'Etat mexicain amorcé dans les années 70 et la rupture avec l'ancien système du « *Welfare State* », l'état « protecteur ». Cette rupture avec l'équilibre précédent bouleverse la situation et les données économiques pour les agriculteurs mexicains, notamment les céréaliers du Bajío.

Désengagement du secteur agricole

Suite à la crise économique des années 80, liée à la crise pétrolière, l'Etat doit se désengager peu à peu du secteur agricole très coûteux, qu'il a fortement subventionné et assisté pendant les dernières décades. Cette aide passait par le soutien des prix mais aussi par le fonctionnement d'institutions spécialisées d'aide aux agriculteurs : coopérative d'achats, coopératives d'approvisionnement... Le retrait de l'Etat du secteur agricole marque la fin de cet assistanat et provoque de nombreuses difficultés dans le secteur agricole touchant particulièrement les petits agriculteurs.

C- Désengagement de l'état et transfert de la gestion de l'eau aux usagers

La politique nationale de l'eau subit le même schéma que la politique agricole. Le rôle paternaliste que l'Etat a joué dans la gestion des eaux nationales touche à sa fin dans les années 80 : le nombre croissant de conflits entre usagers, les signes visibles de la surexploitation des ressources montrent clairement l'inefficacité du système précédent géré et porté par l'Etat. Celui-ci décide alors d'amorcer le désengagement et de transférer la gestion de la ressource aux usagers eux-mêmes :

- ❑ **Objectifs** : l'objectif de la réforme est de réussir à responsabiliser l'ensemble de la société pour trouver des solutions au problème de l'eau, et de transformer le « consommateur » en « client », capable de payer le véritable coût social de l'eau. (Castro, 1995).
- ❑ **Moyens** : dans ce but, la CNA, *Comision Nacional del región* est créée en 1989, qui devient l'institution de référence et l'unique autorité fédérale concernant la gestion de l'eau. Le processus de transfert aux usagers, très intensif dès le début des années 90 est effectué avec l'appui de la CNA. Il consiste à transférer l'entière gestion de l'eau (maintenance des infrastructures, facturation, distribution...) à des associations d'utilisateurs qui doivent fonctionner de manière autonome et surtout être capables de s'autofinancer.

Vers 1992 commence le transfert de la gestion de l'eau de surface vers des associations civiles d'usagers : les modules d'irrigation, qui se répartissent le territoire du district d'irrigation.

Le transfert des eaux souterraines est plus tardif. Il faut attendre 1997 et la création des COTAS (Comité Technique des Eaux Souterraines) pour voir se mettre en place une organisation d'usagers des eaux souterraines (Gillet & Ollivier, 2002). Le COTAS représente une division hydrographique d'un aquifère.

Des changements légaux viennent compléter ces réformes : la Loi Nationale sur l'eau de 1992 finit par donner à l'eau le même statut que la terre, à savoir privatisation et circulation des droits. Elle établit les bases pour introduire des mécanismes de marché sur les droits d'eau.

❑ **Résultats** : effets du transfert analysés à ce jour

En terme quantitatif, les résultats montrent une certaine réussite dans l'application du transfert : en 1994, 2 400 000 ha ent déjà été transférés à 300 associations civiles.

Cependant, cette réussite est relative et présente de nombreuses hétérogénéités :

- le transfert de la gestion de l'eau n'a pas été réalisé de la même manière pour les eaux de surface et les eaux souterraines : la gestion des eaux souterraines a été plus tardivement prise en main par les gouvernements fédéraux que la gestion de l'eau de surface et les associations d'usagers de l'eau souterraine sont par conséquent beaucoup moins développées.
- au niveau géographique également, on observe de fortes hétérogénéités : les régions Nord et le Nord-est semblent avoir mieux profité de cette nouvelle orientation politique, peut-être en rapport avec leur proximité avec les marchés américains, alors que d'autres régions peinent à faire fonctionner le nouveau modèle. (Castro, 1995).

Gillet et Ollivier ont étudié pour le projet ASOSID en 2002 l'impact « qualitatif » du transfert sur les modes de gestions de l'eau par divers types d'agriculteurs du Bajío de Guanajuato.

Succinctement, leurs conclusions sont plutôt tièdes vis-à-vis des impacts réels du transfert dans cette zone. Elles notent « qu'aucune évolution notable des volumes consommés en eaux superficielles n'a eu lieu ». Il semble que beaucoup d'usagers ne se sentent pas encore réellement impliqués dans les associations d'utilisateurs. Quant au marché de l'eau, il est encore peu développé et n'a apparemment pas d'impact notable sur la gestion de l'eau souterraine.

Cependant le changement est encore récent. La mise en place éventuelle de modes de gestion plus efficaces par les agriculteurs en réaction au transfert de gestion de l'eau ne sera sans doute observable qu'à long terme.

II- Disponibilité et exploitation des ressources en eau dans le Guanajuato

La ressource en eau est une ressource clef au Mexique, facteur limitant du développement de nombreuses zones du pays. La distribution des 1 528 km³ de précipitations annuelles est répartie de façon très inégale sur l'ensemble du territoire et quasiment les ¾ du pays souffrent d'une relative pénurie et d'une pression sur l'eau importante. La carte 3 permet de visualiser les zones de différents niveaux de pression sur la ressource.

L'Etat du Guanajuato, l'un des plus peuplés et des plus actifs du Mexique connaît une pression sur l'eau considérable

1 – Inventaire des ressources hydrauliques au niveau de la zone d'étude

Si l'eau superficielle a été la première ressource utilisée par l'agriculture irriguée, et celle autour de laquelle se sont développées les institutions de gestion de l'eau et basés les principaux découpages administratifs, il est dorénavant impossible de faire abstraction de l'importance de l'eau souterraine dans l'utilisation agricole.

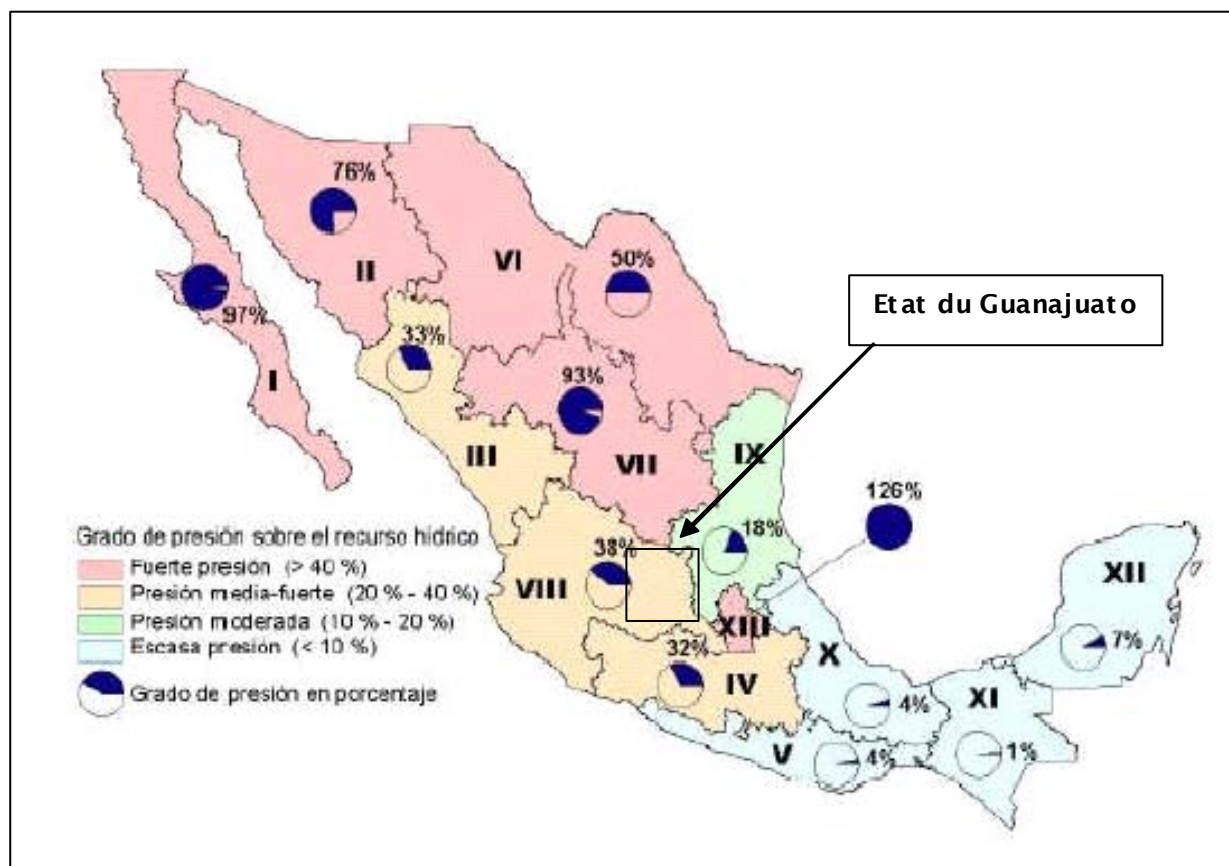
L'extraction d'eau souterraine s'est en effet fortement développée en réaction à la demande croissante en eau superficielle et aux conflits entre usagers autour de la ressource. Dès 1930, les agriculteurs du Bajío Guanajuatense y ont recours. (Gillet & Ollivier, 2002).

Ce chapitre développe l'utilisation de l'eau souterraine dans l'agriculture irriguée du Bajío.

A – Ressources en eau de la région « Lerma-Santiago-Pacífico »

L'Etat du Guanajuato appartient presque entièrement à la région hydrologico-administrative VIII, dénommée « Lerma Santiago Pacífico » (classification CNA, Cf. carte 3). Elle est classée région à pression sur l'eau moyenne à forte, avec un gradient de pression de 38%. (La CNA appelle gradient de pression sur la ressource hydrique le rapport entre l'extraction et les disponibilités hydriques annuelles). Sur les 72,5 km³ d'eau extraite chaque année depuis les réserves d'eau profonde et superficielle au niveau national, la région VIII en consomme presque 14 km³ soit 20 %, loin devant les 12 autres régions.

Carte 3 : Niveau de pression sur les ressources hydrauliques sur le territoire national



En ce qui concerne la ressource en eaux souterraines, cette région compte 127 aquifères, dont 24 sont soumis à une surexploitation (CNA, 2003). (NB : La CNA déclare un aquifère soumis à surexploitation dès que le volume extrait chaque année dépasse de 10% la recharge annuelle.) Quatre fleuves fournissent des eaux de surface. Le Rio Lerma est de loin le plus important en terme de débit, d'étendue du bassin hydraulique et de longueur. Cinq états, dont celui du Guanajuato, se partagent l'eau du Rio Lerma.

Le Rio Lerma doit approvisionner en eau domestique l'immense ville de Guadalajara, 9 districts d'irrigation, les nombreuses industries du couloir industriel Celaya – León de l'Etat du Guanajuato et enfin le Lac Chapala. On comprend donc aisément qu'une forte compétition se soit développée autour de cette ressource et engendre de nombreux conflits.

Un accord signé en 1989 entre les 5 états du bassin hydraulique tente de réglementer la répartition de l'eau du fleuve entre les divers usagers, avec l'objectif prioritaire de préserver l'écosystème fragilisé du lac Chapala, et donc maintenir son niveau d'eau. Cette priorité se donne au détriment de l'activité agricole et les agriculteurs ne peuvent pas toujours réaliser le cycle de culture OI faute d'alimentation des canaux d'irrigation.

B – Approvisionnement en eau des municipios de Valle et de Huanimaro

Les différents types de périmètres irrigués

La zone irriguée du Bajío compte deux sources d'approvisionnement en eau : on trouve d'une part un grand périmètre irrigué alimenté par un réseau de barrages utilisant les eaux du Rio Lerma, et d'autre part un nombre important de petits périmètres irrigués utilisant les eaux souterraines (Jourdain, 2002).

Parmi ces petits périmètres irrigués, certains sont gérés collectivement par des groupes d'agriculteurs associés autour d'une structure commune d'extraction de l'eau. Ce type de périmètre irrigué est couramment désigné sous le terme de « puits collectifs ». D'autres puits sont la propriété de producteurs individuels. Une estimation rapide montre que 60% des puits profonds de la région sont des puits collectifs, (Benoit-Cattin, 2002).

Les *municipios* de Valle et de Huanimaro où se situe notre zone d'étude utilisent, comme beaucoup de zones du Bajío, à la fois l'eau de surface et l'eau souterraine pour l'irrigation.

Zones irriguées : découpage et nomenclature

L'entité de découpage territorial des grands périmètres irrigués par eau de surface est le « district d'irrigation ». Depuis le transfert de la gestion de l'eau dans le début des années 90 (Cf. Partie I, II-B) la gestion des districts a été transmise aux usagers organisés en associations, qui gèrent chacune une part du périmètre ou « module ».

Le plus important district d'irrigation du Bajío est le district de « l'Alto Rio Lerma », ou district 011, qui englobe 112 770 ha et approvisionne 24 000 usagers. Il existe 11 associations d'usagers dans le district 011, qui gèrent chacune une partie du périmètre, des modules, d'environ 10 000 ha.

Toutes les zones du district 011 n'ont cependant pas accès à l'eau du Rio Lerma : les parties en altitude ou celles trop excentrées en sont souvent exclues pour des raisons techniques de transport de l'eau. On distingue donc à l'intérieur du district 011 des zones hors module et des zones intra module.

Pour pouvoir mettre en place des cultures d'irrigation dans les zones hors module, les agriculteurs ont cherché à utiliser la ressource alternative que représentent les eaux souterraines, créant ainsi des petits périmètres irrigués par des puits à l'intérieur du grand périmètre irrigué par les eaux du Rio Lerma.

Historique de l'approvisionnement en eau des *municipios* de Valle et de Huanimaro

Les puits que nous avons sélectionnés pour l'étude se situent dans le périmètre du district 011, dans les *municipios* de Valle de Santiago et de Huanimaro.

Le module de Valle de Santiago correspond à un périmètre irrigué très ancien, utilisé dès le 16^e siècle et caractérisé par une longue tradition d'irrigation (Gillet & Ollivier, 2002). Le puits n°17 de Los Lobos se situe en limite de module, dans un *ejido*⁴ qui n'a pas accès à l'eau de surface.

⁴ « L'*ejido* » est une forme de propriété foncière communautaire dont le statut date de la constitution de 1917. On nomme un agriculteur d'*ejido* un « *ejidatario* ».

Le module de Huanimaro en revanche est un module plus récent puisque le premier cycle d'irrigation n'a eu lieu qu'en 1954. C'est aujourd'hui un module pilote au niveau du district, utilisé actuellement comme test pour le mode de facturation de l'eau volumétrique.

2 – Compétition pour l'eau superficielle et extraction massive des eaux souterraines dans l'état du Guanajuato

A – Historique de l'exploitation des eaux souterraines dans le Guanajuato

Dans l'Etat du Guanajuato, très tôt, des conflits sont apparus entre les divers usagers pour l'utilisation des eaux de surface, nécessitant la mise en place de restrictions et de réglementations complexes (Cf. Chap II, I-A). Dès 1930, les agriculteurs choisissent de se tourner vers l'exploitation des aquifères, dont l'eau profonde, totalement libre d'accès n'était soumise à aucune réglementation. L'Etat encourage longtemps ces actions, notamment au travers d'un programme d'aide gouvernementale au forage, qui débute dans les années 60. On passe de 1100 puits en 1960 à 13 000 en 1975.

Dès 1940, les premiers signes de surexploitation des aquifères apparaissent, (Sanchez, cité par Gillet & Ollivier, 2002).

Aujourd'hui, le Guanajuato est l'état de la république mexicaine qui détient la plus grande quantité de puits d'extraction d'eau profonde : officiellement 16 500 dénombrés par la CNA en 1995, sans doute plus de 18 000 aujourd'hui. L'eau profonde extraite est destinée à l'activité agricole, industrielle et à l'usage domestique dans les grands centres urbains, mais l'activité agricole reste cependant de la plus grande consommatrice puisqu'elle en emploie 82 %, pour l'irrigation d'environ 33 différentes cultures en dehors de la saison des pluies. (CEAR, 2001). 11 % de l'eau souterraine extraite est à destination urbaine et les 7 % restant à destination industrielle.

B – Surexploitation des aquifères dès la première moitié du XX^e siècle

Signes de surexploitation des eaux souterraines

La surexploitation des eaux souterraines de l'Etat du Guanajuato est notable depuis une cinquantaine d'années, mais elle a subi une nette accentuation depuis les années 80. L'abaissement des nappes phréatiques en est un des signes les plus évidents : des nappes à l'origine proches de la surface se trouvent actuellement à des profondeurs de 100 ou 200 m. (Castellanos et al., 2002). La baisse annuelle est chiffrée assez diversement selon les spécialistes, mais elle se s'évalue actuellement à entre 1m et 7m par an selon la localisation.

Lors du XI^e Congrès National d'Irrigation, tenu en septembre 2001, le CEAR (Centre d'Education et d'Assistance à l'Irrigation) faisait les constatations suivantes pour l'Etat du Guanajuato :

« L'activité agricole intensive engendre des effets néfastes, notamment sur les ressources naturelles eau et sol :

- les 82% de l'eau extraite (2 300 km³/an) sont utilisés en agriculture avec des efficacités de 40%, ce qui signifie en moyenne 60 % de perte.
- surexploitation des aquifères : le déficit au niveau de l'Etat s'élève à 916 km³/an
- l'usage inapproprié d'intrants chimiques avec l'eau d'irrigation provoque la salinisation du sol et contamine les aquifères. »

Au niveau plus précis du périmètre du district 011, la CNA relève que des 3 aquifères exploités, les 3 sont soumis à surexploitation, avec un déficit annuel moyen de 117 km³. Pour les besoins de ce même

district, 880 km³ d'eau superficielle sont extraits chaque année du Rio Lerma. Aux problèmes de surexploitation de la ressource s'ajoutent également des inquiétudes quant à la qualité de l'eau.

C – Pollution des eaux de surface et menaces sur les eaux souterraines

Pollution des eaux de surface

L'eau de surface utilisée dans les périmètres irrigués du Guanajuato est jugée impropre à l'irrigation des cultures maraîchères lorsque la production est à destination du marché international. Les pollutions sont d'origines multiples : domestique, industrielle... et la qualité est souvent médiocre.

L'accès à l'eau souterraine est donc impératif pour réaliser des cultures d'exportation. Pour prévenir tout dérapage, les entreprises d'exportation horticole n'envisagent aucun contrat avec une exploitation ayant un double accès à l'eau de surface et l'eau souterraine.

Signes de pollution des eaux souterraines

Plusieurs études ont mis en évidence des signes inquiétants concernant également la qualité des eaux profondes du Guanajuato. Des analyses des eaux souterraines de l'Etat du Guanajuato réalisées de 1982 à 1998 par le laboratoire des sols de l'INIFAP, ont montré une augmentation significative des concentrations de sels solubles, sodium, bicarbonates... ainsi que du pH.

Les concentrations les plus élevées de sodium se trouvent dans les eaux extraites dans la zone sud-est de l'état, où s'observent simultanément des problèmes de nutrition sur les cultures, sorgho en particulier. Il se pourrait, d'après les spécialistes, que la fertilité des sols soit sérieusement menacée dans un avenir proche.

L'exploitation démesurée des aquifères a sans doute un lien avec ces concentrations anormales, bien que cela n'ait pas encore été définitivement démontré. (Castellanos et al., 2002)

Conclusion

Notre zone d'étude est une zone de contraste : le milieu agricole est partagé entre un potentiel agronomique considérable et les lourdes difficultés économiques, sociales et écologiques nées à la fois d'une gestion insuffisante des ressources naturelles, de changements politiques majeurs et des orientations commerciales récentes du pays.

La surexploitation de la ressource en eau souterraine est un des signes du dysfonctionnement de l'agriculture mexicaine dans le Guanajuato. L'amélioration de la gestion de l'eau en agriculture représente un axe de recherche sensible pour un développement plus durable de la zone.

Dans cet objectif global, notre étude s'est basée sur des périmètres irrigués collectifs utilisant l'eau souterraine comme ressource d'irrigation. Le chapitre suivant a pour but de retracer la démarche de travail et la méthodologie que nous avons appliquées pour analyser le fonctionnement de ces systèmes irrigués particuliers.

III – Méthodologie et organisation du travail

Notre travail s'est composé de plusieurs phases de terrain (environ 8 mois recouvrant la majeure partie du cycle OI) et de phases consacrées à la modélisation et à l'analyse, qui se sont déroulées en France, en collaboration avec G. Flichman, (IAM de Montpellier) et D. Jourdain, (CIRAD Montpellier).

Ces phases de travail sont intrinsèquement liées les unes aux autres, mais dans un but de simplification, nous en avons identifié 5. L'ordre présenté ci-dessous correspond approximativement au déroulement chronologique réel du travail.

Tab 4 - Déroulement en 5 phases de travail

Terrain 1 ^{ère} Phase	Exploration de la zone d'étude Appréhension générale du fonctionnement des puits collectifs dans la zone d'étude : 12 puits enquêtés en sept – oct 2003 puis 40 en janvier 2004 Sélection des 3 puits collectifs d'étude 1 ^{ères} séries d'enquêtes dans les 3 puits et suivi des irrigations de semis Diagnostic technique des systèmes de pompage (avec le CEAR*)
Modélisation	Choix, définition du modèle Construction d'un modèle individuel de base Calibrage du modèle : identification des lacunes ou erreurs
Terrain 2 ^{nde} Phase	Suivi des irrigations, suite Complément des données manquantes apparues lors du travail de calibrage Dernières séries d'enquêtes et entrevues avec personnes sources
Modélisation	Achèvement de la construction des modèles individuels Construction d'une typologie sur les 3 puits d'étude Agrégation en «modèle-type » puis construction du modèle collectif
Analyse	Validation du modèle collectif Construction de scénarios de simulation sur le fonctionnement collectif Analyse et critique des résultats.

Certaines de ces étapes sont détaillées dans les paragraphes qui suivent.

1 – Travail de terrain, étude du fonctionnement des puits collectifs

A – Prospection et sélection de 3 puits d'étude

L'objectif de la 1^{ère} phase de terrain était de sélectionner les 3 puits collectifs allant servir de base au travail de modélisation. La zone de prospection devant être comprise dans le territoire d'étude du projet ASOSID (Cf. Chap I, 1-B) en premier lieu, une douzaine de puits a donc été enquêtée dans les communes de Penjamo, Huanimaro et Valle de Santiago.

Trois puits ont finalement été sélectionnés sur des critères :

- de taille : nombre de membres,
- géographiques, selon les zones d'intérêt pour le projet ASOSID,
- organisationnels : mode de facturation de l'eau, organisation du tour d'eau,
- agronomiques : gamme de culture large ou limitée, présence de cultures horticoles

Il s'agit des puits collectifs suivants :

- ❑ le puits collectif de la Lobera, proche de la ville de Huanimaro, (que nous avons par conséquent nommé puits de Huanimaro),
- ❑ le puits collectif de San Juan Grande, *municipio* de Huanimaro,
- ❑ le puits collectif n° 17 de Los Lobos, *municipio* de Valle.

Cette sélection s'est opérée de manière à présenter une variabilité maximale sur des critères de taille et de type de fonctionnement collectif. Cependant, étant donné la taille de l'échantillon, nous ne nous sommes pas attardés sur des questions de représentativité vis-à-vis des puits de la zone. Les puits sélectionnés sont présentés chapitre V.

B – Appréhension de la diversité de fonctionnement des puits collectifs du Bajío

Un travail sur une quarantaine de puits collectifs du Bajío a également été mené postérieurement à la sélection des puits d'étude. Ce travail, réalisé en collaboration avec D. Jourdain, CIRAD, comprenait une prospection plus large et plus systématique que celle effectuée pour la sélection des 3 puits de modélisation. Le but de cette étude était de dresser un bilan complet des différents types de fonctionnements technique et social des puits collectifs, et des stratégies individuelles qui s'y intègrent. (NB : Pour des raisons d'emploi du temps, cette phase de travail n'a pas pu précéder la sélection des puits d'étude).

Ces enquêtes ont permis de :

- resituer dans un contexte régional les caractéristiques observées dans les 3 puits d'étude,
- compléter éventuellement par extrapolation certaines données manquantes,
- également par la suite alimenter les scénarios de simulations.

C – Collecte de données sur les puits d'étude : méthodologie et sources d'information

Dans les puits d'étude, Los Lobos, San Juan et Huanimaro, nous avons procédé à des enquêtes auprès du représentant du puits ainsi que les agriculteurs membres. Un contact régulier a été établi avec environ les $\frac{3}{4}$ des agriculteurs membres de chaque puits, permettant un suivi régulier tout au long du cycle OI des opérations culturales, notamment des irrigations. Les données ont été collectées lors d'un travail d'enquête mais surtout régulièrement tout au long de la période de travail. Pour cette raison, nous ne faisons pas apparaître dans ce mémoire de questionnaires ni de résultats d'enquêtes.

Les différentes personnes-ressources et organismes auxquels nous avons fait appel sont les suivants :

- (1) Techniciens ASOSID : Ingénieurs agricoles employés par le projet ASOSID.
- (2) CEAR : Centre d'Etude et d'Assistance pour l'Irrigation. Organisme public chargé notamment des diagnostics techniques des équipements de pompage
- (3) Mar Bran : Entreprise mexicaine d'exportation agricole (brocoli, cornichon)
- (4) INIFAP : Institut National de Recherche Agronomique et Forestière
- (5) Districts d'Irrigation : Organisation chargée de la gestion des eaux de surface (Cf. Chap II, I-A)

Réunion des données exogènes nécessaires au fonctionnement du modèle

Le modèle fonctionne à partir de données exogènes, obtenues préalablement lors des phases de terrain : enquêtes auprès des agriculteurs, bibliographie, suivi terrain.... Elles appartiennent à des domaines divers : agronomie, économie, sociologie, hydro-géologie, et pédologie et ont été obtenues au cours des phases de terrain.

Le tableau 4 présente succinctement le type de données dont nous avons eu besoin pour alimenter le modèle et les sources d'information utilisées.

Remarque : La détermination des besoins hydriques, ou besoins en eau mensuels des cultures (BE) s'est révélée complexe, étant donné la variabilité de disponibilité des informations selon les cultures. La manière dont nous avons procédé est détaillée en annexe (Cf. Annexe 1).

Nous admettons que les approximations réalisées peuvent avoir été source d'inexactitudes au niveau de la détermination des BE. Cependant, le principal objectif était d'obtenir un ordre de

grandeur des consommations en eau, et des consommations relatives de chaque culture, et dans cet objectif, le niveau de précision nous semble être resté à un niveau admissible.

Le travail de terrain, s'il a précédé naturellement celui de modélisation, s'est poursuivi également tout au long du cycle OI. L'échelonnement des irrigations de novembre à mai, ainsi que les multiples questions nées au cours du travail de modélisation ont nécessité une alimentation continue d'informations de « terrain ». L'interaction de ces deux phases de travail a permis une bonne compréhension du système à modéliser.

La phase de calibrage notamment (cf. paragraphe suivant) a permis de déceler des imprécisions et des lacunes dans notre compréhension de la stratégie des agriculteurs. Une seconde série d'enquêtes, mieux ciblées, a alors permis de compléter les informations et d'éclaircir de nombreux points. On peut citer par exemple l'existence d'une prime (le PROCAMPO) versée par l'Etat sur les céréales dont l'existence nous avait « échappé » lors des premières enquêtes.

2 – Travail de modélisation et d'analyse

A – Caractéristiques du modèle choisi

Le modèle construit est un modèle micro-économique d'optimisation sous contrainte. Il repose sur les hypothèses classiques retenues en modélisation micro-économique (Morardet, 2001). Nous considérons que l'agriculteur cherche à maximiser un revenu agricole tout en limitant la prise de risque. Le modèle tient compte de l'incertitude pesant sur certaines productions et ressources.

- Langage : le langage utilisé est le langage de programmation mathématique GAMS (*General Algebraic Modeling System*).
- Modèle statique : l'optimisation concernera une période de décision unique, relativement courte (7 mois), correspondant au cycle sec d'automne-hiver (OI) et à l'agriculture irriguée. En effet, à l'exception de la luzerne, culture de faible importance économique dans notre étude, les systèmes étudiés ne comportent pas d'éléments dynamiques. Nous ne traitons ni de cultures pérennes, ni d'élevage, et ne prenons pas en compte des investissements ou crédits à long terme.
- Traitement du risque : nous avons choisi de traiter le risque dans la fonction-objectif : l'optimisation consistera donc à maximiser l'espérance de gain moyen, tout en minimisant la variabilité du gain. Nous avons également opté pour une formulation non linéaire du risque, avec l'écart-type comme indicateur de variabilité du gain. La fonction à maximiser s'écrira donc ainsi :

$$Z = E(R) - a \cdot \sigma(R) \quad \text{avec : } \begin{array}{l} - R, \text{ revenu d'un état de nature particulier} \\ - E(R), \text{ espérance du revenu} \\ - \sigma(R), \text{ écart-type des revenus} \\ - a \text{ coefficient d'aversion au risque} \end{array}$$

« a » représente l'aversion de l'agent économique pour la prise de risque.

Dans notre cas, on peut considérer pour simplifier que le coefficient a exprime l'importance relative de deux objectifs pour un agent économique donné : la maximisation de son revenu moyen par rapport à la minimisation de la variabilité de son revenu. Un individu peu averse au risque privilégiera le premier objectif par rapport au second, et inversement pour un individu très averse au risque.

Tab. 5 - Récapitulatif des données réunies et des sources d'information correspondantes.

Description situation actuelle de chaque exploitation	Cultures implantées les années passées et prévisions pour le cycle OI 2003. Explications et justification de ces choix culturaux.	Enquêtes individuelles agriculteurs + techniciens ASOSID (1)
	Calendrier d'irrigation habituellement pratiqué sur chaque culture (dates et lames d'eau).	
	Itinéraires techniques de chaque culture. Rendements moyens	
	Situation familiale. Activités ou sources de revenu extérieures	
	Appréciation personnelle du fonctionnement du puits	
Fonctionnement Organisation du Puits	Règles d'organisation explicites : Système de paiement, séquence du tour d'eau...	Représentant du puits
	Règles d'organisation implicites : accord pour cultures horticoles, implémentation pratique du tour d'eau...	
	Infrastructures du puits : description, état du réseau hydraulique	
	Dynamisme, harmonie du groupe, facilité à obtenir des accords...	
	Plan des surfaces attachées au puits	
Fonctionnement technique du système de pompage	Débit	CEAR (2) + techniciens ASOSID
	Diagnostic technique du système de pompage : Efficience électromécanique, rendement de la pompe	
	Coût d'extraction du m ³ d'eau	
Données Pédologiques	Types de sol, caractéristiques agronomiques.	CEAR + biblio.
	Niveau du planage des parcelles. Pente moyenne.	
Données économiques	Coûts de production et marge brute moyenne.	Biblio. + Mar Bran (3) + techniciens ASOSID
	Gamme de variation des prix des 5 dernières années Prix moyen espéré pour chaque culture	
	Gamme de variation des rendements des 5 dernières années	
irrigation 2003	Calendriers d'irrigation effectivement appliqués en OI 2003 par chaque agriculteur : date, durée de l'irrigation, débit utilisé.	Observations terrain
maraichage	Conditions précises des contrats de production avec les exploitations agricoles. Critères de sélection des exploitations	Mar Bran
besoins hydriques	Valeur des ETP régionales Courbes de réponse à l'eau de chaque culture : conséquences d'un retard d'irrigation	INIFAP (4) DR011 & 085 (5) BIBLIO

B – Construction des modèles

Un modèle de programmation linéaire, agrégé à l'échelle du périmètre irrigué (surface irriguée par le puits collectif) a été construit pour 2 des 3 puits d'étude. En effet, seuls les puits de Los Lobos et de San

Juan ont été modélisés car ils présentent des caractéristiques collectives différentes très marquées. Le cas de Huanimaro nous a paru moins intéressant en ce qui concerne la modélisation, car son type d'organisation collective est intermédiaire. Le travail de construction des modèles individuels et de calibrage, ainsi que les phases suivantes de modélisation ont été réalisées avec l'aide de G. Flichman, de l'IAM et de D. Jourdain, CIRAD.

La 1^{ère} phase du travail de modélisation a eu pour but de créer un modèle individuel de base correspondant à une exploitation agricole de chacun des puits d'étude. La construction de ce modèle est détaillée dans la partie 2, I, 2.

Le calibrage est l'étape qui permet de valider le modèle. Elle est préliminaire à toute utilisation du modèle. Le calibrage a consisté à faire varier, dans le modèle individuel de base, la valeur de certains paramètres clefs : trésorerie en début de cycle OI, main-d'œuvre familiale, accès au crédit, aversion au risque (Cf. Partie I, III, 2-A), et de vérifier que l'on retrouvait bien la gamme des exploitations rencontrées sur le terrain. Ce travail a permis de mettre en évidence certaines lacunes dans nos données ainsi que des éléments manquants dans la compréhension des choix stratégiques des agriculteurs. Ce travail a eu pour objectif de compléter les lacunes mises à jours lors du calibrage et de permettre le suivi des dernières irrigations.

Le travail d'agrégation et de construction du modèle collectif est décrit par étapes (Cf. partie 2, II G). Nous avons, à partir du modèle individuel de base et de la typologie du groupe, construit des « modèles-types », qui sont des modèles agrégés par type d'agriculteurs. Ces modèles-types ont ensuite été regroupés dans un même modèle, le modèle collectif, afin de représenter l'ensemble du périmètre irrigué.

C – Scénarios et simulations

C'est la validation de tout le travail en amont. Nous avons choisi de développer deux exemples de scénarios réalisés à partir de simulations sur le modèle collectif. L'intérêt principal du modèle étant la représentation de règles collectives de gestion de l'eau, les simulations ont eu pour axe central les aspects sociaux du fonctionnement des puits collectifs.

A ce niveau, il nous a semblé plus simple et plus digeste aux yeux d'un lecteur, de ne présenter les résultats que d'un seul modèle, ce qui permet de conserver toujours le même élément de comparaison. Le modèle choisi pour présenter des exemples de simulation est celui de Los Lobos.

IV- Recensement des règles d'organisation et des fonctionnements collectifs dans les puits du Bajío

Au cours du travail de terrain réalisé avec D. Jourdain, une quarantaine de puits a été visitée, répartie dans quatre zones géographiques du Bajío Guanajuatense : Valle de Santiago, Huanimaro, Penjamo (Ouest) et Quiriceo. Dans chaque puits, des enquêtes ont été menées à deux niveaux :

- au niveau « puits » : si possible auprès du représentant du puits,
- au niveau individuel : quelques sociétaires (1 à 3 selon la taille du groupe) de chaque puits ont été enquêtés sur leur système de production : pratiques d'irrigation, situation familiale et financière et stratégie individuelle de production.

Ces enquêtes réalisées ont permis de rassembler une masse importante d'information sur le fonctionnement des puits et sur les liens entre règles collectives et stratégies individuelles. Les données ont été analysées et traitées par D. Jourdain, CIRAD. 36 des 40 puits enquêtés ont été retenus pour l'analyse. Les 4 autres enquêtes n'ont pas été jugées suffisamment bien informées.

Ne sont présentées dans ce présent chapitre que les informations susceptibles d'intéresser directement notre travail de modélisation.

Nous rappelons que les informations obtenues ont en effet permis de :

- resituer dans un contexte régional les caractéristiques observées dans les 3 puits d'étude,
- compléter éventuellement par extrapolation certaines données manquantes,
- également par la suite alimenter les scénarios de simulations.

Le chapitre qui suit a donc pour objectif de présenter les grandes caractéristiques des périmètres irrigués collectifs de notre zone d'étude ainsi que leur mode fonctionnement. Nous étudierons les principales règles établies au sein des groupes d'agriculteurs leur permettant de gérer collectivement la ressource commune (eau) et le système collectif d'extraction de l'eau (puits collectif).

1 – Description et caractéristiques des périmètres irrigués étudiés

A – Des pratiques d'irrigation peu économes en eau

L'irrigation pratiquée par la majorité des *ejidatarios* du Bajío est l'irrigation à la raie : il s'agit d'une inondation partielle de la parcelle, l'eau étant conduite dans des raies préalablement tracées sur la surface du sol. Cette technique a, au moins localement, la réputation d'être source de gaspillages en eau importants et il est vrai que les lames d'eau moyennes appliquées par hectare dans le Bajío sont considérables. Cependant, il est probable que, davantage que la technique en elle-même, ce soit la manière dont elle est mise en pratique par les agriculteurs du Bajío qui soit à mettre en cause (Benoit-Cattin et al., 2002)

L'irrigation à la raie a par ailleurs l'avantage de ne nécessiter qu'un très faible investissement en capital. Les *ejidatarios* n'ont généralement pas les moyens de s'équiper pour des systèmes d'irrigation considérés comme plus économes en eau tels que les systèmes d'aspersion ou de goutte à goutte.

Acheminement de l'eau et pratique de l'irrigation à la raie dans le Bajío

Pour une majorité des périmètres irrigués, l'eau est acheminée par un réseau souterrain de tubes depuis le puits jusqu'à des sorties réparties sur la surface du périmètre. Pour l'acheminement jusqu'à la parcelle et dans la parcelle, les agriculteurs utilisent les fossés de terre bordant la parcelle, des canaux en ciment ou encore des tubes en PVC.

Les tubes PVC font souvent partie du matériel collectif du groupe, ce qui implique de transporter les tubes d'une parcelle à l'autre pendant les irrigations. Faute de temps, car les irrigations s'enchaînent rapidement, de moyens de transport adaptés et également faute d'une réelle motivation, beaucoup d'agriculteurs ont renoncé à l'utilisation de ces tubes et préfèrent faire passer l'eau dans les fossés bordant la parcelle, bien que cela occasionne des pertes par infiltration.

Une fois l'eau acheminée à la parcelle, elle est dirigée vers les raies d'irrigation et traverse la parcelle de part en part en humidifiant le sol. Les agriculteurs adaptent tant que possible le nombre de raies ouvertes au débit entrant, afin que la vitesse d'avancée de l'eau permette une humidification optimale du sol. Une humidification insuffisante entraîne des stress hydriques, mais le contraire est dommageable aux plantes, surtout aux semences qui ont un taux de germination plus faible lorsqu'elles subissent un excès d'eau.

L'irrigation est considérée terminée lorsque l'eau est arrivée en bout de raie pour chacune des raies. Ainsi, la décision de durée d'irrigation dépend presque uniquement des caractéristiques du sol et du relief parcellaire.

Caractéristiques parcellaires et des sols du Bajío

Les sols les plus caractéristiques de la région sont les vertisols. D'origine volcanique, ces sols noirs, « *tierra negra* », très fertiles représentent un atout considérable de l'agriculture du Bajío. Cependant, de type argileux gonflant, ils sont également sujets à la formation, pendant la saison sèche, de profondes

fentes de dessiccation. L'eau cheminant dans les raies au moment de l'irrigation s'engouffre dans ces fentes avant de poursuivre son cheminement dans la raie. Lorsque la formation de fentes de retrait est importante, il se produit des pertes d'eau considérables par percolation profonde de l'eau au cours des irrigations.

De plus, beaucoup d'agriculteurs travaillent des parcelles non planes. La présence d'irrégularités (irrégularités de pente, bombements) sur la surface à irriguer entraîne une avancée de l'eau non homogène lors de l'irrigation, et donc un taux d'humidification du sol non homogène sur la parcelle. L'eau stagne dans les parties basses, alors que les parties hautes sont souvent insuffisamment humidifiées. Afin d'humidifier correctement jusqu'aux parties hautes, l'agriculteur est contraint de sur-irriguer le reste de la parcelle. Les temps d'irrigation sont alors plus longs et les volumes d'eau consommés plus importants.

Les agriculteurs sont généralement conscients de la surconsommation en eau qu'un relief parcellaire irrégulier occasionne. Beaucoup procèdent à un planage mécanique avant semis. Cependant, cette opération n'est pas suffisante. L'Etat a lancé un programme d'aide au financement pour une opération de nivellement au laser beaucoup plus efficace, mais malgré l'aide financière, trop peu d'agriculteurs y ont accès.

Une irrigation généralement peu efficiente et coûteuse en eau

L'accumulation de caractéristiques défavorables : parcelles non planes, formation de fentes de dessiccation, pertes d'eau au long de l'acheminement..., ainsi que parfois un certain laxisme dans la supervision du déroulement de l'irrigation, convergent pour faire de l'irrigation à la raie dans le Bajío une irrigation peu efficiente, très coûteuse en eau.

Les consommations d'eau à l'hectare sont par conséquent très importantes. La hauteur moyenne de lame d'eau actuellement en pratique pour une irrigation sur céréale dans cette zone est de 250 mm (Jourdain 2002). Le cycle du blé nécessitant 4 à 5 irrigations, les lames totales appliquées pendant le cycle d'irrigation sur blé atteignent donc fréquemment 1250 mm.

Ces chiffres cachent cependant une grande diversité de pratiques. Certains agriculteurs, en modifiant leurs pratiques, réussissent à réduire fortement les lames d'eau par rapport à cette moyenne (cf. partie I, IV, 2-C).

B – Dimensions du périmètre irrigué : Surface théorique / Surface réellement irriguée

Dans l'échantillon de puits visités, les puits collectifs comptent en moyenne une dizaine de membres, avec une majorité de groupes comprenant de 4 à 15 membres et la superficie théorique irrigable (STH) est de 42 hectares en moyenne. Il s'agit d'une superficie officielle : lors de l'attribution de la concession, la CNA (*Comision Nacional del Agua*) attribue au puits une surface irrigable officielle en fonction du débit présumé du nouveau forage, selon la règle de : 1 hectare par $l.s^{-1}$.

Dans la réalité, la superficie réellement irriguée peut être plus importante, notamment pendant le cycle PV (printemps – été) qui correspond à la période des pluies et donc à une pression moindre sur l'eau d'irrigation (généralement une unique irrigation suffit en début de cycle). En revanche, durant le cycle OI (automne - hiver), la superficie réellement irriguée est parfois plus faible que celle attribuée par la CNA, les agriculteurs s'adaptant aux possibilités du puits. Au final, la superficie réellement irriguée ne dépasse qu'exceptionnellement les 50 hectares.

C – Débit du puits

Le débit des puits est en moyenne de $32 l.s^{-1}$. Les agriculteurs sont peu nombreux à connaître le débit actuel exact de leur puits. En revanche, il est fréquemment fait mention d'une baisse par rapport au débit initial. Ceci peut s'expliquer à la fois par la baisse continue des nappes phréatiques et par l'usure des équipements de pompage. Si on se fie à la valeur moyenne de la STH et à la règle d'attribution de la

CNA, les débits moyens initiaux devaient être autour de 40 l.s⁻¹ ce qui signifie une baisse moyenne de 10 à 20%.

D – Surface cultivée par agriculteur

La superficie moyenne par agriculteur, sur l'ensemble des puits étudiés, est relativement faible, avec une moyenne de 4,3 hectares. Cette valeur varie peu d'un puits à l'autre, la majorité des groupes oscillant entre 3 et 7 ha en moyenne par membre.

En revanche, la variation se révèle être beaucoup plus forte intra puits. On considère, dans un puits donné, le ratio entre la surface individuelle la plus grande et la plus petite. Pour la grande majorité des groupes, ce coefficient de variation est compris entre 0,3 et 0,6, ce qui révèle effectivement une disparité dans la répartition des terres.

E – Cultures implantées durant le cycle d'hiver 2002/2003

Répartition par surface

Sur l'ensemble des puits enquêtés, 80% des surfaces semées le sont en céréales (blé et orge) qui restent l'activité principale des cycles d'hiver. Les cultures horticoles et les fourrages (essentiellement la luzerne) occupent environ chacun 10% des superficies. Quelques cas particuliers remettent en cause la prépondérance des céréales dans l'assolement.

Dans 75% des puits, les agriculteurs ne sèment pas ou des surfaces très faibles, de luzerne, (moins de 5% de la surface cultivée). Quelques ares par agriculteur suffisent à maintenir quelques animaux sur la ferme. Dans 3 des puits enquêtés cependant, les superficies en fourrage dépassent 30% de la superficie emblavée. Dans ces cas précis, cette production importante de fourrage était destinée à des acheteurs venus d'états mexicains traditionnellement tournés vers l'élevage.

On constate les mêmes répartitions pour les cultures horticoles. Une grande majorité des puits ne sème quasiment pas de cultures horticoles (moins de 5% de la sole). Mais on constate que dans une dizaine de puits, la tendance est inversée et les cultures horticoles occupent une place importante, 5 à 30% de la surface.

Caractéristiques agro-économiques des différentes cultures du cycle OI

L'étude des différentes répartitions de l'assolement prend davantage de signification lorsqu'on connaît les problématiques économiques de chaque type de cultures : céréales, fourrage et maraîchage correspondent en effet à des activités dont les différences vont bien au-delà des simples pratiques culturelles.

Les céréales sont les cultures traditionnelles du cycle d'hiver. Elles sont bien adaptées aux températures basses du début de l'hiver et ne nécessitent au total qu'une douzaine de jours de travail pendant le cycle. Elles deviennent pourtant de moins en moins rentables notamment depuis l'application des accords du ALENA en 1994 et l'alignement sur les prix mondiaux (Cf. chap I, III-A)

Par opposition les cultures horticoles, apparues dans la région au début des années 80, réalisent des marges moyennes nettement plus importantes. Le marché est en revanche parfaitement imprévisible d'une année sur l'autre, voire d'une semaine à l'autre pendant le cycle. Ce sont donc des cultures à haute valeur ajoutée et à haut niveau de risque. La problématique céréales / cultures horticoles est développée dans le tableau 5 ci-après.

Cas particulier des cultures sous contrat

Les cultures sous contrat ne sont pas accessibles à tous les agriculteurs. Les producteurs de cultures horticoles sous contrat sont sélectionnés selon des critères stricts par les entreprises d'exportations

horticoles. Les critères utilisés sont notamment des critères de disponibilité en eau, afin d'écarter les puits à débit faible ou irrégulier, ou au système de pompage défaillant. De plus, dans le cas de puits collectifs, les entreprises s'assurent des bonnes conditions d'entente dans le groupe qui conditionnent souvent le fonctionnement des tours d'eau. Les puits jugés « problématiques » sont écartés.

Quant à l'orge, la possibilité d'étendre les surfaces est limitée par le marché, les contrats provenant d'une unique entreprise de fabrication de bière, Impulsora (Gillet et Ollivier, 2002)

F – Historique des puits

Les puits collectifs peuvent avoir des origines différentes. Il peut s'agir d'un ancien puits officiel, initialement géré par la CNA et dont la gestion a été remise aux utilisateurs, d'un ancien puits individuel élargi à une société ou d'un puits né de l'initiative d'un groupe d'agriculteurs. L'origine de la formation du puits peut influencer sur la répartition du pouvoir entre les membres au sein du groupe, ainsi que sur l'autonomie du puits vis-à-vis du module d'irrigation et de la CNA. On remarque plus facilement certaines distorsions dans la répartition du pouvoir entre membres dans les anciens puits individuels, où le premier propriétaire garde un net ascendant sur les autres associés. Mais ce phénomène peut s'observer dans tous les puits, dès lors qu'un groupe plus puissant cherche à asseoir sa domination sur les autres. En ce qui concerne la CNA, elle conserve malgré le transfert un droit de regard sur la gestion des anciens puits officiels, d'autant plus qu'elle reste propriétaire des infrastructures. Les modules d'irrigation doivent également donner leur accord pour toute modification de superficie ou du nombre de membres. (Gillet & Ollivier, 2002)

G – Pression sur l'eau

Les puits visités présentent une grande variabilité par rapport à la pression sur l'eau, mais la tendance générale montre nettement une accentuation de la pression et de la pénurie d'eau. Le niveau de pression sur l'eau a une influence directe sur la stratégie et l'organisation du groupe. Elle détermine en grande partie le tour d'eau, c'est-à-dire l'organisation de la distribution de l'eau entre agriculteurs. Schématiquement, si la pression est faible, le tour d'eau est relativement souple, les agriculteurs pouvant disposer de l'eau à peu près librement. Si au contraire la pression est forte, l'accès à l'eau au sein du groupe devient beaucoup moins flexible. La pression sur la ressource en eau qui existe au sein du groupe d'utilisateurs est liée à 2 paramètres : le débit du puits et la surface à irriguer.

Le niveau d'usure des équipements de pompage, en partie responsable de baisses de débit, varie d'un puits à l'autre, de même que l'épuisement des nappes présente de fortes disparités locales. Selon les endroits, la nappe phréatique se situe plus ou moins loin en profondeur. Par endroits, la nappe est devenue presque inaccessible et le pompage coûteux et aléatoire. Ces puits ont alors vu le débit baisser fortement par rapport au débit initial. Dans une dizaine des 36 puits visités, les agriculteurs ont dû prendre des mesures concrètes face à la pénurie croissante en eau, le puits ne pouvant plus irriguer la totalité de la surface initiale, du moins en cycle d'hiver. Les adaptations nécessaires exigent une diminution de la surface irriguée en hiver ou bien le remplacement partiel des céréales par des cultures moins demandeuses en eau. Ces aspects relatifs à la pression sur l'eau, au tour d'eau et aux stratégies adoptées sont développés plus loin. (Cf. Chap IV, - F).

On peut obtenir une évaluation rapide de la pression sur l'eau en calculant le rapport R entre le débit du puits et la surface réellement irriguée :

Si $R \geq 1$: le puits est au moins égal au rapport de 1 l.s^{-1} fixé initialement par la CNA

Si $R < 1$: le puits est au-dessous de ce seuil, ce qui signifie que la pression sur l'eau s'est aggravée depuis l'attribution du puits.

Plus R est faible, plus la pression sur l'eau à l'intérieur du puits est importante.

Tab. 6 - Caractéristiques, avantages et inconvénient des différentes cultures du cycle OI

	Destination	Durée cycle	Caractéristiques agronomiques	Caractéristiques économiques
Blé tendre	Marché national	132* jours	4 irrigations	- Prix en baisse et marché plus instable depuis les accords d'ALENA - Possibilité de paiement rapide après récolte
Blé dur		139* jours	4 à 5 irrigations => forte consommation en eau	
Orge	Culture sous contrat avec la fabrique de bière mexicaine Impulsora	125* jours	- 3 irrigations - Cycle + court et + précoce que blé => Plus économe en eau que le blé, et permet un semis Sorgho plus précoce en PV	- Prix garantis par contrat - Prix actuels avantageux par rapport au blé - Paiement tardif après récolte
Luzerne	Autoconsommation, marché local, et quelques cas de vente à grande échelle	Culture pérenne	- Environ 1 irrigation / mois - Plante basse => maîtrise technique et des irrigations plus aisée	Si destinée à la vente, assure un revenu régulier
Brocolis, chou-fleur, cornichon ...	Cultures sous contrat Entreprises d'exportation internationales	≈ 90 jours	- Cultures exigeantes en travail et MO salariale - Assistance technique fournie par l'entreprise. - Irrigations fréquentes (7) et légères - Exigence de l'entreprise en terme de qualité sanitaire : Très forte sélection post-récolte => Risque sur le chiffre d'affaires	- Intrants fournis à crédit paiement à la récolte - Production à forte valeur ajoutée - Débouché et prix assurés par contrat.
Tomate Courge, Ail, Oignon, Fraise, Asperge ...	Cultures horticoles non contractualisées Marchés locaux ou marchés d'Irapuato, Guadalajara, Mexico	≈ 90 jours	- Maîtrise technique délicate. - Culture exigeante en travail et MO salariale - Irrigations fréquentes (7) et légères - Rendements très aléatoires => Risque sur le chiffre d'affaires	- Fortes sorties de trésorerie pour main d'œuvre et intrants - Production à très forte valeur ajoutée - Marchés extrêmement variables => Risque sur le chiffre d'affaires
Mais blanc	Autoconsommation		Forte consommation eau	
Pois chiche, haricot R.	Autoconsommation	≈ 115 jours	Faible consommation eau	

*Sources INIFAP. Moyenne de jours pour un semis entre le 1^{er} et le 31 décembre.

2 – Caractéristiques fonctionnelles et organisationnelles

A – Etablissement des règles de fonctionnement par le puits

Des règles et des conventions régulent l'utilisation de l'eau dans un groupe d'agriculteurs sociétaires d'un puits collectif. Bien que l'Etat soit propriétaire de toutes les ressources hydriques, chaque groupe d'utilisateurs réunis en puits collectif est autonome et établit son propre mode de fonctionnement. Depuis la loi de 1992, la gestion de l'eau a officiellement été remise aux associations d'utilisateurs. Dans les anciens puits officiels seulement, la CNA et les modules continuent d'exercer un certain contrôle.

D'une manière générale, les décisions quant au mode de fonctionnement collectif sont prises par le groupe lui-même, chaque membre ayant a priori le même pouvoir de décision. D'un fonctionnement très solidaire et collectif, à un fonctionnement quasi individualiste, les systèmes instaurés par les groupes d'agriculteurs changent considérablement d'un puits à l'autre et laissent un degré de liberté très variable à leurs membres.

Les groupes étant de taille relativement limitée (de l'ordre d'une dizaine de membres), l'implémentation des règles, notamment celle du tour d'eau, est organisée par les irrigants eux-mêmes, sans réel besoin d'un organisateur. En revanche, le groupe se doit d'avoir un représentant. Selon les cas, le représentant est plus ou moins dynamique et s'impliquera activement ou non dans l'organisation du groupe.

Nous nous intéresserons à 4 règles essentielles régissant le fonctionnement d'un puits collectif :

- distribution de l'eau ou Tour d'Eau,
- allocation quantitative de l'eau (ces deux dernières règles gérant l'accès à l'eau en général),
- système de paiement des frais d'extraction,
- gamme des cultures admises dans les surfaces irriguées.

Nous verrons que ces règles collectives qui conditionnent l'accès à la ressource commune, ont des influences considérables sur les comportements et les stratégies individuelles, puisqu'elles contraignent l'utilisation de l'eau du puits, par rapport à la situation d'un utilisateur seul disposant d'un puits individuel.

B – Etablissement et réglementation du Tour d'Eau

Dans un puits collectif, l'eau n'est pas disponible en permanence ni en totalité pour chacun des utilisateurs : ceux-ci doivent se passer l'eau à tour de rôle. Le débit de ces puits peut parfois permettre que 2 utilisateurs irriguent simultanément, rarement plus.

Le tour d'eau détermine quand et éventuellement combien, chacun a le droit d'irriguer et est une base fondamentale de l'organisation de chaque puits. Son enjeu est de satisfaire à temps les besoins en eau de toutes les surfaces cultivées. Selon les puits, l'organisation diffère et n'a pas la même efficacité. Le niveau de la pression sur l'eau est influent dans la mise en place du tour, mais les règles instaurées par le groupe le modèlent également. Nous listons dans le chapitre qui suit les caractéristiques et les diverses variantes concernant l'organisation du tour d'eau, que nous avons rencontrées lors des enquêtes.

Longueur du tour d'eau

La longueur du tour d'eau est une caractéristique fondamentale. Elle renseigne sur la capacité à satisfaire à temps les besoins des cultures : schématiquement, si une culture a des besoins hydriques qui reviennent à x jours d'intervalle, le tour d'eau sur l'ensemble de la surface irriguée doit durer moins de x jours, pour pouvoir revenir à temps sur chacune des parcelles.

Cette capacité dépend directement de la pression sur l'eau. Il y a pression sur l'eau lorsqu'il y a risque que le tour d'eau ne puisse pas satisfaire à temps les besoins en eau de l'ensemble des parcelles. En effet,

la contrainte temps est très stricte en matière d'irrigation car, autour de la floraison particulièrement, les retards d'irrigation peuvent causer des dommages significatifs à la récolte. Si certains membres du puits utilisent l'eau trop longtemps, l'accumulation de retard dans les irrigations peut devenir très nuisible aux cultures, particulièrement sur les dernières parcelles du tour.

Une méthode d'évaluation de la pression sur l'eau, basée sur le calcul de la longueur théorique du tour d'eau est détaillée en annexe (Cf. Annexe 2).

Incertitude sur le retard du tour d'eau

Selon le puits, et selon les années, le tour d'eau ne se déroule pas de la même façon. Dans certains puits, le tour d'eau prend systématiquement du retard en fin de cycle et pénalise les derniers du tour. Dans ce cas, une prise de décision collective ou individuelle apparaît plus ou moins rapidement pour tenter de remédier ou de s'adapter à la situation. Dans d'autres puits, la prise de retard est occasionnelle. Trois principaux facteurs aléatoires peuvent retarder le tour d'eau au cours du cycle :

- Problème matériel : lorsqu'un équipement de la pompe se casse, les réparations demandent quelques jours de délais, avec arrêt du puits.
- Le comportement des co-utilisateurs : si la confiance dans le tour d'eau est faible, certains agriculteurs adopteront une stratégie individualiste «anti-risque» qui consiste à irriguer plus longtemps que nécessaire (Cf. Chap IV, II-C). Cette méthode non seulement n'a pas prouvé être une prévention efficace contre le stress hydrique, mais amplifie certainement les problèmes de retard au niveau du groupe.
- L'année climatique : les grosses chaleurs peuvent apparaître prématurément dans le cycle. Avec la chaleur, le sol se resèche plus rapidement et profondément et la quantité d'eau à apporter à l'hectare pour le réhumidifier doit être plus importante. Les irrigations durent alors longtemps dès tôt dans le cycle, elles se décalent progressivement et le retard en fin de cycle devient significatif. Au contraire, certaines années, les chaleurs arrivent tard. Il peut également arriver que des précipitations légères d'hiver, comme cela a été le cas en janvier 2003, accordent un peu de répit au puits.

La probabilité de prise de retard est variable d'un puits à l'autre, mais entraîne intra-puits une incertitude sur la disponibilité temporelle en eau.

Règle d'organisation 1 : Séquence du tour

La séquence du tour d'eau est l'ordre dans lequel l'eau passe d'un agriculteur à l'autre. Le mode de détermination de cette séquence se décide en général initialement, à la mise en fonctionnement du puits. La situation la plus courante est de choisir de suivre l'ordre de préparation du sol : la première parcelle prête pour le semis du cycle entrant reçoit, assez logiquement, la main d'eau en premier. Les agriculteurs se basent aussi sur l'ordre de récolte du cycle précédent, ce qui est à peu près équivalent. D'autres critères utilisés pour déterminer la séquence du tour se rencontrent : hasard de la loterie, ordre de taille des parcelles, éloignement croissant ou décroissant des parcelles par rapport au puits... Dans tous ces cas, le tour d'eau est potentiellement modifiable chaque année.

La détermination de cette séquence est loin d'être une règle anodine : les dates de semis influencent fortement les rendements potentiels des céréales. Dans le cycle d'hiver, si le semis et donc l'irrigation de semis se font précocement, les productions céréalières seront plus sensibles au gel en février, mais le cycle de croissance plus long permettra des rendements plus importants. En revanche, en raison du cycle de croissance plus court, les rendements décroissent rapidement au-delà d'une date de semis du 15 janvier (D. Jourdain, 2002). De plus, la date de semis du cycle OI jouant sur la longueur du cycle, elle influera aussi sur la date de semis pour le sorgho en début de cycle PV, dont l'implantation doit se faire avant l'arrivée des pluies. Dans les puits où les membres sont nombreux, un mois peut se dérouler entre

l'irrigation de semis du 1^{er} du tour d'eau et le dernier. La date à laquelle chacun des producteurs disposera de l'eau d'irrigation est donc un enjeu important.

La place de chacun dans le tour d'eau est un paramètre important qui détermine fortement les conditions de production de chaque agriculteur.

Règle d'organisation 2 : Variabilité du tour d'eau d'une année sur l'autre

Dans la majorité des puits, le «règlement» du puits essaye d'assurer une équité des conditions de travail entre les membres, ce qui signifie que l'ordre du tour d'eau doit être modifié d'une année sur l'autre, pour que chacun bénéficie à tour de rôle des conditions d'irrigation les plus favorables. Les quelques cas de tours d'eau fixes, rencontrés dans 4 puits sur 36, nous ont paru être symptomatiques de la présence d'un sous-groupe dominant ne désirant pas remettre en cause ses avantages, (D. Jourdain).

Règle d'organisation 3 : Souplesse du tour d'eau

La séquence du tour d'eau mise en place lors de la première irrigation au début de l'hiver peut, ou non, être légèrement modifiée lors des irrigations suivantes.

On oppose ainsi les tours d'eau «rigides» aux tours d'eau «souples».

- Dans 15 des 36 puits, le tour d'eau présente une certaine souplesse. Un producteur peut changer de place au cours des tours d'eau successifs du cycle. Il peut décider, s'il a pris du retard, de passer provisoirement son tour, voire, lorsque la pression n'est pas un facteur limitant, d'arrêter le puits lorsque la main d'eau lui revient pour le rallumer au moment qu'il juge opportun.

Lorsque la pression sur l'eau est faible, la souplesse du tour est permise et les agriculteurs disposent de davantage de marge de manœuvre pour choisir le moment optimal d'irrigation.

- Dans le second cas, qui concerne 21 puits sur 36, un tour d'eau que nous qualifions de «rigide» s'est installé. Les producteurs irriguent alors au cours d'un cycle OI donné selon une séquence fixe dans laquelle les places ne sont pas interchangeables. Les délais d'attente entre deux utilisateurs doivent être minimales, au risque de devoir passer définitivement son tour. En général, le puits une fois allumé n'est plus éteint jusqu'à ce que tous les utilisateurs aient irrigué.

Ce manque de flexibilité est davantage un constat que le fait d'une mesure souhaitée par le groupe. Il représente une adaptation à une pression sur l'eau forte, qui crée un état de tension autour de la ressource en eau parmi les agriculteurs.

Tour d'eau et cultures horticoles

Selon sa souplesse, le tour d'eau est plus ou moins apte à intégrer des cultures horticoles : un tour d'eau souple peut éventuellement permettre la superposition de rythmes d'irrigation différents sur la superficie du puits et d'intégrer donc des cultures à besoins en eau décalés dans l'assolement du puits. Cela peut alors autoriser la cohabitation entre cultures céréalières et horticoles. En effet, la plupart des cultures horticoles rencontrées dans la région ont des calendriers de besoins en eau qui diffèrent sensiblement des cultures céréalières. Par exemple, le brocoli nécessitera des irrigations fréquentes (environ toutes les deux semaines) et de faible importance, alors que les céréales s'accrochent très bien d'un tour d'eau de trente jours avec des lames d'eau importantes. (Jourdain, 2002).

Quand un ou deux producteurs produisent des brocolis au sein d'un puits où prédominent les céréales, cela implique que ceux-ci insèrent des irrigations faibles et fréquentes au sein d'un tour d'eau ayant une fréquence d'une trentaine de jours. La présence de ces deux types de cultures suppose donc la coexistence de deux tours d'eau décalés pour un même puits.

C – Allocation du droit d'extraction

Parallèlement à la distribution « chronologique » de l'eau, sa répartition quantitative au sein du groupe est également significative pour l'optimisation des irrigations. Nous nous sommes intéressés au temps dont dispose un agriculteur une fois la main d'eau obtenue. (Le débit du puits étant normalement constant pendant une irrigation donnée, l'équivalence temps – volume est assurée).

Absence de règles de répartition explicites

Dans plus de 80% des puits visités, il n'existe pas de règle explicite de répartition des temps d'irrigation entre les différents membres. Une fois la main d'eau obtenue, chaque agriculteur dispose du temps nécessaire pour « mener à bien » son irrigation, selon ses propres critères. (Cf. encadré ci-dessous). La pression des autres membres est cependant censée contrôler qu'aucun d'entre eux n'excède des limites acceptables par le groupe. Cette absence de contrainte officielle évite de pénaliser ceux dont les parcelles, pour des questions de sol, relief, pente... demandent davantage d'eau et repose donc sur un principe de solidarité au sein du groupe. Cependant, quand le contrôle social effectué par le groupe est trop faible, certains producteurs pourront avoir des consommations excessives. Cette situation est facilement génératrice de conflits

Précision sur la définition d'une irrigation « bien menée » :

«Mener à bien » une irrigation n'a pas nécessairement la même signification d'un agriculteur à l'autre, et la consommation d'eau à l'ha qui en découle peut fortement varier parmi les membres d'un groupe.

Nous avons vu que les caractéristiques de la parcelle : sol, pente et surtout relief, influaient fortement sur la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une bonne humidification (partie III, I-1). La durée d'une irrigation et la consommation d'eau diffèrent déjà en fonction de caractéristiques parcellaires et pédologiques indépendamment de l'utilisateur.

Les pratiques d'irrigation choisies par l'agriculteur sont également déterminantes pour la quantité d'eau consommée. Parmi les pratiques plus économes en eau, on peut mentionner :

- l'utilisation de tubes de PVC en remplacement des fossés de terre limite les fuites par percolation,
- des contrôles réguliers en sortie de raie permettent d'éviter les pertes d'eau dans le fossé,
- l'opération de nivellement avant semis permet d'obtenir une parcelle plane donc d'homogénéiser l'avancée de l'eau dans la parcelle et de réduire les temps d'irrigation,
- le semis direct sous couverture végétale permet, du fait de la couverture pailleuse, une diminution des pertes par évaporation et par là des économies substantielles d'eau (Benoit-Cattin et al., 2002), l'équipe d'ASOSID travaille particulièrement sur cet aspect,
- la technique d'irrigation au goutte à goutte remplace chez certains agriculteurs aisés l'irrigation à la raie, mais l'investissement est trop important pour pouvoir être supporté par beaucoup d'*ejidatarios*,
- les sols de la région sont sujets à une dessiccation importante avec création de fentes de retrait pendant la saison sèche. Des irrigations courtes et fréquentes permettent en général d'irriguer sur sol moins sec où les fentes de retrait sont moins profondes et de limiter ainsi les pertes d'eau. Cette considération est à prendre en compte dans le choix de la culture à planter : les cultures maraîchères nécessitent des irrigations fréquentes mais légères, contrairement aux céréales pour lesquelles les irrigations, plus espacées, se réalisent sur un sol moins sec et sont donc potentiellement plus coûteuses en eau.

Enfin, la stratégie de chacun pèse dans la balance : certains agriculteurs, afin d'anticiper un éventuel retard du prochain tour d'eau T+1, choisissent d'appliquer des lames d'eau bien supérieures aux stricts besoins des plantes lors du tour d'eau T pour profiter au maximum de leur main d'eau. Cette stratégie «anti-risque », dont on peut d'ailleurs mettre en doute l'efficacité agronomique, a tendance à amplifier le problème de retard du tour d'eau dès que plusieurs agriculteurs la pratiquent, car elle allonge les délais de retour des irrigations, (Jourdain, 2002).

Règles de répartition explicites

Dans un petit nombre de puits de notre échantillon, l'accès à l'eau relativement libre que nous venons de décrire a été remplacé par des règles de répartition explicites plus contraignantes.

Deux cas de figures se sont présentés :

- dans le 1^{er} cas, chaque membre du groupe dispose d'un quota volumétrique (qui se traduit par un quota d'heure) pour le cycle d'irrigation, indépendamment des superficies qu'il cultive,
- dans le 2nd cas, chacun des membres dispose explicitement d'un nombre d'heures déterminé par hectares emblavés.

Dans deux de ces puits, un micro-marché des heures d'extraction s'est également installé, permettant à un producteur disposant d'un excès d'eau de céder des heures excédentaires à un autre producteur.

Nous n'avons pas visité dans le cadre de ces enquêtes de puits ayant établi directement une limite sur la superficie semée par agriculteur. Cependant ce cas de figure existe également.

Ces règles restrictives visent à limiter la consommation d'eau par membre, en quantité mais surtout en temps. En effet, une irrigation réalisée en retard, notamment pendant la période post-floraison peut nuire fortement au rendement de la culture. On remarque cependant que ces types de répartition n'apparaissent que quand une pénurie d'eau contraint fortement le groupe.

D – Systèmes de paiement des frais d'extraction

L'eau est « gratuite ». Ce que payent les utilisateurs est le coût d'extraction de l'eau, c'est-à-dire la consommation d'électricité du système de pompage. La façon dont est répartie la facture d'électricité entre les différents membres a une certaine influence sur les comportements individuels. Deux principaux systèmes s'opposent :

- Un système de paiement forfaitaire « à l'hectare ».

La facturation de chaque utilisateur se calcule en fonction de la surface qu'il irrigue. C'est le système de paiement le plus courant. On le rencontre dans 29 puits, soit 80% des puits visités. C'est le mode traditionnel de répartition des frais. Dans la pratique, la facture d'électricité mensuelle du puits est répartie entre agriculteurs proportionnellement à la surface qu'ils irriguent.

Chaque hectare irrigué est donc facturé également, quelque soit la consommation en eau qui y ait réellement été faite. La facture individuelle dépend donc de la consommation collective.

- Un système de paiement proportionnel à un indicateur de volume.

Ce type de répartition des coûts n'apparaît pas en général immédiatement à la formation du groupe. Il est actuellement en pratique dans un petit nombre de puits (7 sur 36), mais est en discussion chez plusieurs autres. Il consiste à un partage de la facture du puits proportionnellement aux consommations réelles de chaque membre : la facture d'un utilisateur ne dépend donc que de sa consommation personnelle.

Le débit étant constant au cours d'une irrigation, les groupes utilisent généralement comme indicateur de consommation le nombre d'heures pendant lesquelles chacun a occupé l'eau. On appelle couramment ce système le « paiement à l'heure ».

Le premier système de paiement, « à l'hectare », repose sur un mode totalement coopératif, où la facture de chaque individu dépend de la consommation du groupe entier. Il fonctionne correctement tant que les consommations à l'hectare sont relativement homogènes entre les membres du groupe.

Dès qu'apparaissent des hétérogénéités entre ces consommations, le système perd de son intérêt et de son équité. Dans le « paiement à l'heure » au contraire, chaque individu ne paye que sa propre consommation indépendamment de ce que ses voisins consomment. Il entraîne pour cela des réactions plus individualistes et encourage directement les efforts d'économies d'eau individuels. Le tableau suivant liste les principaux atouts et contraintes des 2 systèmes respectifs et les grandes tendances des comportements individuels dans chacune des situations.

Tab 7 . Atouts et contraintes des deux systèmes de paiement pratiqués

Système de paiement et introduction de cultures horticoles

	Paiement à l'hectare	Paiement à l'heure
Atouts	Solidarité au sein du groupe envers ceux dont les terrains consomment naturellement plus Simplicité d'implémentation : les surfaces de chacun sont connues Simple et équitable dans le cas d'une relative homogénéité des consommations à l'ha	Equité et efficacité économique : chacun paye sa propre consommation Incitation directe aux économies d'eau Facilite l'introduction de cultures à besoins en eau différents
Contraintes	Faible incitation pour l'effort individuel d'économie d'eau car compensation économique faible Peut mener à des pratiques de gaspillage. Consommation totale du puits souvent supérieure. Freine l'introduction de cultures autres que les traditionnelles céréales	Implémentation complexe : Nécessite des relevés horaires précis et fiables Générations de conflits autour des relevés horaires, suspicion de mensonges... Désolidarisation du groupe

Le système de paiement mis en place dans le groupe influe directement sur l'acceptation ou le rejet des cultures horticoles au sein du groupe. Le paiement à l'hectare n'est défendable que si les consommations à l'hectare sont similaires, c'est-à-dire que les cultures implantées sont homogènes sur la surface du puits. Le système a d'ailleurs été mis en place à l'époque où les céréales avaient le monopole du cycle d'hiver.

Les cultures horticoles n'ayant pas les mêmes rythmes ni les mêmes besoins quantitatifs en eau que les céréales, l'introduction de ces cultures impose donc presque obligatoirement le passage à un système de paiement plus précis proportionnel au volume consommé.

Passage d'un système de paiement à l'hectare à un système horaire

Il semble que ce soit l'évolution en cours. Dans 7 des 29 puits étant sous un régime à l'hectare, des discussions internes étaient en cours pour passer à un système horaire.

On retrouve souvent le schéma, dans les puits collectifs, de l'opposition d'un groupe « innovateur », désireux de changer le système de paiement et d'introduire de nouvelles cultures et d'un groupe « conservateur » qui refuse l'un aussi bien que l'autre. Les arguments et les raisons de cette opposition sont plus ou moins extériorisés et explicites. L'opposition instinctive au changement semble se mêler à des arguments plus rationnels, dont ceux cités dans les contraintes du tableau 6 : gestion compliquée, risque de génération de conflits au sein du groupe ...

Il faut noter également le cas de deux puits ayant effectué sans succès la transition de mode de paiement, et ayant dû par la suite retourner au paiement par hectare. Le fonctionnement du paiement horaire nécessite en effet un minimum d'intégrité de la part des utilisateurs et de confiance dans le groupe. Il est susceptible de générer des conflits importants, plus particulièrement dans les groupes à nombre de membres élevés.

E – Gamme des cultures admises par le groupe

Nous avons vu que les principales cultures semées en cycle OI étaient les céréales, devançant largement la luzerne ou les cultures horticoles. L'introduction de cultures horticoles nécessite en effet l'aménagement des règles gérant le tour d'eau et le système de paiement. Dans certains puits, on rencontre un véritable blocage autour du moindre changement des règles de gestion de l'eau.

Besoins en eau des différentes cultures

Les besoins en eau des cultures horticoles sont maximaux lorsque la plante commence à développer les organes de production commercialisables (tubercules, fruits...). Elles sont alors extrêmement sensibles au stress hydrique. Tout retard dans les irrigations après floraison est irréversible et est fortement pénalisé par des chutes de rendement et de qualité.

La connaissance des besoins quantitatifs en eau des différentes cultures est souvent assez floue chez les agriculteurs. Il est couramment admis que les besoins en eau des cultures horticoles sont nettement supérieurs à ceux des céréales.

Cet argument, défavorable aux cultures horticoles, n'est pas systématiquement valable. La majorité des cultures horticoles (et plus particulièrement la famille des courges) a des valeurs d'évapo-transpiration et donc des besoins en eau plus faibles que les céréales (cf. tab 8).

Tab. 8 - Valeur des ETM utilisées dans le modèle (le calcul figure en annexe 4)

	Blé	Orge	Brocoli	Tomate	Cornichon
Période Semis	15-30 décembre	15-30décembre	1-15 novembre	15 -31 janvier	15-28 février
ETM (mm)	495	385	400	400	310

Consommation en eau et pratiques d'irrigation

L'aspect purement hydrique (ETM) n'est pas le seul à prendre en compte pour déterminer quelles sont les cultures les plus consommatrices en eau. Les caractéristiques pédologiques, ainsi que les pratiques d'irrigations sont aussi à prendre en compte : on a vu par exemple que sur un sol sujet aux formations de fentes de retrait, des irrigations fréquentes, comme elles le sont pratiquées sur cultures horticoles, permettaient de limiter les pertes d'eau par infiltration profonde. Il faudrait également prendre en compte que certaines cultures horticoles dites à « croissance indéterminée » (comme la tomate) peuvent théoriquement prolonger la production de fruits aussi longtemps que les apports en eau se maintiennent. Ceci peut amener les producteurs maraîchers à prolonger les irrigations en fin de cycle si le marché est favorable.

Notre objectif n'est pas d'établir définitivement une liste des cultures les plus consommatrices en eau dans le Bajío, mais de mettre en avant que de très nombreux facteurs agronomiques, pédologiques, humains et économiques sont susceptibles d'influer sur la lame totale d'eau appliquée par hectare.

Remarque : coefficient d'efficience d'irrigation k :

Nous avons utilisé dans le modèle un coefficient d'efficience d'irrigation k affecté à chaque agriculteur, compris entre 0 et 1 : il représente le rapport entre la lame d'eau apportée à l'hectare (lame brute) et la lame d'eau nette, une fois décomptées les pertes en eau par évaporation, percolation profonde... Nous avons vu précédemment, (Cf. partie I, IV, 2-C), que cette efficience était conditionnée par les pratiques de l'agriculteur (niveau de surveillance accordée pendant l'irrigation par exemple) ainsi que par les caractéristiques parcellaires. (Cf. détermination du coefficient k , Annexe 1)

Influence du fonctionnement du groupe sur les choix individuels des cultures

Etant donné que les cultures horticoles nécessitent des investissements considérables tout au long du cycle, et connaissant leur extrême sensibilité, en périodes critiques, à des rationnements en eau, il serait particulièrement imprudent de la part d'un agriculteur de puits collectif d'en semer sans qu'il y ait un consensus de la part du groupe et sans avoir obtenu au préalable un accord des autres utilisateurs lui garantissant l'accès à l'eau.

D'une manière plus ou moins officieuse selon les puits, le groupe a donc un pouvoir de décision sur les cultures mises en place par ses membres.

L'impression courante, justifiée ou non, que les cultures horticoles sont «très gourmandes en eau» alimente souvent au sein des puits collectifs la crainte d'un épuisement accéléré du puits en fin de cycle et d'amplification des retards. On trouve donc fréquemment, au sein des groupes, quelques membres formellement opposés à l'introduction de ces cultures et à un aménagement du tour d'eau.

Une réponse fréquemment reçue à la question «pourquoi ne semez-vous pas de cultures horticoles ? » est effectivement : «parce que les autres ne veulent pas ».

F – Pression sur l'eau : adaptation des règles collectives et stratégies individuelles

Nous avons eu l'occasion de mentionner qu'il existait un lien fort entre la pression sur l'eau et le type de tour d'eau mis en place dans le groupe. D'une manière générale, l'eau conditionne la plupart des règlements qui s'instaurent dans les groupes.

Un groupe stressé par la ressource en eau établira des règles strictes visant d'une part à limiter l'utilisation par membre, d'autre part à répartir la pénurie de manière équitable. En cas de pression sur l'eau importante, on observe donc l'établissement de règles d'organisation plus ou moins contraignantes et de diverses stratégies. Les stratégies que nous avons rencontrées face à la pénurie d'eau dans l'échantillon de puits visités sont listées dans le tableau 9.

Conclusion

Nous avons tenté d'illustrer dans ce chapitre IV la diversité existant parmi les puits collectifs, du Bajío de Guanajuato. Il s'agit d'une diversité de structure mais aussi de mode d'organisation : les règles d'accès à l'eau, la répartition des dépenses, la gamme des cultures admises au sein du périmètre irrigué..., varient en effet largement d'un puits à l'autre. La pression sur l'eau pesant sur le périmètre irrigué est déterminante dans l'établissement de ces règles et du fonctionnement collectif, mais le facteur humain (dynamisme, bonne entente entre les membres...) y joue également un rôle important.

A la lumière de la présentation générale des puits collectifs du Bajío, nous allons étudier dans le chapitre suivant le cas précis de deux d'entre eux, que nous avons choisis comme puits d'étude devant servir de base au travail de modélisation : le puits de San Juan, *municipio* de Huanimaro, et celui de Los Lobos, *municipio* de Valle.

Tab. 9 - Stratégies mises en place en réponse aux situations de forte pression sur l'eau

Adaptations et type de mesures adoptées		Impact des mesures prises	Origine de la décision
Rigidification du Tour d'eau	Tour d'eau rigide , n'autorisant aucun délai d'attente entre 2 utilisateurs, ni modification de l'ordre d'irrigation	Répartition équitable de la pénurie d'eau, mais très faible marge de manœuvre laissée aux initiatives individuelles.	Résulte d'une décision collective. Mesure couramment adoptée
Réduction de la Surface Irriguée OI	Une partie des membres décide spontanément de ne pas semer en cycle OI, ou de ne semer qu'une partie de la surface	- Réduction de la pression sur l'eau en OI - Manque à gagner sur une partie de la surface irrigable - Compensation partielle par un cycle unique PV long	Initiatives individuelles
	Abandon total de l'activité en cycle OI	Pendant le cycle OI, les agriculteurs peuvent travailler dans des exploitations extérieures	Cas de pénurie sur l'eau extrême
Réduction du Volume d'irrigation en OI	Implantation en cycle OI de cultures à faibles besoins en eau , comme le pois chiche	- Réduction de la pression sur l'eau en OI - Permet en contrepartie l'implantation de cultures horticoles sur le reste de la surface irrigable.	Observé dans 1 puits uniquement.
	Mesures d'allocations restrictives : Quota volumétrique par membre ou par hectare	Moindre marge de manœuvre et moindre efficacité économique	Résulte d'une décision collective Concerne 6 groupes sur 36
Diversification des cultures	Implantation de cultures à besoins en eau décalés par rapport aux céréales : Ex pastèque	- Répartit la demande en eau et permet de diminuer la pression aux moments clefs - Implique un minimum de souplesse dans le tour d'eau	Résulte d'initiatives individuelles

V- Caractéristiques et organisation du puits collectif de Los Lobos

Le puits n°17 de l'*ejido* de Los Lobos se situe dans le *municipio* de Valle de Santiago. Il a été construit dans les années 90. Dans le module de Valle de Santiago, 37 % de la surface agricole est irriguée par eau souterraine (Kloezen & Al., 1998). Dans les années 60 à 80, 21 puits officiels ont été construits avec l'aide de l'état pour suppléer à l'eau de surface dans les parties hautes et aval du périmètre. La zone du

module également compte de nombreux autres puits collectifs, nés d'initiatives privées (souvent d'*ejidos*), dont fait partie le puits n°17 de Los Lobos.

1 – Hétérogénéité de ressources parmi les membres du puits de Los lobos

A – Caractéristiques des exploitations de Los Lobos, construction d'une typologie

Le puits compte 19 membres. Il s'agit donc d'un groupe de taille largement au-dessus de la moyenne. Les agriculteurs présentent des situations financières et familiales assez hétérogènes, notamment en ce qui concerne la diversité des sources de revenus. Les parcelles du puits sont relativement petites. Pour la plupart, les agriculteurs ne vivent que de cette parcelle et des quelques animaux qu'ils élèvent pour leur consommation personnelle.

Le tableau ci-dessous renseigne sur les surfaces cultivées par chacun des membres au sein de la superficie du puits, en dehors de cette superficie et des éventuelles activités rémunérées supplémentaires qu'ils exercent. (Un des membres ayant cédé en location sa parcelle à un autre du puits (Fernando), seuls 18 membres seront cités par la suite.)

Une typologie du groupe de Los Lobos a été réalisée à partir des caractéristiques citées dans ce tableau, regroupant l'ensemble des membres dans 6 groupes individuels : I1,... I6.

Tab. 10 - Caractéristiques des exploitations du puits n° 17 de Los Lobos

	Age	Superficie cultivée puits n°17	Superficie hors puits n°17	Surface totale irrigable	Activité extérieure rémunérée
		(ha)			
Ramiro	< 50	2.85	~ 37	~ 40	Commerce Location matériel + service
Antonio M	> 50	2.90	3.10	6.00	
Jose M	< 50	2.00	2.00	4.00	
Javier	< 50	4.60		4.60	
Rafael P	> 50	3.30		3.30	Elevage commercial
Guadalupe P	< 50	4.00	~ 25	~ 30	Location matériel + service
Delfino	> 50	1.10	5.00	6.10	
Francisco	> 50	4.20		4.20	
Albino	> 50	4.25	0.50	4.75	
Antonio P	< 50	1.25	1.00	2.25	Elevage commercial
Jesus	< 50	1.20		1.20	n.d.
Sixto	> 50	3.00		3.00	
Rafael M	< 50	0.79	2.00	2.79	n.d.
Nicolas B	< 50	3.92		3.92	n.d.
Fernando	n.d	7.70	~ 45	~ 50	
Merced	> 50	5.00		5.00	n.d
Enrique C	n.d	0.47		0.47	n.d
Miguel Diaz	n.d	1.29	n.d.	1.29	n.d

Par la suite, à partir des données d'enquêtes, à chacun de ces groupes I1,... I6 ont été attribués des paramètres économiques et sociaux de disponibilité en ressources : trésorerie initiale en début de cycle, main-d'œuvre familiale disponible, aversion au risque... qui conditionnent le développement de l'exploitation et qui sont utilisés dans le modèle. La typologie de Los Lobos est consultable en annexe (Cf. Annexe 7).

Par exemple, le groupe I5 de notre typologie regroupe les agriculteurs Francisco, Albino, Sixto et Merced autour de caractéristiques communes : âge avancé, leurs fils travaillent aux USA (donc peu de main-d'œuvre disponible sur la ferme, mais possibilité d'une aide financière régulière) ; environ 4 ha en propriété sur la surface du puits ; pas d'activité extérieure ni de surface supplémentaire ; environ 10% de la surface parcellaire consacrée à la culture fourragère.

B – Hétérogénéité des surfaces mises en culture

La surface officielle ou théorique (STH) du puits se compose de 54,74 ha répartis sur 22 parcelles. En réalité, deux agriculteurs ont construit une habitation sur leur parcelle, ce qui diminue la surface à semer d'un hectare environ. Le terrain est plan et regroupé autour du puits. Peu de parcelles ont fait l'objet d'un nivellement laser, mais on ne retrouve pas ici des surfaces très irrégulières comme dans le puits de Huanimaro, ni en pente comme à San Juan.

Lors du cycle OI 2002-2003, l'ensemble de la surface cultivable, 53.70 ha, est emblavée, ce qui semble être la règle habituelle.

Les agriculteurs estiment le sol de leur terrain particulièrement riche et fertile. Les rendements annoncés se situent effectivement dans la fourchette haute des rendements de la région : 8 t / ha pour l'orge et 11 t / ha pour le sorgho.

- 13 des 18 membres cultivent moins de 5 ha,

Il s'agit d'une moyenne relativement faible : 3,13 ha par membre, par rapport aux 4,3 ha relevés précédemment (Cf. partie1, IV, 1-A). La majorité des agriculteurs cultive une unique parcelle et n'a pas de terre irrigable en dehors du puits n°17. La plupart garde quelques animaux sur l'exploitation pour la consommation familiale, des vaches principalement et réserve pour les nourrir quelques ares de leur surface à la culture de la luzerne.

Deux d'entre eux ont développé davantage l'activité d'élevage : élevage bovin pour l'un avec vente du lait et des veaux, élevages de porcs et de volaille pour le second. Ces activités gardent néanmoins une petite dimension.

- 2 membres cultivent une surface un peu plus importante, autour de 6 ha, mais dont la moitié environ est rattachée à d'autres puits collectifs de la zone de Los Lobos.
- 3 membres cultivent une surface largement plus importante, de 30 à 50 ha.

Ces surfaces sont en partie louées et en partie en propriété. Ces agriculteurs possèdent leur propre matériel agricole qu'ils louent éventuellement aux agriculteurs du village et plus généralement proposent des services agricoles : semis, récolte.

C – Hétérogénéité des sources de revenus complémentaires

Dans le village de Los Lobos, l'émigration des jeunes vers les USA est un phénomène particulièrement courant. Presque tous les agriculteurs rencontrés ont fait mention d'un ou plusieurs fils vivant aux USA. Il est connu que la famille émigrée envoie des revenus à la famille restée au Mexique, bien que cela n'ait été que vaguement mentionné au cours de quelques entretiens. Il y a dans ce village peu d'hommes jeunes

qui travaillent la terre. Certains des sociétaires sont très âgés. Il est probable que lorsqu'ils cesseront de cultiver, la parcelle sera louée par un des « gros » agriculteurs du puits.

Cet exode vers les USA peut sans doute expliquer la difficulté à trouver des ouvriers dans cette zone de Los Lobos et le coût élevé de la main-d'œuvre, au minimum 90 p/jour, contre 80 p à San Juan et Huanimaro.

Deux agriculteurs ont des activités rémunératrices complémentaires et des sources de revenus non liées à l'agriculture (commerce dans le village, activité en ville). Il s'agit de deux des plus gros agriculteurs déjà cités pour leur importante surface agricole.

L'élevage commercial représente également un revenu complémentaire, mais la solution ne semble pas tenter la majorité du groupe.

En revanche, aucun des agriculteurs interrogés n'a mentionné travailler comme ouvrier dans des exploitations agricoles alentours. Il y a pourtant de nombreux propriétaires terriens (*pequeños propietarios*) à Valle de Santiago, qui cultivent des surfaces considérables de cultures maraîchères fortement demandeuses en main-d'œuvre.

2 – Cultures et techniques adoptées dans le puits

A – Peu de diversité dans les cultures adoptées à Los Lobos

Depuis quelques années, l'ensemble des agriculteurs a opté pour de l'orge. Il s'agit d'une culture sous contrat, avec la firme Impulsora, une fabrique de bière.

Par ce contrat, le débouché est a priori assuré et le prix de vente du grain fixé avant le début du cycle. Les agriculteurs sont pourtant loin d'avoir une confiance absolue dans la valeur des contrats qu'ils ont signés. Le 1^{er} prix fixé avait été de 1250 p/t et a augmenté régulièrement ces 5 dernières années pour atteindre 1600 p/t en 2003. Tant que les prix restent relativement élevés, légèrement au-dessus de ceux du blé, l'orge est une solution intéressante pour les agriculteurs de Los Lobos. Le cycle de l'orge est plus court que celui du blé et ne nécessite que 3 irrigations contre 4 ou 5 pour le blé (Cf. Tab 6 Chap IV, I-E). Il s'agit ici d'un atout considérable pour ce puits où la pression sur l'eau est forte (Cf. Chap V, III-C).

Part de la luzerne dans l'assolement

La luzerne occupe également quelques hectares répartis sur de nombreuses parcelles. Elle est coupée chaque mois pour le bétail, ou plus rarement vendue sur des petits marchés locaux. La luzerne est une culture forte consommatrice en eau : elle doit être irriguée chaque mois, après la coupe. Cependant, comme elle est destinée à l'autoconsommation, les agriculteurs n'attachent pas une grande rigueur au calendrier d'irrigation. Entre décembre et avril les producteurs de luzerne font généralement coïncider l'irrigation sur céréale et sur luzerne. Ainsi, la culture fourragère n'ajoute pas de pression sur l'eau particulière par rapport à l'orge pendant cette période.

On estime entre 5 et 6 ha la surface de la luzerne dans le puits. Les agriculteurs eux-mêmes ne connaissent pas le chiffre exact, ils ont l'habitude d'avoir « un petit morceau » de la parcelle destinée au fourrage. De plus, ce chiffre est très variable d'une année sur l'autre, puisque les agriculteurs en renouvellent une partie chaque année et ainsi agrandissent ou rétrécissent la surface fréquemment.

B – Pratiques d'irrigation

L'acheminement de l'eau depuis le puits jusqu'aux parcelles est souterrain. En revanche, dans la parcelle même, ce sont en majorité les fossés de terre qui sont utilisés. La pénibilité du transport et de l'installation des tubes est généralement avancée pour justifier cette « négligence ». Pour les quelques parcelles plus

éloignées et légèrement en hauteur, des tubes PVC s'avèrent néanmoins nécessaires pour éviter des pertes trop importantes par percolation.

Les observations faites lors des passages sur le terrain dénotent d'une certaine vigilance vis-à-vis de l'économie d'eau : les agriculteurs sont en général présents sur la parcelle au moment de l'irrigation et nous n'avons pas observé des flaques d'accumulation d'eau dans les creux ou en sortie de parcelle comme dans d'autres puits (puits de Huanimaro notamment). De plus, les surfaces sont assez régulières et peu pentues. Un ou deux agriculteurs ont fait réaliser un nivellement laser de leur parcelle, d'autres en ont le projet.

Les agriculteurs ont l'habitude de se partager le débit en début et fin d'irrigation avec respectivement les utilisateurs précédents et suivants.

C – Dates et durées des irrigations

Pour le 1^{er} tour, les durées ont varié entre 8,5 h/ha et 11h/ha pour les irrigations des quatre 1^{ers} agriculteurs. Les dates des 3 tours d'irrigation du cycle OI 2003 ont été :

- 1^{er} Tour d'irrigation : du 6 /12 au 2/01
- 2^e Tour d'irrigation : à partir du 12/01
- 3^e Tour d'irrigation : du 26/02 à fin mars.

La luzerne a été irriguée en supplément en octobre et/ou novembre. Par contre, plusieurs agriculteurs ne font pas l'irrigation d'avril sur luzerne pour n'irriguer qu'en mai, simultanément à l'irrigation de semis sur sorgho.

3 – Caractéristiques techniques des équipements de pompage du puits

A – Faible efficacité du système de pompage de l'eau

La pompe a fait l'objet d'un diagnostic d'efficacité technique réalisé début 2003 par le CEAR. (*Centro de Educacion y Asistencia del Riego*). Les résultats obtenus sont résumés ci-dessous.

Evaluation de la ressource en eau du puits :

Tab. 11 - Extrait 1 du diagnostic CEAR : Caractéristiques Physiques de la Pompe

Type de pompe :	Turbine	
Niveau dynamique (1)	49,000	m
Niveau statique (2)	48,16	m
Abattement (3)	0,84	m
Dépenses (4)	39,059	l.s^{-1}

- Le débit (4) de ce puits est plus faible que ceux de Huanimaro ou de San Juan : 39 l.s^{-1} , contre presque 46 l.s^{-1} à San Juan, et 70 l.s^{-1} à Huanimaro.
- Initialement, le puits donnait 50 l.s^{-1} selon les chiffres du district 011, module de Valle.
- L'eau est puisée à 50 m de profondeur (1), valeur équivalente à celles des 2 autres puits d'étude. (La profondeur d'extraction influe fortement sur le prix du m^3 d'eau.)
- L'écart entre les niveaux d'eau dynamique (1) et statique (2) (*abatimiento* (3)) n'indique pas de signe d'épuisement préoccupant - à court terme et localement - de la ressource.

Rentabilité de la pompe en terme de consommation électrique

Tab. 12 - Extrait 2 du diagnostic CEAR : Paramètres électriques

Paramètres électriques		
F. de puissance	0,760 0,800	0,793
Efficience électro-mécanique		
EE(6)	56,340	

Les 2 valeurs significatives : Efficience Electro-Mécanique, EE (6) et le Facteur de Puissance, FP (5) ont été jugés insuffisants par le CEAR :

- un FP de 79% signifie une consommation d'électricité par le moteur trop élevée, avec une part d'électricité dissipée, stérile, de 11%. Cela arrive souvent lorsque le moteur est surdimensionné par rapport aux besoins de la pompe. De plus, en supplément de la facturation de cette surconsommation d'énergie, la CFE (*Comisión Federal de Electricidad*) taxe d'une amende les puits dont le FP est en dessous du seuil minimum.
- l'efficience EE est le coefficient le plus significatif du fonctionnement général de la pompe. Elle a été mesurée à 56 %, loin des valeurs souhaitables de 65 - 70 %. Le FP entre dans le calcul de la EE mais d'autres éléments sont aussi à prendre en compte.

On peut en conclure que l'électricité consommée par le puits de Los Lobos est relativement mal rentabilisée. La surconsommation du système de pompage est doublement taxée et par conséquent le m³ d'eau revient relativement cher aux utilisateurs.

B – Coût d'extraction de l'eau

Coût forfaitaire à l'hectare

Nous avons relevé le montant des factures d'électricité pour les mois de décembre à avril.

Tab. 13 - Factures d'électricité payées par le groupe de Los Lobos pendant le cycle OI 2003.

	Facture puits (pesos)	Facture par hectare (pesos)
Décembre	8350	
Janvier	9400	
Février	10400	
Mars	9340	
Avril	8821	
Total cycle OI 2003	46 311	862 p / ha

Du 10 novembre au 10 avril, la consommation en électricité du puits s'élevait à un total de 46 311 p. Au 10 avril, les irrigations étaient terminées sur orge et a priori sur luzerne (à moins que des producteurs ne décident de faire une irrigation intermédiaire avant mai).

On calcule donc 862 p forfaitaires payés par hectare, en prenant en compte les 53.70 ha semés cette année. En revanche, les irrigations du début novembre sur luzerne et celles d'avril n'apparaissent pas dans ces comptes et doivent être également comptabilisées dans le cycle OI. Cela ne représente pas une somme importante (6 ha de luzerne au total).

Lors des enquêtes, à propos du coût global de l'eau sur le cycle OI, les agriculteurs mentionnent des chiffres un peu plus élevés, autour de 1000 p/ha par cycle. Nous avons finalement opté pour une valeur intermédiaire de 950 p/ha, qui sera celle utilisée dans les modèles individuels (dans les modèles individuels la facture individuelle en eau doit être importée, car elle ne peut pas être calculée à partir d'une consommation d'eau collective).

Coût du m³ d'eau

Le prix du m³ d'eau dépend de plusieurs facteurs, en particulier de la profondeur de la nappe à l'endroit d'extraction et du fonctionnement du système de pompage, comme nous l'avons vu plus haut. Le diagnostic du CEAR ne nous a pas renseignés sur le coût exact d'extraction du m³ d'eau dans ce puits. En tenant compte du coût d'extraction connus pour d'autres puits et de la faible efficacité du système de pompage révélée par le diagnostic du CEAR, nous avons estimé approximativement le coût à 16 p / m³.

C – Evaluation de la pression sur la ressource en eau

Si on mesure la pression sur l'eau au rapport : $R = \text{débit du puits} / \text{surface à irriguer}$, (Cf. Chap IV, I–G), le puits de Los Lobos montre une forte pression sur l'eau :

On a en effet : $R_{\text{LOS LOBOS}} = 0,72$ ce qui signifie une forte augmentation de la pression sur l'eau par rapport à la situation initiale de 1 l.s⁻¹.

Sachant qu'il n'y a pas eu d'augmentation de la surface par rapport à la STH, ce rapport est à mettre sur le compte de la diminution du débit par rapport au 50 l.s⁻¹ initiaux.

Ce rapport indique que le puits doit avoir des difficultés à terminer le tour d'eau dans le temps exigé par les céréales. Effectivement, les membres du puits mentionnent des retards fréquents dans la dernière irrigation de l'orge. D'après les enquêtes, les retards touchent « les 2 ou 3 derniers agriculteurs du tour » et des pertes de rendements parfois importantes s'ensuivent. La valeur de ces pertes et le nombre d'hectare touchés n'ont pas pu être chiffrés précisément : les agriculteurs concernés semblaient vouloir minimiser le préjudice subi et se sont montrés très approximatifs. Cette attitude s'explique peut-être par leur souhait de ne pas reprendre l'alternance du tour d'eau (Cf. partie I, V, 4–A). Nous avons estimé qu'environ 6 à 7 ha subissaient régulièrement des retards d'irrigation.

4 – Tour d'eau et règles d'organisation au sein du puits

A – Caractéristiques du tour d'eau mis en place à Los Lobos

Officiellement, l'ordre du tour d'eau a été fixé par accord entre les sociétaires en fonction l'éloignement de la parcelle au puits : une année, l'eau se déplace de la parcelle la plus proche à celle la plus éloignée du puits. L'année suivante, l'ordre est inversé et les irrigations commencent par la parcelle la plus éloignée. En pratique, l'alternance n'est pas respectée d'une année sur l'autre : la majorité des agriculteurs craignent de semer tôt en raison des gelées qui peuvent sévir pendant les mois de janvier à mars. C'est finalement toujours le même agriculteur qui prend le risque de semer en 1^{er}. Le tour enchaîne après lui.

Le tour d'eau est très peu flexible dans ce puits. L'ordre du 1^{er} tour doit être respecté dans les tours suivants. Sauf exception, un agriculteur en retard n'est pas attendu : avec sa place, il perd, momentanément, son droit à l'eau. Il risque de ne pouvoir irriguer à nouveau qu'à la fin du tour, quand tous les autres auront terminé.

B – Système de répartition des coûts d'extraction

Le système de paiement appliqué est le paiement forfaitaire à l'hectare : quelque soit leur consommation réelle d'eau sur l'hectare irrigué, tous les utilisateurs payent donc le même tarif unitaire. Chaque mois, la facture est divisée entre tous ceux qui ont semé pendant le cycle en cours : un agriculteur semant début

janvier paye donc sa part en décembre également. Il semble cependant qu'entre les 2 cycles OI et PV, après la récolte de l'orge et avant le semis du sorgho, seuls les producteurs de luzerne se partagent la facture intermédiaire. Comme nous l'avons calculé plus haut, l'irrigation de 5 mois du cycle OI du 10 novembre au 10 avril a coûté environ 950 p / ha aux agriculteurs.

C – Luites internes pour l'adoption des cultures maraîchères

Le problème de l'introduction de cultures maraîchères divise les sociétaires. Plusieurs membres ont déclaré être potentiellement intéressés par ces cultures et souhaiteraient en faire l'essai. Cependant, les freins sont nombreux : marché très risqué, difficulté à trouver de la main-d'œuvre, manque de maîtrise technique ...

Le compromis qui leur semble le plus intéressant consisterait à se lier avec une entreprise d'exportation «sérieuse», avec laquelle établir des contrats de culture et qui puisse également leur fournir une assistance technique.

Cependant, une autre partie des membres du puits s'oppose fortement à l'introduction des cultures maraîchères. Ils argumentent que ces cultures consomment trop d'eau et que le puits n'aurait pas la capacité de tout irriguer. L'interdiction de semer des cultures maraîchères dans ce puits n'est pas explicite cependant, mais passe par un refus formel de la part de ce groupe de modifier les règles de fonctionnement nécessaires à leur introduction, notamment le fonctionnement du tour d'eau.

Il est certain que tant qu'un accord entre les sociétaires n'aura pas été trouvé autour de l'utilisation de l'eau, les cultures maraîchères ne pourront pas être introduites. Avec ou sans contrat de culture, les agriculteurs intéressés doivent pouvoir s'assurer que leur parcelle pourra recevoir de l'eau dès que nécessaire afin de ne pas perdre l'investissement considérable que représente le semis de cultures horticoles.

Conclusion

Nous pouvons caractériser le puits de Los Lobos comme un puits subissant une pénurie d'eau importante et ayant en réaction établi des règles collectives autour de l'accès de l'eau relativement strictes. Le tour d'eau présente une grande rigidité. Le groupe n'a pourtant pas abouti à des règles de restrictions quantitatives sur la consommation en eau de chacun. Le degré de liberté des agriculteurs au sein du groupe est restreint, particulièrement concernant le choix de cultures. Pourtant, le bon potentiel agronomique de ce périmètre irrigué : sol fertile, terrains plats, peut permettre une bonne rentabilisation de l'eau d'irrigation.

Le fonctionnement du puits est source de beaucoup de critiques au sein du groupe et ne semble pas être suffisamment efficace pour éviter des retards d'irrigation en fin de cycle. La taille importante de ce groupe ne semble malheureusement pas faciliter les prises de décision collectives et freine une éventuelle réforme des règles d'organisation.

Le chapitre concernant la description du puits de San Juan est situé en annexe (Cf. Annexe 8). Nous rappelons ici succinctement les principales caractéristiques du groupe.

Les agriculteurs de San Juan semblent chercher activement des solutions pour résister au contexte économique défavorable ainsi que dépasser certains handicaps naturels pédologiques et agronomiques, liés à leur situation géographique. Le puits de San Juan se démarque des autres puits étudiés par sa souplesse de fonctionnement : on n'y observe pas de réglementation rigide sur le droit d'accès à l'eau : ni sur l'allocation ni sur la distribution.

Le tour d'eau instauré est nettement moins contraignant qu'à Los Lobos, même s'il continue de conditionner fortement la production agricole, surtout les années de plus forte pression sur l'eau. Le

calcul de la pression sur l'eau pour l'année 2002-2003 donne un rapport $R_{\text{SAN JUAN}} = 0.99$, qui indique une pression sur l'eau correcte. Celle-ci est due à un débit qui reste élevé : 46 l.s^{-1} , mais également à des diminutions de surface la irriguée pendant le cycle OI considéré.

Grâce au dynamisme de ses membres et de son représentant et sans doute facilités par la petite taille du groupe, les accords entre membres ont abouti à d'importantes modifications du règlement d'origine, notamment le passage au paiement au volume. La diversification des cultures consentie permet aujourd'hui au puits d'être producteur horticole à plus de 50 %.

Deuxième partie :

Construction d'un outil de représentation des puits

I – Potentialité du modèle comme outil d'analyse et de prospective socio-économique

Le détail de la construction des modèles individuels et collectifs se base davantage sur le cas de Los Lobos, qui est utilisé par la suite dans les exemples de simulation. De nombreuses données du modèle proviennent néanmoins de l'étude du puits de San Juan, notamment les données sur les cultures horticoles.

1 – Mise en application des principes d'optimisation sous contrainte

A – Entrée des données exogènes

L'écriture du modèle se compose d'une partie consacrée à l'entrée des données exogènes et d'une seconde consacrée à la mise en équation du problème d'optimisation. Les données nécessaires concernent :

- des données économiques globales (coût du travail salarial, marge brute des cultures...)
- des caractéristiques de l'exploitation (disponibilité en main-d'œuvre familiale...)
- des caractéristiques économiques et agronomiques des cultures. (Cf. Tab 14)

Tab. 14 – Types de paramètres utilisés pour définir les différentes cultures

Paramètres de définition des cultures	Abréviation
Dépenses agricoles payables immédiatement (intrants : fertilisants, phytosanitaires)	DA
Dépenses agricoles payables à la récolte ⁽¹⁾ (intrants : fertilisants, phytosanitaires)	DFC
Besoins en Main-d'œuvre Familiale	BWF
Besoins en Main-d'œuvre Salariale ⁽²⁾	BWS
Chiffre d'affaires ⁽³⁾	CA
Besoin en eau	BE

⁽¹⁾ les entreprises d'exportation horticoles font crédit sur certains intrants jusqu'à la récolte

⁽²⁾ voir II-A ; ⁽³⁾ voir II-C

Les valeurs des paramètres des cultures peuvent être consultées en annexe. (Cf. Annexe 3)

Remarque : représentation de l'activité élevage et de la culture de la luzerne

L'activité d'élevage a une faible importance économique dans les puits étudiés. Nous avons choisi de la représenter dans le modèle uniquement au travers de la culture de la luzerne qui lui est directement liée.

La culture de la luzerne a été représentée de façon très schématique dans le modèle : c'est une culture apportant des revenus faibles et réguliers. Nous ne lui avons attribué aucune commercialisation et ni coût de production. Le risque sur le chiffre d'affaires est considéré nul. Le besoin en travail familial est lui aussi considéré comme faible et régulier (une coupe par mois).

B – Mise en équation du problème d'optimisation

Optimisation

Nous avons opté pour un type de modèle exprimant le risque dans la fonction objective. Le travail d'optimisation que réalise le modèle va rechercher simultanément la maximisation du profit et une minimisation du risque.

Maximisation du profit

Le profit que l'on cherche à maximiser ici est représenté dans le modèle par une variable R_m signifiant « revenu moyen ». Nous définissons sous ce terme la somme des marges brutes moyennes réalisées par chaque culture, à laquelle sont soustraits les prélèvements personnels familiaux et le remboursement des emprunts contractés tout au long du cycle.

NB : Est également comptabilisé dans le calcul du revenu un coût fictif relatif au « travail familial supplémentaire » (Cf. Chap F, II – C).

Le calcul de R_m fait appel au calcul d'une variable intermédiaire R_{al} :

- **Ral (E)**, « Revenu aléatoire » fonction des Etats de Nature (cf. II-A) est le revenu obtenu avec une combinaison particulière des chiffres d'affaires (CA) de chaque culture. Les CA varient en fonction des rendements et des prix, l'amplitude de cette variation dépend de la culture considérée (Cf. tab 6, chap IV). La combinaison de CA réalisée par les agriculteurs varie chaque année et est aléatoire.
- **Rm**, « Revenu moyen » se calcule comme la moyenne des revenus aléatoires R_{al} (E).

Minimisation du risque

La minimisation de la prise de risque équivaut, dans notre cas, à une minimisation de la variabilité des revenus aléatoires R_{al} par rapport au revenu moyen R_m .

Nous avons choisi l'écart-type des revenus aléatoires comme indicateur de cette variabilité.

Aversion au risque

L'importance relative de l'effort de maximisation du profit par rapport à celui de minimisation de la prise de risque est représentée par le niveau d'aversion au risque de l'individu (Cf. chap C, II-A)

Les coefficients d'aversion au risque (a) ont été attribués aux exploitants d'après enquête, selon plusieurs critères :

- âge de l'exploitant (ou autres caractéristiques personnelles),
- présence de membres de la famille aux USA susceptibles d'envoyer un soutien financier,
- exercice d'une activité rémunératrice hors agricole exercée par un membre de la famille, ...

Dans certains cas, les coefficients d'aversion au risque ont dû par la suite être réévalués lors du calibrage du modèle.

Le calibrage est en effet une étape déterminante dans le choix de ces coefficients. « L'aversion au risque joue alors le rôle de paramètre résiduel, concentrant tout ce qu'il y a d'inexpliqué dans la différence entre le modèle et la réalité ». (Jacquet, 2002)

Ils sont en général compris entre 0.3 et 0.45.

Tab. 15 - Récapitulatif des opérations d'Optimisation en langage mathématique

Équation	Calcul	Variable	
Revenu moy	$\sum (E, Ral(E))/card E$	= Rm	de calcul
Ecart	$\sqrt{[\sum (E, (Rm - Ral(E))^2)/card E]}$	= ECTYPE	de calcul
Objectif	$Rm - a.ECTYPE$	= Z	À maximiser

Contraintes

Les contraintes cloisonnent et limitent le développement des exploitations. Elles ont été identifiées sur le terrain lors des travaux d'enquêtes. Ce sont en partie des contraintes structurelles de disponibilité en ressources, qu'on retrouve généralement dans toute exploitation agricole : disponibilité en temps, en main-d'œuvre, surface, trésorerie...

Ces contraintes sont en général formulées clairement lors des enquêtes et assez facilement traduisibles en langage mathématique. Cependant, il existe d'autres sortes de contraintes, relatives aux traditions, à la vie sociale du village ou aux croyances personnelles de l'agriculteur... Elles ne reposent pas forcément sur des obstacles concrets ni rationnels, sont rarement formulées spontanément et sont aussi plus difficiles à transcrire en langage mathématique.

On peut citer comme exemple la forte tradition céréalière du Bajio, qui pèse fortement sur les mentalités et reste parfois la seule justification au semis des céréales lorsque celles-ci ne sont plus rentables.

2 – Détail des étapes de construction du modèle individuel

Ce chapitre développe certains points de la construction du modèle qui nous ont semblé complexes ou particulièrement intéressants. Ce sont : la prise en compte du risque et le choix des Etats de Nature ; le traitement des besoins en main-d'œuvre vis-à-vis des pics de travail sur horticulture ; le découpage du modèle en périodes temporelles pertinente pour les irrigations ; ou la prise en compte des retards du tour d'eau.

A – Etats de Nature définis sur le Chiffre d'Affaires

Rappel Etat de Nature : On appelle «Etat de Nature » (Ex) un des états éventuels pouvant résulter d'une situation incertaine. L'ensemble des Etats de Nature {E} regroupe l'éventail des états possibles de la situation incertaine. Les paramètres du modèle peuvent avoir une valeur différente selon le Ex concerné.

Prise en compte du risque sur le Chiffre d'Affaires

Nous avons choisi d'établir des états de la nature sur les chiffres d'affaires (CA) des cultures. Le CA varie naturellement en fonction du rendement de la culture et de l'état du marché de l'année. Dans notre étude, selon la culture choisie, la variabilité autour du CA est plus ou moins forte : il y a une opposition bien marquée entre cultures traditionnelles céréalières et cultures horticoles, dont le marché est particulièrement imprévisible. Cette incertitude sur le chiffre d'affaires représente une des principales sources de risque de l'activité agricole de cette zone. Elle conditionne fortement les choix culturels des agriculteurs. Les exploitations sont effectivement souvent de petite dimension et n'ont pas la capacité d'encaisser d'amples variations de revenus ou de construire une stratégie à long terme.

Pour représenter ce haut niveau de variabilité, un ensemble {E} de 40 états de la nature E_x a été introduit dans le modèle, représentant chacun une combinaison aléatoire des chiffres d'affaires possibles sur

chaque culture. (Nous nous sommes limités à 40 états de la nature pour des questions de rapidité d'exécution du modèle).

Au préalable, nous avons établi pour chaque culture une gamme des chiffres d'affaires potentiels, en nous basant sur le niveau de variabilité des rendements et la gamme des prix potentiels :

Détermination de 40 chiffres d'affaires pour chaque culture

Chaque liste de CA a été établie de manière aléatoire au moyen du logiciel Excel, à partir :

- du chiffre d'affaires moyen espéré de la culture,
- de la gamme de variation possible : valeurs extrêmes (maximum et minimum) des prix et des rendements dans les 5 dernières années.

Ces valeurs ont été déterminées avec l'aide des agriculteurs et des techniciens ASOSID et de données officielles complémentaires quand celles-ci sont disponibles (sites Internet du Ministère de l'Agriculture, statistiques agricoles...).

Nous avons considéré que la distribution des CA était conforme à une loi normale pour les céréales.

Pour les cultures horticoles, les variations des CA sont trop hasardeuses pour répondre à une loi normale. Nous avons établi une distribution aléatoire de façon « manuelle » à l'aide du tableur Excel, en fonction des fréquences probables des marges brutes réalisées habituellement. Nous avons considéré les 4 catégories de marge brute : négative / nulle / positive / très excédentaire.

La liste des chiffres d'affaires est consultable en annexe. (Cf. Annexe 4)

Pas de prise en compte du risque sur la disponibilité quantitative en eau

Nous avons choisi de ne pas établir d'Etats de Nature sur la disponibilité quantitative en eau, contrairement à ce qui se fait dans de nombreuses études sur les périmètres irrigués. Il s'agit en effet ici d'un cas d'irrigation à partir d'eau souterraine et non d'eau de surface directement liée aux précipitations de l'année.

L'abaissement des nappes phréatiques est un problème concret et dramatique et la plupart des agriculteurs rencontrés ont conscience du phénomène. Cependant nous n'avons pas eu l'impression, au travers des enquêtes, que le niveau de la nappe entraînait des incertitudes sur les irrigations à l'échelle d'un cycle OI, qui dure 6 mois.

L'incertitude sur la disponibilité en eau existe bien pourtant, mais en terme de disponibilité temporelle davantage que quantitative : nous avons vu que selon les années et selon le niveau de pression sur l'eau du puits, le tour d'eau risque de se retarder et de pénaliser un certain nombre d'utilisateurs. Ce risque sur la disponibilité « temporelle » ne peut pas être exprimé facilement au travers d'Etats de Nature car il ne s'agit pas de la variation directe d'un paramètre quantitatif. Nous avons cependant essayé de l'introduire dans le modèle par une méthode détaillée plus loin. (chap VI, II-D)

B – Découpage du cycle OI en périodes de temps

Le choix du découpage du cycle OI en périodes pertinentes pour la modélisation s'est avéré complexe. La division du temps doit en effet répondre à de multiples réalités de terrain :

- les besoins chronologiques en eau des différentes cultures,

- les besoins en main-d'œuvre pour les diverses opérations culturales, notamment des pics de travail très courts sur les cultures horticoles,
- des périodes d'équilibrage (solde) de la trésorerie

Difficultés rencontrées

- ❑ Les calendriers d'irrigation des cultures s'expriment en «jours après semis » et les cultures peuvent présenter, à des périodes clef de leur cycle de croissance, une grande sensibilité à un retard ne serait-il que de quelques jours. (Cf. partie, IV, 2-B).
- ❑ De même, les pics de travail sur les cultures horticoles exigent pour être bien représentés, une échelle de temps précise car ils se déroulent sur 1 à 3 jours généralement. Les problématiques «eau » et «travail » demanderaient donc un découpage temporel très fin.
- ❑ En revanche, les données dont nous disposons dans d'autres domaines : coûts de production, temps de travail des principales opérations culturales... nous permettent au mieux une précision à l'échelle de la quinzaine.
- ❑ De plus, il est nécessaire de garder un modèle relativement simple, à lire et à utiliser. Pour cela, il faut éviter de multiplier le découpage en diverses divisions temporelles.

Solution proposée

En tenant compte au mieux des contraintes précédentes, nous avons opté pour un double découpage du cycle OI :

- en périodes de 1 semaine pour l'expression des besoins en eau. Les 28 semaines du cycle ont ainsi été regroupées dans un ensemble S.
- en périodes de 2 semaines pour tous les autres paramètres. Les 14 quinzaines du cycle ont été regroupées dans l'ensemble Q.

L'expression des besoins en eau à l'échelle de la semaine n'est certes pas assez précise pour représenter l'exigence en irrigation de certaines cultures à des moments critiques, tels que la floraison. Cependant, on a observé sur le terrain une relative souplesse par rapport aux calendriers d'irrigation théoriques, surtout en début de cycle. Nous avons donc accepté ce découpage hebdomadaire car il présente pour le modèle un bon compromis entre simplicité et précision.

En revanche, ce découpage ne permet pas d'exprimer les besoins en travail et nous avons dû nous tourner vers une autre solution, développée dans le paragraphe suivant.

C – Dichotomie des besoins en main-d'œuvre

Deux sources de main-d'œuvre permettent de réaliser les opérations culturales : la main-d'œuvre familiale et la main-d'œuvre salariale. Assez logiquement, lorsque dans une période de temps donnée la main-d'œuvre familiale ne suffit pas à réaliser les opérations culturales, il y a embauche de salariés.

Les pics de travail sur cultures horticoles correspondent à des périodes très courtes de travail intense : semis, transplantation, désherbage manuel, récolte... au cours desquelles il est systématiquement fait appel à un grand nombre d'ouvriers : la récolte du cornichon par exemple nécessite l'embauche de 300 à 400 « *jornales* » (ouvriers saisonniers) répartie sur quelques jours seulement.

Problématique

Les dates d'implantation de chaque culture étant décalées dans le temps et les cycles de croissance différents, les pics de travail de toutes les cultures horticoles sont multiples et dispersés tout au long du cycle OI. Réaliser un découpage de l'ensemble du cycle OI en périodes de 1 ou 2 jours pour représenter chacun de ces pics n'aurait pas été intelligible ni fonctionnel.

En revanche avec un découpage à l'échelle de la quinzaine, il n'est pas possible dans le modèle de faire ressortir un besoin en main-d'œuvre concentré sur quelques jours et donc impossible également de recréer le besoin d'embauche salariale.

Solution proposée

Pour pouvoir retransmettre dans le modèle le besoin d'embauche salariale sans faire appel au découpage périodique, nous avons donc opté pour la solution suivante : les besoins en travail ont été divisés pour chaque culture entre besoins en main-d'œuvre familiale (BWF) et besoins en main-d'œuvre salariale (BWS). A chaque culture, on affecte, par période, une valeur de BWF et une valeur de BWS. Les BWF sont limités dans l'équation de contrainte par la ressource en main-d'œuvre familiale. Les BWS ne sont pas limités quantitativement, mais on leur affecte un coût, relatif au salaire des ouvriers, de 80 à 100 p / jours.

Pour chaque culture, les opérations culturales « normales », c'est-à-dire hors pics de travail, ont été affectées d'un besoin en travail familial uniquement, car les exploitants les réalisent généralement sans faire appel à des ouvriers. Nous n'avons donc attribué aucune valeur de BWS ($BWS = 0$) aux cultures céréalières ni aux fourrages, puisqu'il est rare que la somme de travail exige l'embauche d'aide salariale sur ces cultures. En revanche, nous avons attribué aux cultures horticoles à la fois des besoins en travail familial et salarial (BWS et BWF non nuls) pendant les pics de travail.

Le modèle ne s'éloigne pas trop de la réalité en ce qui concerne le travail salarial sur les cultures horticoles : sur le terrain, on a observé que l'embauche d'ouvriers était systématique dès qu'il y avait présence de cultures maraîchères sur l'exploitation et que la quantité d'embauche était à peu près uniforme sur l'ensemble des exploitations.

Critique de la solution

Cette solution un peu artificielle permet donc de se détacher du découpage temporel du modèle en attribuant d'autorité un besoin d'embauche salariale. Cependant, elle présente l'inconvénient de créer une rigidité due à la répartition BWF / BWS imposée : elle est susceptible d'interdire par exemple l'accès à la main-d'œuvre salariale sur fourrages et céréales, ce qui est susceptible de bloquer le modèle trop facilement dans certains cas isolés (agriculteurs ayant une activité extérieure à l'exploitation par exemple, et disposant de peu de temps pour l'exploitation).

Pour assouplir cette rigidité, une seconde source de travail familiale a été ajoutée, que nous nommons travail familial « supplémentaire ». Elle a pour but de rendre compte de l'extensibilité des horaires de travail d'un agriculteur. On sait en effet que, en cas de nécessité, un exploitant peut étirer assez largement sa disponibilité en travail par rapport aux horaires de travail habituels. Cependant, à la différence de la première source de travail familial, qui est gratuite, nous avons attribué un coût à ces horaires supplémentaires, afin de rendre compte de leur pénibilité et donc limiter leur utilisation. Ce coût se retrouve dans le calcul du revenu final.

Le calibrage du modèle nous a conduit à un coût de 120 p/jour de travail supplémentaire.

D – Prise en compte des retards éventuels du Tour d'Eau

Le set ou ensemble, C_1 regroupe les différentes cultures céréalières, horticoles et fourragères que le modèle peut utiliser. Chaque culture est définie par des paramètres propres, comme nous l'avons vu précédemment (Cf. partie I, 1-A) et dont la valeur est donnée par période temporelle des ensembles Q ou S, (on parle d'indexation par Q ou S).

Tab. 16 - Paramètres de cultures et indexation du paramètre par un indicateur temporel

Paramètres définissant les cultures C_1		Indexation du paramètre
Dépenses agricoles payables dans l'immédiat *	DA (Q)	Quinzaine
Dépenses agricoles payables à la récolte *	DFC (Q)	Quinzaine
Besoins en Main-d'œuvre Familiale	BWF (Q)	Quinzaine
Besoins en Main-d'œuvre Salariale	BWS (Q)	Quinzaine
Chiffre d'affaires réalisé par période Q	CA (Q)	Quinzaine
Besoin en eau	BES (S)	Semaine

* voir tableau 14

Problématique

Dans le modèle tel qu'il est décrit ici, les besoins en eau sont exprimés à l'échelle de la semaine et doivent donc être satisfaits à la semaine. Si la contrainte en eau ne peut pas être remplie pour une culture donnée, le modèle ne peut strictement pas proposer cette culture dans la solution. Or, une problématique importante de ce travail de modélisation est l'étude du tour d'eau, avec les risques de retard d'irrigation qui peuvent se produire lorsque la pression sur l'eau est forte et les conséquences que cela induit.

Avec l'obligation de satisfaire les besoins en eau à l'échelle de la semaine, nous avons introduit une rigidité non souhaitable dans le modèle : dans la réalité, il arrive que les besoins en eau d'une culture en place ne soient pas parfaitement satisfaits. Des cultures ayant subi un stress hydrique à un moment du cycle peuvent néanmoins arriver à maturité et il y a création d'une marge brute sur la culture, même si celle-ci est moindre que le bénéfice escompté.

Il existe donc une certaine dose de tolérance à un défaut d'irrigation, variable selon les cultures. Cette tolérance n'est pas reproduite dans le modèle tel qu'il est décrit jusqu'ici.

Solution proposée

Nous avons cherché à introduire dans le modèle la représentation d'un calendrier d'irrigation « imparfait » en créant un itinéraire technique supplémentaire, alternatif, pour chacune de nos cultures C_1 . Nous avons pour cela conçu un second set de cultures, C_2 , pour lesquelles on admet un retard d'irrigation plus large que pour le set C_1 . Les itinéraires techniques des cultures C_2 sont les équivalents de ceux des cultures C_1 correspondantes, définis par les mêmes valeurs de paramètres de cultures : besoin en main-d'œuvre, investissement..., à l'exception des besoins en eau et du chiffre d'affaires. Les besoins en eau des cultures C_2 sont en effet exprimés à l'échelle de la quinzaine uniquement et non plus à la semaine comme c'est le cas pour les cultures C_1 . Ainsi la contrainte d'eau hebdomadaire est supprimée pour les cultures C_2 .

En contrepartie de cette souplesse sur la contrainte d'eau, les chiffres d'affaires (CA) moyens affectés à ces cultures C_2 sont plus bas que ceux de C_1 et les chiffres d'affaires aléatoires présentent davantage de variation autour de la valeur moyenne.

D'une manière générale, nous avons affecté aux cultures C_2 une baisse de 10 % du CA moyen. Les valeurs extrêmes des CA aléatoires ne sont pas modifiées par rapport aux cultures C_1 correspondantes : même minimum et maximum, mais les répartitions changent la probabilité d'obtenir une marge brute nulle ou négative qui est plus importante pour les cultures C_2 que pour les C_1 (voir liste des CA, Annexe 6).

Détermination des CA des cultures de l'ensemble C_2 par rapport aux C_1 , exemple de l'orge

Le CA moyen de l'orge C_1 est de 9620 pesos / ha. Celui de l'orge C_2 8658 pesos/ha ce qui représente une baisse de 10 %. Les fréquences de CA les plus élevées concernent, pour C_1 les CA compris entre 10 000 pesos et 11 000 / ha. Pour C_2 ce sont les CA compris entre 9 000 et 10 000 / ha.

Les histogrammes 1 et 2 représentent les répartitions des CA selon des intervalles donnés, pour une orge C_1 et pour une orge C_2 .

Figure 1 : Répartition des CA d'une orge C_1 (fréquence en ordonnée, CA en abscisse)

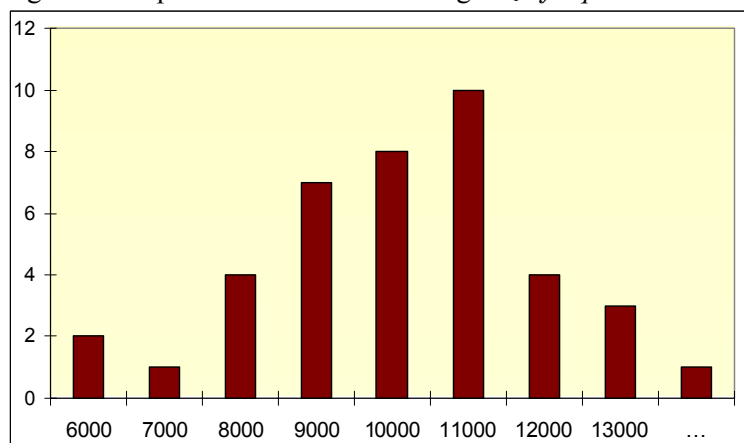
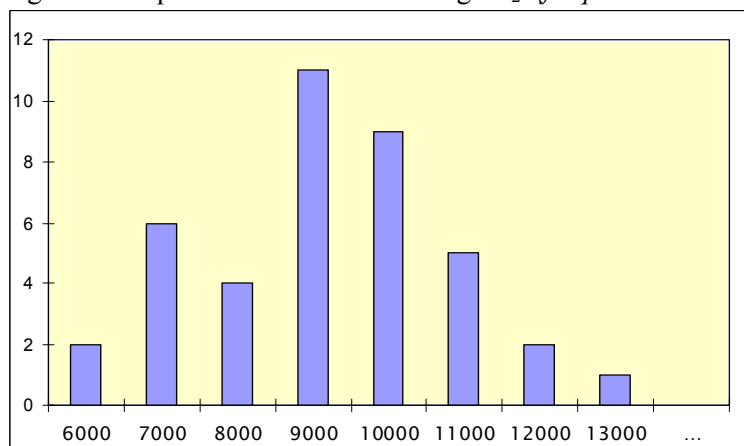


Figure 2 : Répartition des CA d'une orge C_2 (fréquence en ordonnée, CA en abscisse)



Critique de la solution

Les cultures irriguées sont donc dorénavant représentées par plusieurs itinéraires techniques qui correspondent à des volumes d'eau apportés, par hectare et par période de temps, différents. Cette nouvelle gamme de cultures C_2 doit permettre d'inclure dans le modèle les situations où le tour d'eau se retarde et crée un dommage aux cultures.

Cette manière de solutionner le problème est cependant loin d'être parfaite : la détermination ces chiffres d'affaire des cultures C_2 n'est pas satisfaisante dans le sens où nous avons dû regrouper sous une même valeur du chiffre d'affaires des situations très différentes. Les retards d'irrigation n'ont en effet pas les

mêmes conséquences selon leur occurrence dans le cycle de croissance : les stress hydriques se produisant pendant ou après la floraison sont nettement plus dommageables que ceux apparaissant en début cycle pendant la phase végétative. Cette nuance n'apparaît pas dans le modèle. Deux situations qui représentent respectivement des stress hydriques légers ou dramatiques : 5 jours de retard en début de cycle ou 15 jours de retard au moment de la floraison, sont affectés, dans le modèle, de pénalisations identiques sur le chiffre d'affaires.

L'introduction d'un itinéraire technique alternatif pour chaque culture, caractérisé par un calendrier d'irrigation moins exigeant, représente une solution qui, bien qu'imparfaite, permet cependant de représenter dans le modèle un phénomène  important du fonctionnement des puits collectifs : l'éventualité d'une distribution d'eau chronologique (et non quantitative) défaillante et la pénalisation conséquente sur le producteur.

Interprétation et perspectives : expression du Risque sur la disponibilité chronologique de l'eau

Lors des simulations, la part des cultures C_1 apparaissant dans la solution permettra de quantifier le nombre d'hectares que le puits peut irriguer convenablement en temps et en quantité. Cela peut former un élément de comparaison entre plusieurs simulations pour déterminer quelle situation permet d'irriguer au mieux la plus grande surface.

En revanche la part relative des cultures C_2 ne peut pas aisément être interprétée. Nous avons déjà vu que les chiffres d'affaires des cultures C_2 n'avaient pas une grande signification en terme de valeur économique et n'avaient qu'un but « qualitatif » de signifier une perte de bénéfice par rapport aux cultures C_1 .

De plus, il faut tenir compte d'un biais lié au choix du type de modèle lui-même. Le modèle travaille en disposant d'une information sur la disponibilité en eau. Au contraire, dans la réalité, les agriculteurs ne savent pas, au moment du semis, s'il y aura retard ou non et si ce retard sera conséquent ou insignifiant sur le chiffre d'affaires. Là où, dans la réalité, un agriculteur sème un ha de blé en décembre en ignorant s'il y aura un stress hydrique au cours du cycle, le modèle peut lui opter pour « n'avoir rien semé » car il aura au préalable calculé que ce blé ne sera pas rentable.

On en conclut donc que seule la part de cultures C_1 sera directement interprétable dans la solution du modèle. La présence de cultures C_2 ou de surfaces non cultivées dans la solution indiquera l'existence d'un stress hydrique et d'une pression forte sur l'eau. En revanche, la part relative de l'une et l'autre de ces surfaces ne sera pas interprétable.

II – Agrégation des modèles individuels, construction du modèle collectif

1 – Application des concepts d'agrégation

A – Typologie et agrégation des modèles individuels de Los Lobos

Agrégation des modèles individuels

Une typologie a été construite pour chaque groupe sur la base de paramètres relatifs à la situation familiale, financière et économique des exploitants et la disponibilité en différentes ressources naturelles pour chacun d'entre eux. Six types d'agriculteurs ont ainsi été identifiés dans le groupe de Los Lobos, qui regroupent l'ensemble des membres du puits. Nous les avons réunis sous la dénomination « d'individus » et créé l'ensemble I des individus. Dans notre travail, un « individu » signifie un groupe d'agriculteur du même type. Les groupes identifiés à Los Lobos comptent chacun 2 à 4 agriculteurs. (Cf. partie I, V, 1-A et Annexe 7)

L'agrégation est le regroupement dans un modèle unique des agriculteurs du même «type». Lors de l'agrégation, le modèle individuel de base préalablement construit a été adapté à chaque type d'agriculteurs grâce à la combinaison particulière de paramètres qui lui correspond (Cf. supra), et par la mise en commun des ressources «quantitatives» : terres, main-d'œuvre... dans notre travail toujours, nous appelons ce modèle agrégé un «modèle-type».

« L'agrégation a tendance à surévaluer le profit en raison d'une surestimation de la mobilité des facteurs ». Il est vrai qu'on permet au modèle lors de l'agrégation, d'utiliser des ressources qui sont mises en commun de façon fictive entre différents agriculteurs d'un même groupe. Dans la réalité, ces ressources ne sont pas des ressources communes, mais bien spécifiques à chaque exploitation. Nous avons vérifié que le biais d'agrégation pour chacun des individus I1 à I6, était ici acceptable et éventuellement réajusté certains paramètres à la baisse (ceux de trésorerie notamment) lorsque nécessaire.

Construction du modèle collectif

Ces modèles-type I1,...I6 ont ensuite été regroupés dans un même modèle : le modèle «collectif». Le modèle collectif représente l'ensemble du groupe d'agriculteurs de Los Lobos. Dans le modèle collectif, toutes les caractéristiques individuelles des groupes d'agriculteurs, tous les paramètres de disponibilité en ressources (à l'exception de la ressource en eau), ainsi que les variables de calcul vont être indexés par l'ensemble I.

On rappelle que l'indexation d'un paramètre ou d'une variable par un ensemble E signifie que la valeur du paramètre ou de la variable dépendra de l'élément de E auquel ils se rapportent. Ainsi, l'indexation par l'ensemble I des individus permet simplement dans le modèle collectif de ré-attribuer ses caractéristiques individuelles à chaque individu. Par exemple, le paramètre de disponibilité en terre DTERRE deviendra DTERRE (I), ce qui permet d'affecter des valeurs différentes à chaque groupe : $DTERRE(I_1) = 11$ ha, $DTERRE(I_2) = 4$ ha, ... La disponibilité en eau en revanche ne sera pas indexée par Individu. Le paragraphe ci-dessous traite à part le cas très particulier de l'eau.

B – Indexation des ressources et partage de l'eau

Lors de l'agrégation en modèle collectif, les disponibilités individuelles des groupes I en diverses ressources : terre, main-d'œuvre, trésorerie initiale... sont conservées au même niveau que dans les modèles types. L'eau en revanche est une ressource commune. Tout l'intérêt de la construction des modèles collectifs réside dans l'observation des conséquences du partage de cette ressource.

La contrainte quantitative EAU a été intentionnellement maintenue inactive dans les modèles individuels. En effet, le groupe accorde à chaque membre une part de la ressource collective mais sans qu'il y ait une détermination précise du volume accordé à chacun. Nous avons par conséquent préféré ne pas le limiter de façon arbitraire dans le modèle : chaque modèle individuel fonctionne donc comme si l'exploitation disposait individuellement de la totalité de l'eau du puits

En revanche, dans le modèle collectif, la disponibilité en eau va devenir contraignante, le même volume d'eau disponible étant cette fois partagé par l'ensemble des utilisateurs. C'est ce qui explique que les paramètres DES et DEQ, respectivement Disponibilité en Eau par Semaine et Disponibilité en Eau par Quinzaine ne doivent pas être indexés par I lors du passage au modèle collectif, contrairement aux autres paramètres de disponibilité en ressources : ils doivent exprimer au contraire la disponibilité collective d'une ressource collective.

Un autre problème se pose vis-à-vis de l'eau : le modèle collectif doit permettre d'étudier les effets du partage quantitatif de l'eau, mais il doit également s'attacher aux effets des règles d'organisations collectives qui gèrent ce partage et notamment le tour d'eau. Ces différentes règles ont été décrites et analysées (Cf. partie I, IV, 2 - B). La manière dont nous avons essayé de modéliser les différents aspects collectifs du puits autour de la ressource en eau est développée dans le chapitre suivant (Cf. partie 2, II, II-C).

2 – Etapes de construction du modèle collectif

Ce chapitre développe certains points de la construction du modèle collectif. La représentation du tour d'eau, qui est un aspect particulièrement significatif du fonctionnement collectif des puits, a fait l'objet d'une réflexion approfondie. Ce point est détaillé largement dans le paragraphe 2 – C.

A – Traitement du risque dans le modèle collectif

Le traitement du risque dans le modèle collectif conserve les caractéristiques que nous lui avons données dans le modèle individuel, à savoir : traitement non linéaire, utilisation de l'écart-type comme indicateur de variabilité et intégration dans la fonction objectif. Nous avons vu (partie 2, II, 1-A) que les variables de revenus moyens et aléatoires sont indexées dans le modèle collectif par I : $RmI(I)$ et $Ral(E,I)$ ainsi que les coefficients d'aversion au risque a . Le modèle collectif fonctionne en maximisant la somme des revenus moyens individuels $RmI(I)$ et en minimisant simultanément les variations des Revenus aléatoires individuels $Ral(E,I)$ pondérées par les coefficients $a(I)$ d'aversion au risque. La fonction-objectif du modèle, qui définit la variable Z à maximiser, s'écrit de la manière suivante :

$$FO : Z = \sum_i RmI_{(i)} - a_{(i)} * ECTYPE_{(i)}$$

Critique du traitement du risque dans le modèle collectif

L'interprétation des résultats du modèle agrégé collectif diffère un peu de la logique utilisée pour le modèle individuel : la pondération de l'écart-type par le coefficient a n'est plus liée directement avec le RmI de l'individu correspondant.

Il y a un effet de synergie autour de la maximisation des revenus qui fait que l'importance relative profit / prise de risque, propre à chaque individu n'est plus parfaitement respectée. Le modèle fonctionnera effectivement comme s'il y avait «concertation» entre les agriculteurs pour maximiser le revenu global, ce qui n'est bien sûr pas le cas dans la réalité. On observera par exemple en utilisant le modèle collectif que dans certaines conditions, la solution optimale proposée par le modèle fait qu'un individu «sacrifie» son revenu individuel pour maximiser le revenu du groupe. De tels comportements sont bien sûrs tout à fait irréalistes et il faudra tenir compte de ce facteur lors des analyses des simulations.

B – Système de paiement de l'eau : mise en équation

Dans les modèles individuels, nous avons calculé la facture «eau» d'une exploitation simplement en multipliant la consommation individuelle en eau par le prix du m^3 d'eau. Cette méthode de calcul directe n'est pas représentative du système de paiement à l'hectare (Cf. partie 1, IV, 2-D) dans lequel les factures se calculent en fonction de la consommation d'eau totale de la collectivité. Le système forfaitaire, basé sur la consommation du groupe, ne peut donc pas se modéliser de façon adéquate dans un modèle individuel. Il peut en revanche être correctement représenté dans le modèle collectif.

Le système de paiement par hectare étant utilisé dans le puits de Los Lobos, nous avons donc cherché à le représenter dans le modèle collectif : Le calcul de la facture d'eau individuelle de chaque membre du groupe, se fait à partir de la consommation totale en eau du puits. Les équations de calcul nécessaires ont donc été introduites dans le modèle, pour obtenir le coût d'eau par hectare irrigué :

- calcul de la consommation en eau totale du groupe (somme des consommations individuelles)
- calcul de la facture eau totale du groupe (consommation totale par le prix du m^3 d'eau)
- calcul de la facture eau par unité de surface cultivée (facture totale sur surface totale cultivée)

La variable ainsi obtenue représente ce que chaque membre du groupe paye par hectare qu'il irrigue. Multipliée par la surface cultivée, elle détermine la facture de chaque individu.

NB : Dans ce cas, la facture en eau n'est plus introduite dans la formule de calcul de la marge brute de la culture. Ce facteur dépend en effet des variables des consommations en eau des autres individus. La facture eau est par conséquent déduite directement de la formule du revenu dans les modèles collectifs.

C – Modélisation du tour d'eau

Difficulté rencontrée

Nous avons vu que, dans un puits collectif, l'accès à l'eau était géré par des règles plus ou moins strictes (Cf. partie 1, IV, 2-C). La distribution chronologique de l'eau, appliquée dans le tour d'eau, est un aspect très important du fonctionnement en collectivité. Une simple limite quantitative de la disponibilité collective en eau ne suffit pas à représenter de façon exhaustive la complexité de la contrainte qui pèse sur l'utilisation collective de l'eau. Nous avons donc cherché, dans le modèle collectif, à représenter l'aspect temporel de la distribution de l'eau.

Solution proposée

Ce travail s'est basé sur l'étude du puits de Los Lobos où le tour d'eau est particulièrement rigide. Pour modéliser une contrainte temporelle sur l'eau, il faut créer un paramètre de disponibilité en eau qui dépende à la fois de la période temporelle et de l'individu : concrètement, nous avons créé dans le modèle des paramètres doublement indexés : index par période temporelle (ensembles S ou Q) et index par individu (ensemble I) : $DESi(S,I)$ et $DEQi(Q,I)$.

Ont été introduites également les équations de contraintes supplémentaires pour utiliser mathématiquement ces nouveaux paramètres.

1) Répartition de l'eau entre les différents membres du groupe à l'échelle de la semaine

Le paramètre $DESi(S,I)$ que nous avons créé représente le moyen d'attribuer la ressource en eau en fonction de la période S et de l'individu I. Au sein d'une période S donnée, nous pouvons choisir d'attribuer l'eau à une sélection d'agriculteurs et d'en interdire l'accès aux autres, en faisant varier la valeur du paramètre $DESi(S,I)$. Ceci revient à reproduire un tour d'eau. Le modèle Los Lobos va donc comprendre dorénavant deux contraintes sur la disponibilité d'eau hebdomadaire, qui utilisent chacune un des paramètres DES et $DESi$.

☐ Une contrainte indexée par S et I

Elle stipule que la consommation d'un individu I donné, pendant une semaine S donnée ne peut pas dépasser la valeur du paramètre $DESi(S,I)$.

Cette valeur sera nulle si l'individu concerné ne possède pas la main d'eau ou égale à la capacité volumique hebdomadaire du puits si l'agriculteur possède la main d'eau pendant la période S.

☐ Une contrainte indexée par S uniquement

Elle stipule que la totalité des consommations en eau du puits, pour tous les utilisateurs réunis, pour une semaine S donnée, ne peut pas dépasser la capacité volumique hebdomadaire du puits (valeur du paramètre $DES(S)$). Cette contrainte est plus stricte d'un point de vue quantitatif que la première.

Le tableau 17 ci-après donne les valeurs du paramètre de disponibilité hebdomadaire en eau $DESi(S,I)$, de chaque groupe d'agriculteur I, tel qu'il a été entré dans le modèle collectif de Los Lobos. Nous avons effectué cette distribution en respectant au mieux les observations du terrain en ce qui concerne les dates de semis, de début et de fin des irrigations. Quelques ajustements ont dû être faits pour s'adapter au découpage temporel du modèle.

2) Répartition de l'eau entre les différents membres du groupe à l'échelle de la quinzaine Q

Si le volume d'eau extrait du puits en deux semaines n'est pas entièrement utilisé par le groupe d'agriculteurs I ayant la main d'eau, cela se traduit dans le modèle par une disponibilité DEQ qui n'est pas nulle. Il est alors possible que le modèle choisisse d'exploiter cette disponibilité en eau en implantant des cultures de l'ensemble C_2 (dont la caractéristique est que les besoins en eau ont été définis sur Q uniquement).

Le modèle peut alors attribuer ces surfaces C_2 aux individus selon des critères d'optimisation indépendamment du tour d'eau mis en place avec les DESi. Les individus ayant la main d'eau sont prioritaires mais s'ils n'utilisent pas la totalité de l'eau, ou autrement dit du temps d'irrigation qui leur est accordé, d'autres individus peuvent en profiter.

Dans la réalité, cette solution serait «techniquement» possible, surtout pour des petites surfaces. Cela reviendrait à imbriquer des irrigations intermédiaires sur des petites surfaces maraîchères par exemple à l'intérieur du tour d'eau sur les céréales. Cependant il faut tenir compte qu'existe un obstacle «institutionnel» à Los Lobos : les règles de fonctionnement interne du puits de Los Lobos ne permettent pas d'irrigations intermédiaires par des agriculteurs n'ayant pas officiellement la main dans le tour d'eau.

Cette rigidité du fonctionnement doit apparaître dans le modèle. Il faut expliciter que le tour d'eau désigne, de manière exclusive, les agriculteurs ayant accès à l'eau pendant une période de temps donnée. Pour cela, nous appliquons la démarche exécutée sur l'ensemble S à l'ensemble Q (Cf. 1) de ce même chapitre) :

- Création d'un paramètre $DEQ_i(Q,I)$ indexé par les ensembles de périodes Q et d'individus I
- Attribution de valeurs à DEQ_i en prenant garde à respecter la concordance avec la distribution mise en place sur les périodes S.
- Mise en équations des attributions d'eau dans des équations de contraintes.

Ainsi, l'eau sur une période de 2 semaines reste réservée exclusivement aux agriculteurs ayant la main d'eau, même dans le cas où la capacité volumique du puits permettrait l'introduction de courtes irrigations intermédiaires. Ceci représente mieux la rigidité du tour d'eau de Los Lobos

3 – Validation du modèle collectif Los lobos

Le modèle collectif de Los Lobos que nous avons construit va constituer le modèle Los Lobos de base (modèle A1) pour réaliser des simulations. Il est construit sur le fonctionnement actuel et les caractéristiques observées sur le terrain et doit donc théoriquement nous renvoyer l'image du puits de Los Lobos tel qu'il est actuellement. La validation du modèle est donc nécessaire avant d'entreprendre le travail de simulations.

A – Présentation des résultats du modèle

Le tableau suivant donne quelques paramètres quantitatifs qui permettent une comparaison rapide entre la solution du modèle collectif et les données de terrain.

Tab 17 : Disponibilité hebdomadaire en eau par individu et pour le groupe, modèle Los Lobos

Individus surface →	I1 11ha	I2 4 ha	I3 6 ha	I6 4 ha	I4 12 ha	I5 17 ha	Limite de la Consommation Totale I1+I2+I3+I4+I5+I6 (m ³)
Semaines du cycle OI							
S ₁	~	~	~	~	~	~	24 192 *
S ₂	~	~	~	~	~	~	24 192
S ₃	~	~	~	~	~	~	24 192
S ₄	~	~	~	~	~	~	24 192
S ₅					////// /		24 192
S ₆					////// /		24 192
S ₇	////// /	////// /	////// /	////// /			24 192
S ₈	////// /	////// /	////// /	////// /			24 192
S ₉						////// /	24 192
S ₁₀						////// /	24 192
S ₁₁					IIIIII II		24 192
S ₁₂					IIIIII II		24 192
S ₁₃	IIIIII I	IIIIII II	IIIIII II	IIIIII II			24 192
S ₁₄	IIIIII I	IIIIII II	IIIIII II	IIIIII II			24 192
S ₁₅					////// /	IIIIII II	24 192
S ₁₆					////// /	IIIIII II	24 192
S ₁₇	////// /	////// /	////// /	////// /			24 192
S ₁₈	////// /	////// /	////// /	////// /			24 192
S ₁₉						////// /	24 192
S ₂₀						////// /	24 192
S ₂₁	~	~	~	~	~	~	24 192
...	~	~	~	~	~	~	24 192
S ₂₈	~	~	~	~	~	~	24 192

* Pour un débit de 40 l/s, le volume disponible en une semaine est de 24 192 m³

////// /	Tour d'Eau 1 ^e irrigation
IIIIII	Tour d'Eau 2 ^e irrigation
////// /	Tour d'Eau 3 ^e irrigation
	Agriculteur ne possédant pas la main d'eau
~	Période hors Tour d'Eau (avant semis cycle OI)

Tab. 18 - Tableaux comparatifs entre la solution du modèle A1 et les observations de terrain

Critères de Validation	Observation de terrain*	Modèle collectif A1
Surface pouvant être irriguée de manière optimale par le puits (1)	46,70 ha	44,30 ha
Surface en luzerne	5-6 ha	5,30 ha
Forfait de paiement à l'ha	950 p / ha	1100 p / ha

*Ces valeurs correspondent à des approximations d'après enquêtes (Cf. CHAP E)

Le critère de surface que nous avons jugé le plus pertinent pour la validation du modèle est, dans notre cas, le critère (1) : la surface que le puits peut irriguer de manière optimale, c'est-à-dire en respectant correctement le calendrier d'irrigation des cultures. (L'indicateur de « surface totale irriguée » pouvant, lui, donner lieu à des interprétations légèrement erronées. (Cf. CHAP F, II-D). Ce critère (1) correspond, dans la réalité, à la part des surfaces irriguées par le puits qui ne subit pas de retard du tour d'eau. Au niveau du modèle, ce critère correspond aux surfaces de l'ensemble C₁

B – Analyse et critiques

Surestimation de la pression sur l'eau

La comparaison entre les observations de terrain et la solution du modèle A1 semble montrer que la solution du modèle « exprime » une pression sur l'eau légèrement plus forte que dans la réalité. On note en effet dans la solution à la fois une facture à l'hectare plus élevée et une surface de culture irriguée (1) légèrement plus faible que dans la réalité. Ces écarts entre la solution du modèle et les données de terrain peuvent avoir pour origine diverses approximations qui ont été admises au cours du travail de modélisation :

- Surévaluation des surfaces emblavées

Ceci est sans doute un facteur d'erreur important. Lors des enquêtes, les agriculteurs nous ont donné les superficies « officielles » de leurs parcelles, correspondant aux titres de propriété. Ces surfaces peuvent différer considérablement des superficies emblavées : chemin pour le tracteur, fossé d'irrigation, construction d'une habitation... sont autant de réductions de la surface réellement semée. La différence peut atteindre 10 % (CEAR, com. pers.).

- Sous-évaluation du coefficient k d'efficacité d'irrigation

Nous avons fixé des valeurs autour de 0.6, allant de 0.55 à 0.65 selon les utilisateurs. Avec des coefficients k légèrement supérieurs, on obtient une surface irriguée (1) et une valeur du paiement à l'hectare plus proches de ceux observés sur le terrain. Nous n'avons pas souhaité cependant utiliser des coefficients d'irrigation supérieurs à 0.65, ce qui correspond déjà à une valeur optimiste des efficacités d'irrigation pour notre zone d'étude.

- Surévaluation du prix du m³ d'eau.

La valeur utilisée correspond à une approximation entre le coût connu pour d'autres puits de la zone, et les résultats du diagnostic du CEAR qui ont fait état d'une faible efficacité électromécanique de la pompe. Il est possible que ce prix ait été légèrement surévalué.

Redistribution approximative des surfaces individuelles

On remarque toujours dans le tableau 18 que, si la proportion globale luzerne / orge est identique, dans la solution, à celle observée sur le terrain, les répartitions individuelles ne sont pas parfaitement respectées. Par exemple, le groupe I₃ apparaît comme producteur de luzerne dans le modèle alors qu'il ne l'est pas dans la réalité, du moins pendant le cycle OI 2003. Nous pensons à deux explications complémentaires :

- La construction de la fonction-objectif dans le modèle collectif

Elle peut expliquer en partie ces écarts du modèle par rapport à la réalité. Le modèle fonctionne en effet comme si une concertation avait lieu entre les membres du puits dans le but de maximiser le revenu global du groupe. Le point a été abordé dans le chapitre traitant de la construction du modèle collectif (Cf. chap VII, II-A). Lors de cette concertation « fictive », les cultures sont distribuées entre individus d'une manière qui peut légèrement différer de la situation réelle, car la distribution tient compte de l'objectif d'optimisation, donc de la rentabilité des cultures et de la capacité des différents agriculteurs à maximiser le revenu global. L'ampleur de cette redistribution reste néanmoins limitée par les contraintes personnelles des agriculteurs.

- Approximation sur les surfaces de luzerne

Ce phénomène peut avoir été accentué par le caractère très versatile des productions de luzerne à l'intérieur du puits (Cf. Chap V, II-A), qui explique qu'il a été relativement difficile caractériser dans le modèle les non-producteurs de luzerne par rapport aux producteurs.

Conclusion

La comparaison entre le modèle collectif de Los Lobos, modèle A1 et les données de terrain fait apparaître certains écarts au niveau des variables quantitatives et dans les répartitions individuelles céréales/fourrage. Cependant, l'ampleur des différences modèle/réalité reste limitée et il y a une adéquation satisfaisante sur les grandes tendances : répartition globale de l'assolement, coût de l'irrigation à l'hectare autour de 1000 p, capacité du puits en terme de surface irrigable ... De plus, nous avons cerné les approximations et identifié les caractéristiques intrinsèques au modèle susceptibles d'avoir engendré ces marges d'erreur. Nous avons donc jugé au terme du travail de validation que le modèle et les résultats obtenus nous semblaient suffisamment conformes à la réalité de terrain pour utiliser le modèle plus amplement. Une certaine vigilance sera néanmoins nécessaire lors de l'interprétation des résultats des simulations, comme nous le verrons par la suite.

Troisième partie :

Critique du modèle construit, utilisation comme outil d'analyse et de prospective socio-économique

I - Potentialité du modèle comme outil d'analyse et de prospective socio-économique

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'utiliser le modèle construit comme outil d'analyse socio-économique à partir de la réalisation de simulations. Quelques exemples de scénarios de simulations qui nous ont paru intéressants dans le contexte actuel de la région y sont présentés, avec la mise en équation des simulations et les résultats obtenus.

Nous nous attachons à conserver un regard critique lors de l'étude de ces résultats afin de discerner d'éventuelles « perturbations » provenant de caractéristiques intrinsèques du modèle et d'expliquer la signification réelle des résultats à la lumière de critiques qui peuvent être faites du modèle.

Nous rappelons qu'à ce niveau, il nous a semblé plus simple et plus digeste aux yeux d'un lecteur de ne présenter les résultats que d'un seul modèle ce qui permet de conserver toujours le même élément de comparaison. Le modèle utilisé est celui de Los Lobos.

1 – Proposition de scénarios à partir du modèle collectif de Los lobos

Nous avons choisi de montrer deux exemples d'utilisation du modèle comme outil de simulation et d'étude prospective, dans ce que nous appelons les scénarios A et B. Dans le scénario A, nous cherchons à montrer comment le modèle peut servir à évaluer différentes règles de gestion collective de l'eau au sein des puits collectifs. Le scénario B évalue le modèle comme outil d'analyse des politiques de l'eau, dans un contexte de crise écologique et de surexploitation des ressources.

Scénario A : le modèle comme outil d'évaluation de différentes règles de gestion collectives de l'eau

Nous avons vu que les contraintes engendrées par la collectivité et l'utilisation commune de la ressource en eau étaient susceptibles de modifier plus ou moins fortement les stratégies individuelles et d'influer au final sur la consommation en eau totale du périmètre irrigué. Le scénario A va nous permettre de jouer sur les différentes contraintes collectives que nous avons identifiées et modélisées afin d'observer les conséquences au niveau économique : viabilité des exploitations, et écologique : réduction de l'eau consommée.

Le modèle de Los Lobos nous a semblé être l'outil le plus pertinent pour étudier l'impact des contraintes collectives sur les choix et stratégies des agriculteurs membres de puits collectifs. En effet, nous rappelons qu'à Los Lobos, les contraintes collectives sont très pesantes : l'organisation du tour d'eau, le type de facturation, le manque de « démocratie » même au sein du groupe, en font un puits où l'agriculteur a finalement assez peu de marge de décisions en ce qui concerne les choix des cultures et des techniques. Le puits de San Juan présentait au contraire des caractéristiques organisationnelles opposées (Cf. chap V, Conclusion).

Nous proposons donc d'utiliser le modèle pour réaliser des observations sur différents niveaux de contraintes collectives. Le premier scénario A représentera donc le desserrement progressif des contraintes collectives dans le modèle de Los Lobos, pour aboutir à un fonctionnement plus souple, du type de celui observé à San Juan.

Des nombreuses simulations sur le fonctionnement collectif peuvent être réalisées dans la même visée. Il aurait par exemple été possible de tester non pas l'assouplissement du fonctionnement collectif, mais au contraire sa rigidification : nous avons vu qu'il existait, dans certains puits, des règles d'allocation quantitative limitant l'accès à l'eau de chacun des membres (Cf Chap IV, II-C). Il serait possible de tester avec le modèle A1 l'effet de la mise en place d'un quota individuel sur l'eau : (limitation à un certain nombre d'heures d'irrigation) par exemple et d'observer si la consommation en eau globale diminue sans trop affecter les revenus des agriculteurs.

Proposition scénario B : le modèle comme outil d'analyse des politiques de l'eau

Une utilisation courante des modèles économiques est de chercher à prévoir les réactions probables des agents économiques, face une modification de leur environnement global : politique, économique ou naturel. Dans ce cadre, et en rapport avec la préoccupation générale vis-à-vis de l'état des nappes phréatiques de la zone, il nous a semblé intéressant de réaliser un scénario de simulations mettant en scène l'apparition d'une limitation très stricte de la disponibilité de la ressource en eau. Dans ce second scénario, B, nous mettrons en parallèle les résultats de deux modèles représentant des fonctionnements collectifs opposés, pour observer et comparer comment, dans chaque cas, les agriculteurs réagissent à la restriction sur l'eau qui leur est imposée.

Dans chacun des deux scénarios A et B, les sorties de résultat qui nous intéressent concerneront deux axes : d'une part le revenu, et d'autre part le volume d'eau consommée et sa rentabilité. Ces résultats seront toujours développés aux deux niveaux individuel et collectif.

2 – Scénario A : évaluation de différentes règles de gestion collectives de l'eau

A – Pertinence du scénario A dans le contexte actuel

Plusieurs agriculteurs du puits de Los Lobos ont exprimé, lors des entretiens, le souhait d'un changement dans l'organisation du groupe. Les revendications viennent parfois du fait qu'ils estiment consommer moins d'eau que leurs voisins et se sentent pénalisés par la facturation forfaitaire à l'hectare ou bien qu'ils désirent diversifier leurs productions vers des cultures horticoles ou encore parce qu'ils ne sont pas satisfaits des retards du tour d'eau et qu'ils estiment que la distribution pourrait être mieux optimisée.

Les premières simulations que nous nous proposons de réaliser, dans le scénario A, représentent des modifications du règlement interne qui permettraient de donner plus de souplesse au fonctionnement collectif du puits et accorderaient davantage de marge de manœuvre aux agriculteurs. Nous avons identifié que la rigidité du puits provenait, schématiquement, de 3 principales règles internes : il s'agit de l'organisation du tour d'eau, du système de facturation et de l'exclusion des cultures horticoles dans la sole. Il faut cependant garder à l'esprit que dans la réalité, ces 3 aspects sont étroitement liés et difficilement dissociables les uns des autres.

Nous allons simuler dans ce 1^{er} scénario le desserrement de chacune de ces contraintes, en tenant compte au mieux de leur imbrication, pour essayer de représenter un déroulement plausible qui pourrait avoir lieu dans la réalité à Los Lobos.

B – Description et réalisation des étapes de simulation

Le scénario A se déroule en plusieurs étapes de simulations, en partant du modèle de Los Lobos dans son fonctionnement actuel pour arriver à un fonctionnement du type de celui que l'on trouve à San Juan. La dernière simulation A4 va un peu plus loin qu'une simple modification du fonctionnement interne du puits puisqu'on y inclut la possibilité d'implanter des cultures horticoles sous contrat. Ce point est détaillé plus bas.

Simulation A1

Le modèle A1 est le modèle initial représentant le puits de Los Lobos tel qu'il fonctionne actuellement. Nous y avons donc représenté un tour d'eau rigide, un système de paiement basé sur la consommation collective et un choix de culture restreint à l'orge, au blé et à la luzerne.

Simulation A2

- La simulation A2 représente un début d'assouplissement du tour d'eau. Nous conservons une distribution hebdomadaire de l'eau clairement définie pour chaque utilisateur, qui reste la règle de distribution d'eau prioritaire.

En revanche, à la différence du modèle précédent, on laisse dorénavant la possibilité à des utilisateurs n'ayant pas forcément la main d'eau, une période Q, d'utiliser ce qu'il reste de la ressource en eau, une fois les « utilisateurs prioritaires » servis. Les « utilisateurs prioritaires » sont définis par la règle de distribution hebdomadaire. Des irrigations intermédiaires peuvent donc venir s'intercaler dans le tour d'eau principal dessiné à la base pour les céréales.

- L'introduction de cultures horticoles accompagne logiquement cette première étape.

En effet, la prohibition des cultures autres que fourrages et céréales, dans le puits de Los Lobos, n'est pas une règle formulée explicitement par le groupe. Officiellement, l'absence de cultures horticoles découle de la rigidité du tour d'eau, associée implicitement à un blocage par certains membres. Nous faisons donc l'hypothèse qu'avec l'assouplissement du tour d'eau, un consensus a également été obtenu pour les cultures horticoles.

Cependant, à cette étape, dans le modèle, seule l'introduction de cultures horticoles de l'ensemble C_2 est possible, car la disponibilité supplémentaire en eau que le puits vient d'acquérir n'est accordée qu'à l'échelle de la quinzaine et non de la semaine.

- Enfin, nous avons également introduit le système de paiement P2, paiement à l'heure, proportionnel au volume d'eau consommé.

En effet, une source d'hétérogénéité importante dans les consommations d'eau à l'hectare ayant été introduite par le biais l'introduction de cultures horticoles, nous avons considéré que cette étape ne pouvait pas s'accomplir sans introduire simultanément un changement du système de facturation de l'eau. La formulation de cette simulation dans le modèle est détaillée dans l'encadré ci-dessous.

Mise en Equation de la Simulation A2

- En ce qui concerne le tour d'eau, la simulation consiste principalement à désactiver l'équation de contrainte d'eau individuelle sur Q. De cette manière, le modèle reçoit l'autorisation d'attribuer le volume d'eau DEQ d'une période Q donnée, à des individus n'ayant pas la main d'eau officielle à cette période, ceci sous la condition stricte de conserver la priorité aux utilisateurs ayant la main d'eau. Cette condition de priorité est exprimée dans le modèle au travers de l'équation de contrainte individuelle hebdomadaire sur l'eau, qui, elle, reste encore active et qui indique à l'échelle de la semaine à quels individus revient la main d'eau.
- La mise en équation du passage à un système de paiement à l'heure se fait simplement en modifiant la formule de calcul de la marge brute et des revenus aléatoires, à l'inverse de ce que nous avons fait pour mettre en équation le système de paiement à l'hectare (Cf. partie I, III, 2 – B).
- L'introduction des cultures horticoles C_2 se fait naturellement avec la désactivation de la contrainte d'eau individuelle sur Q.

⇒ Concrètement la simulation A2 permet de représenter :

Un puits où l'irrigation des céréales reste prioritaire, grâce au tour d'eau défini par semaine et par utilisateur, mais où il devient possible pour tout membre du puits d'irriguer aussi en dehors des temps « officiels » du tour d'eau, dès lors que la priorité à ceux ayant la main d'eau officielle a été respectée.

Ainsi des irrigations courtes peuvent s'intercaler entre les irrigations sur céréales. L'accès à des irrigations intermédiaires en plus de celles du tour d'eau va éventuellement permettre l'introduction de cultures maraîchères, dont on a vu que le calendrier d'irrigation demandait un retour de l'eau plus fréquent que sur céréales. Cependant, toujours dans le cadre de la simulation A2, ces cultures ne peuvent pas avoir une garantie que leur calendrier d'irrigation sera optimal étant donné qu'en cas de besoins simultanés, la priorité ira toujours aux céréales.

Simulation A3

Cette étape représente la mise en place d'un tour d'eau complètement souple, où il n'y a plus de distribution chronologique imposée. La seule contrainte d'utilisation de l'eau devient la limite volumétrique imposée par le débit du puits. La facturation à l'heure et l'ouverture aux cultures horticoles sont bien sûr conservées. Les cultures horticoles de l'ensemble C_1 peuvent maintenant être utilisées aussi, la disponibilité en eau hebdomadaire du modèle n'étant plus dans cette étape réservée aux céréales et à la luzerne.

Mise en Equation de la Simulation A3

Dans le modèle, cela revient à supprimer également l'équation de contrainte d'eau individuelle sur S, qui définissait l'attribution hebdomadaire de l'eau.

Les seules équations de contraintes d'eau qui restent sont donc des contraintes purement quantitatives (non indexées par individu I), qui limitent la somme des consommations en eau des cultures aux valeurs des paramètres DES et DEQ.

Remarque : il faut remarquer que la simulation ici va plus loin, en terme de liberté accordée aux utilisateurs, que le maximum qui pourrait être accordé dans la réalité. En effet, dans la simulation A3, le modèle va pouvoir mettre en place une distribution « économiquement optimale » sans aucune condition d'équité entre les utilisateurs.

Pourtant, sauf cas exceptionnel, le bon sens et la solidarité du groupe garantissent toujours un minimum d'équité entre les utilisateurs et le droit à chacun d'essayer d'irriguer ses cultures aussi correctement que possible. Cependant, cette règle implicite ne repose sur aucune limite concrète et ne peut donc pas être facilement modélisée.

Simulation A4

Nous conservons le fonctionnement instauré dans la simulation A3, en introduisant cette fois une hypothèse supplémentaire : l'accès pour les agriculteurs du puits à des contrats avec des entreprises pour les cultures horticoles d'exportation.

Cette hypothèse n'est pas complètement étrangère au mode de fonctionnement du puits. Avant d'établir un contrat de culture avec un agriculteur membre d'un puits collectif, les entreprises d'exportation horticole s'assurent de la capacité du puits à assurer une bonne irrigation des futures cultures sous contrat. La garantie doit être donnée d'un point de vue technique, mais aussi sur le plan organisationnel, les entreprises se méfiant des ambiances conflictuelles au sein des groupes (Cf. parti I, IV, 1-E).

La simulation A4 repose donc sur une double hypothèse : 1) les agriculteurs ont trouvé une entreprise partenaire pour semer des cultures sous contrat, et 2) l'organisation flexible du tour est dorénavant acquise et permet de gérer harmonieusement des tours d'eau décalés.

Tab 19 : Tableau récapitulatif des étapes de simulations A

Simulation	Tour d'eau	Système de paiement	Cultures horticoles accessibles
A1	Rigide	A l'hectare	Aucune*
A2	Mi-souple	A l'heure	Horticulture hors contrat uniquement
A3	Souple		
A4			Toutes

* Le tour d'eau fixe ne permet pas l'introduction de cultures horticoles

C – Présentation et interprétation des résultats des simulations A

Tab. 20 - Indicateurs utilisés pour l'interprétation des résultats (valables pour les scénarios A et B)

RG	pesos	Revenu moyen global du puits (moyenne sur 40 Etats de Nature)
RmI	pesos	Revenu moyen d'un individu I (moyenne sur 40 Etats de Nature)
RmI' (*)	pesos	= RmI moins les prélèvements familiaux du cycle OI, (PFam) (*)
RG'	pesos	Somme des RmI'
ECTYPE	pesos	Ecart-type des RmI'
MOY RmI	pesos	Moyenne des RmI'
COEFF Variation		Ecart-type / Moyenne des RmI'
SFTot cult	ha	Surface totale cultivée et irriguée par le puits
SFTot x	ha	Surface totale de la culture X cultivée et irriguée par le puits
% Hortalisas		Part des cultures horticoles dans la sole du puits
CG EAU	m ³	Consommation d'eau globale du groupe pendant le cycle OI
FG EAU	pesos	Facture globale d'électricité, sur la consommation en eau totale
CI EAU	m ³	Consommation en eau d'un individu I pendant le cycle OI
RG' / CG EAU	pesos / m ³	Revenu RG' ramené à l'hectare
RmI' / CI EAU	pesos / m ³	Revenu RmI' ramené à l'hectare
CG EAU / SFTot cult	m ³ / ha	Moyenne des consommations en eau par hectare pour le puits
FG EAU / SFTot cult	pesos	Facture d'électricité globale ramenée à l'hectare

Remarque (*) : L'observation des résultats du modèle Los Lobos a montré que la prise en compte des prélèvements familiaux (PFam) dans le calcul du revenu était la principale cause de la valeur négative des variables de revenu RmI et RG dans le modèle A1. La valeur des PFam, donnée exogène fixe définie pour chaque type d'agriculteur I (Cf. Annexe 7), intervient effectivement dans les choix et décisions des agriculteurs. Il est donc logique d'en tenir compte dans la construction du modèle. Cependant, ces valeurs

négligentes rendant les interprétations plus compliquées, nous avons choisi, à cette étape, d'analyser les résultats plutôt sur la base des indicateurs RmI' et RG' qui contrairement à RmI et RG ne tiennent pas compte des PFam : $RmI' = RmI + PFam$, et $RG' = RG + PFam$. Ces indicateurs représentent donc exclusivement les résultats réalisés par l'activité agricole sans tenir compte du « coût » familial.

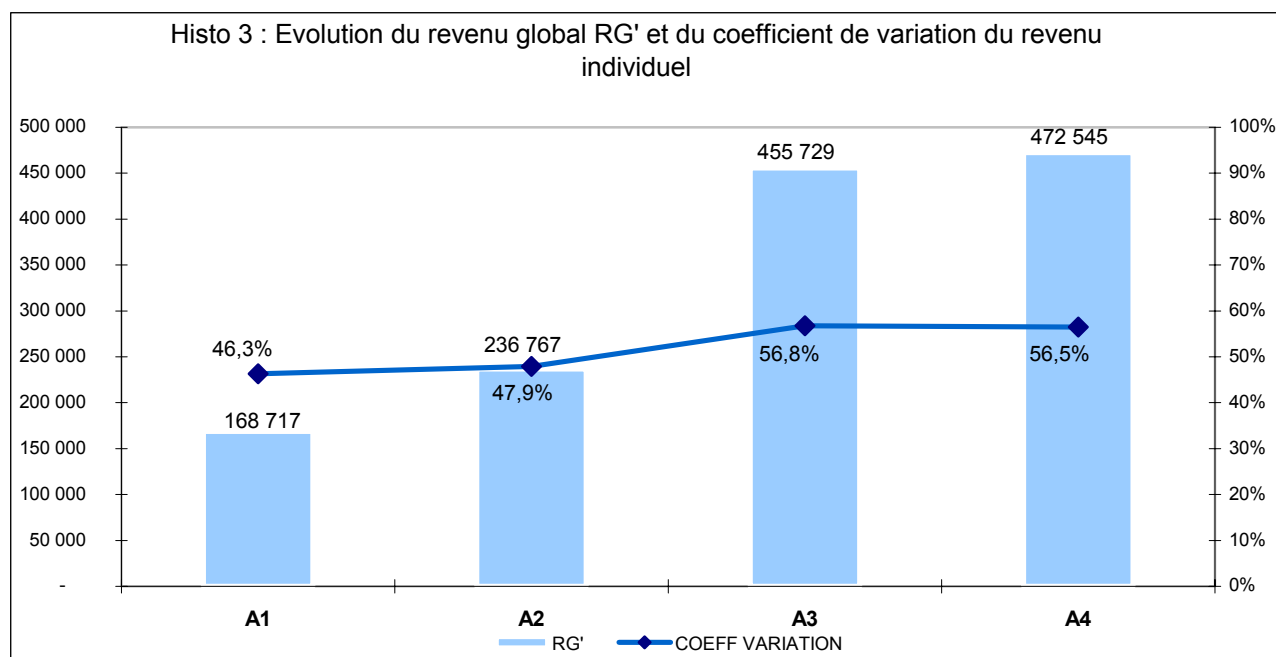
Présentation des résultats

Tab. 21 - Tableau des Résultats et Indicateurs pour l'analyse du scénario A

<i>Simulation</i>			<i>A3</i>	<i>A4</i>
	Rigidité		Souplesse	+ Horticulture sous contrat
RG'	168 717	236 767	455 729	472 545
RmI' I1	26 196	55 292	135 499	135 875
RmI' I2	18 987	22 206	33 080	36 632
RmI' I3	23 332	24 770	44 475	39 247
RmI' I4	43 522	56 113	116 214	119 133
RmI' I5	44 164	58 490	85 304	98 518
RmI' I6	12 516	19 895	41 158	43 139
ECTYPE	13 024	18 902	43 113	44 469
MOY RmI	28 120	39 461	75 955	78 757
COEFF VARIATION	0,4632	0,4790	0,5676	0,5646
SFTot cult (ha)	47,34	52,73	53,70	53,70
SFTot Céréales	42,04	34,15	28,31	15,79
SFTot Horticoles		8,24	24,92	36,19
SFTot Luzerne	5,30	10,34	0,47	0,72
% Cultures horticoles	0%	16%	46%	67%
CG EAU	325 596	374 856	340 148	344 504
FG EAU	52 095	59 977	54 424	55 121
RG' / CG EAU	0,52	0,63	1,34	1,37
CG EAU / SFTot cult	6 878	7 109	6 334	6 415

Observation 1 : Croissance du revenu global et amplification de la variabilité de revenus individuels
 Observation 2 : Pas d'augmentation significative de la consommation en eau du groupe
 Observation 3 : Forte amélioration de la rentabilité de l'eau avec l'augmentation de la proportion de cultures horticoles.

Observation 1 : Croissance du revenu global à chaque étape du scénario et amplification de la variabilité des revenus entre individus



- Les simulations montrent que l'assouplissement du fonctionnement collectif et l'introduction en parallèle de cultures horticoles sont susceptibles d'augmenter significativement l'espérance de gain du puits.
- Selon les résultats du modèle, la variable RG' (revenu global du groupe) subirait une hausse de 180 % entre A1 et A4, alors que parallèlement, la part des cultures horticoles passe de 0 à 67%. Le saut est le plus visible à l'étape A3, qui correspond en effet à la véritable introduction des cultures horticoles, avec l'abandon de la priorité du tour d'eau sur les céréales.
- La possibilité de cultiver des cultures horticoles sous contrat, en A4 ne provoque pas de changement majeur, mais une légère hausse de revenu global accompagné d'une moindre variabilité de revenu entre agriculteurs. L'impact est donc faible, mais positif en ce qui concerne ces deux aspects.
- L'ensemble des agriculteurs profite de ce gain, mais de façon inégale. On note que l'évolution positive de RG' s'accompagne d'une plus grande variabilité de revenus entre les agriculteurs du puits. Le coefficient de variation des revenus moyens individuels passe de 46% en A1 à presque 57 % en A3 et A4.

Deux explications possibles à ce phénomène :

1) Tous les individus ne profitent pas de la même manière de l'introduction des cultures horticoles : les critères d'âge, de disponibilité en trésorerie... modulent l'accès à ces cultures. Dans le cas A1 au contraire, tous les agriculteurs sèment la même culture : orge (ainsi qu'un peu de luzerne).

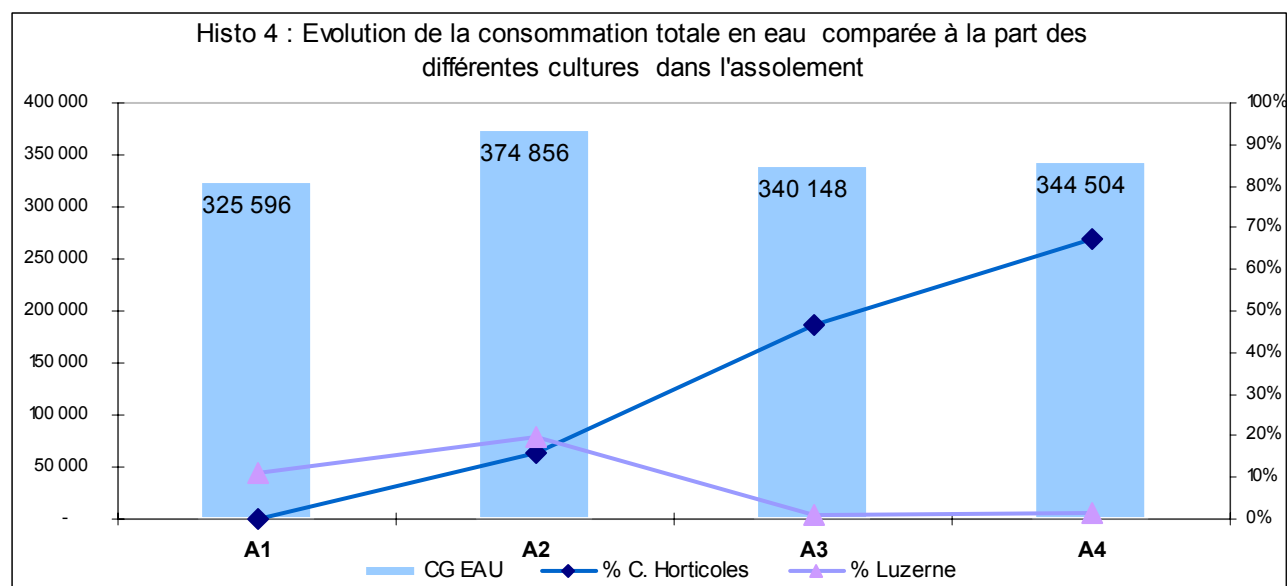
2) Deuxièmement, le scénario symbolise le passage d'un système «solidaire» à l'aspect collectif très poussé, à un système plus individualiste, avec l'abandon du paiement forfaitaire et de la «culture unique» de l'orge. Il est logique que cette transition s'accompagne d'un creusement entre les revenus les plus bas et les plus élevés.

Remarque : par curiosité, nous avons voulu voir l'impact précis de ce phénomène de «désolidarisation» en l'isolant du phénomène «introduction des cultures horticoles». Nous avons donc créé une simulation A2' identique à A2, mais avec une contrainte stricte interdisant les cultures horticoles.

A2' donne pour résultat : $RG' = 169\,087$, soit une hausse de 2 % du revenu global par rapport à A1, pour un coefficient de variation de 58 %, nettement plus élevé donc que pour les 2 simulations A1 et A2 (respectivement 46 et 48 %).

Conclusion : le passage au paiement au volume semble donc être la source principale du creusement des écarts de revenus entre agriculteurs. L'élargissement de la gamme des cultures, avec l'introduction de cultures horticoles, permettrait plutôt de diminuer les inégalités engendrées par le système « individualiste », chacun disposant en effet de davantage de marge de manœuvre pour établir une stratégie plus adéquate à ses moyens et besoins.

Observation 2 : Pas d'augmentation significative de la consommation en eau totale du groupe



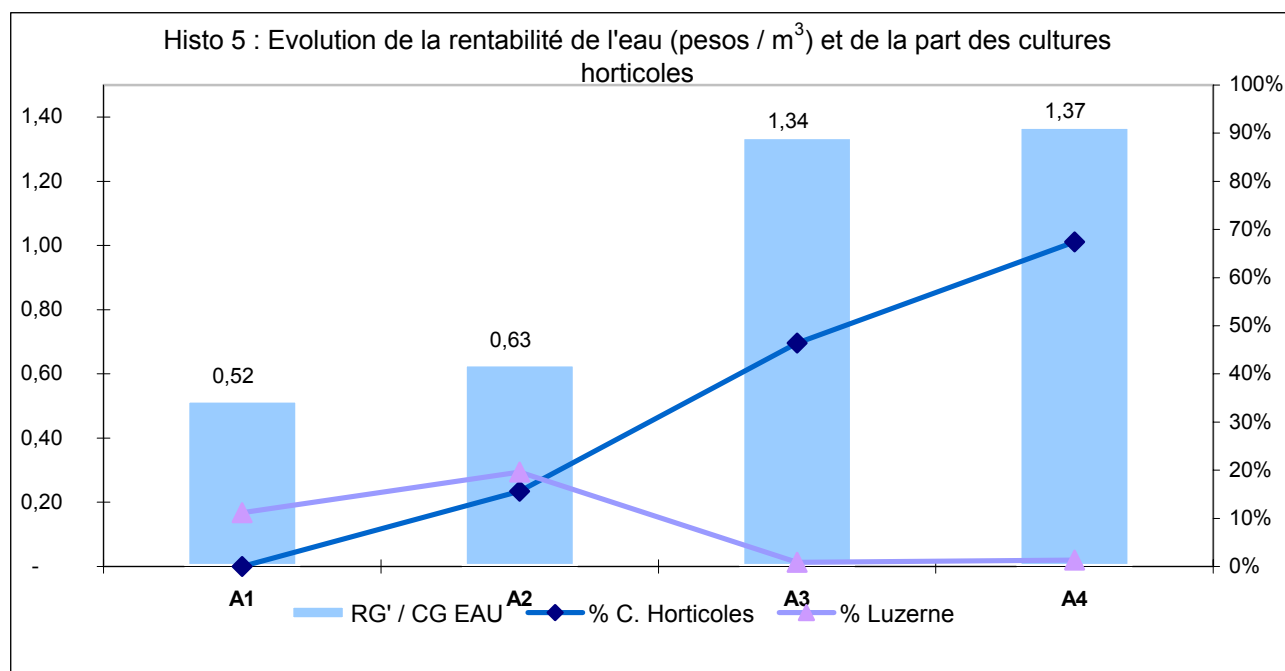
La plus grande conclusion à tirer de ce résultat est que le scénario A ne s'accompagne pas d'une hausse significative de la consommation globale en eau.

La consommation la plus forte est celle de l'étape A2 et est à relier avec l'augmentation de la part de luzerne. En effet, en A2, des volumes d'eau sont « devenus » disponibles, mais de façon aléatoire (la priorité reste accordée aux céréales). Le modèle attribue davantage ces volumes à la luzerne, culture que nous avons introduite comme peu risquée vis-à-vis du stress hydrique, qu'aux cultures horticoles qui y sont, elles, très sensibles.

Le passage A3 - A4 est particulièrement intéressant : en effet, une des raisons pour lesquelles les cultures horticoles ont la réputation de consommer davantage d'eau est que les agriculteurs sèment souvent plusieurs cultures par cycle sur la même parcelle : exemple : brocolis en novembre, tomates en janvier ou cornichons en février.

Ce phénomène apparaissait en phase A3 (la tomate verte est la seule culture horticole disponible dans le modèle) mais est bien visible dans la phase A4. La hausse de consommation de l'eau est insignifiante par rapport à A3.

Observation 3 : Forte amélioration de la rentabilité de l'eau avec l'augmentation de la part des cultures horticoles dans l'assolement du puits



Selon les résultats du modèle, la rentabilité de l'eau augmente de façon assez similaire à la part des cultures horticoles entre A1 et A3.

Le passage A3 – A4 ne montre pas une amélioration particulière de la rentabilité de l'eau, mais pourtant une forte augmentation des cultures horticoles. Cela explique sans doute que les agriculteurs dès qu'il leur en a été donné la possibilité, ont opté pour des cultures a priori moins risquées (car sous contrat), quitte à moins bien rentabiliser l'intrant eau.

Dans la simulation A3, la culture des 25 ha de tomate verte est réalisée pour presque 50 % par un seul groupe I1. En A4, ce même groupe I1, ne réalise plus que un tiers des cultures horticoles du puits, ce qui signifie que les autres groupes participent davantage à l'implantation de ces cultures.

D – Analyse critique de ces résultats

Nous nous sommes interrogés sur la part considérable (46 %) de cultures horticoles hors contrat adoptées dans le modèle dès la simulation A3. En effet, nous avons vu lors des enquêtes de terrain que ces cultures étant très risquées, les agriculteurs ont pour habitude de ne les implanter que sur des proportions réduites de leur SAU. L'adoption à presque 50 % de la culture de tomate dans l'assolement A3 nous a paru étrange et nous a semblé nécessiter des éclaircissements.

En effectuant une comparaison entre la solution donnée par le modèle collectif A3, et les solutions données par les modèles individuels-types des groupes d'agriculteurs (I1, I2...), on a un moyen de détecter certains des éventuels dysfonctionnements du modèle collectif : il s'agit de vérifier qu'on retrouve bien dans le modèle collectif, malgré l'activation des contraintes collectives, les grandes tendances de la stratégie agricoles de chaque individu.

Tab. 22 - Comparaison des surfaces de cultures horticoles dans les différents modèles

	Individus → surface totale	I ₁ 11.10ha	I ₂ 4.00 ha	I ₃ 5.80 ha	I ₄ 12.00 ha	I ₅ 16.80 ha	I ₆ 4.00 ha
Solution	Modèles types (mis en situation A3)	10.54	1.18	2.65	6.40	2.29	2.58
	Modèle collectif A3	10.55	1.02	2.01	6.44	2.37	2.53

Les résultats de ce tableau montrent des valeurs très proches entre le modèle collectif et les modèles-types individuels. Le modèle est donc «valide » de ce point de vue.

On remarque que dans la simulation A3, une part importante (près de la moitié) de la surface horticole provient en fait d'un groupe d'agriculteurs (I₁) un peu « atypiques » car disposant de ressources financières beaucoup plus importantes que la moyenne des agriculteurs *d'ejidos* et donc susceptibles de se démarquer des réactions « habituelles ». Cette caractéristique particulière au groupe d'agriculteurs I₁ peut donc être à la source de ce résultat inattendu concernant les surfaces horticoles.

3 – Scénario B : modification de l'accès à l'eau souterraine

A – Pertinence du scénario B dans le contexte actuel

Dans le travail de modélisation/simulation réalisée jusqu'à présent, nous n'avons pas tenu compte du rythme d'exploitation excessif imposé actuellement sur les ressources en eau souterraine du Bajío (Cf. Chap II, I-A). Etant donné les échelles de temps et de superficie utilisées dans le modèle, il n'y avait pas lieu, pour la représentativité du modèle, de faire apparaître une incertitude sur la disponibilité quantitative en eau (Cf. chap. VI, II-A).

Actuellement, il semble que les agriculteurs, tout en étant conscients des problèmes d'épuisement de la ressource, continuent pour la plupart, malgré les augmentations du prix de l'électricité et au mépris du plafond d'extraction théoriquement imposé par la CNA, d'utiliser l'eau souterraine comme si celle-ci était une ressource en libre accès, (Benoît-Cattin et al., 2002). La notion d'exploitation durable de l'eau est donc toujours assez peu prise en compte dans les stratégies et les comportements des agriculteurs.

Cependant, bien que le modèle n'intègre pas de contrainte de durabilité de la ressource, il nous a semblé intéressant de réaliser une simulation qui tienne compte de cet aspect. Le but de cette simulation sera alors d'observer les modifications à prévoir si les agriculteurs devaient adopter un rythme d'exploitation en eau « durable ».

Concrètement, parmi les instruments politiques envisageables pour atteindre cet objectif, le plafonnement de l'extraction annuelle nous semble être une méthode pertinente.

La création d'un quota sur l'eau souterraine consisterait en réalité en la mise en application d'une loi déjà existante mais largement ignorée à l'heure actuelle. Nous avons vu en effet qu'un plafond d'extraction annuelle était théoriquement fixé par la CNA lors de la concession du puits, mais que celui-ci était rarement connu ou respecté par les utilisateurs faute de contrôles suffisamment sérieux ou réguliers. (Cf. chap. IV, I-C)

Une mesure plus forte, dont l'implémentation consisterait en une limitation, imposée par la CFE (*Comisión Federal de Electricidad*), des horaires d'accès à l'électricité pour le puits, serait efficace pour

limiter la consommation d'eau de chaque puits. Quel serait en revanche l'impact de cette politique sur les exploitations elles-mêmes ? A quelles adaptations (culturelles techniques, sociales....) aboutirait-elle ?

Les simulations B ont donc pour but théorique de nous permettre de pronostiquer les effets de la mise en place d'une politique forte de restriction de l'eau dans différents puits collectifs du Bajío. Etant donné la relative simplicité du modèle tel qu'il a été construit à ce stade, on doit plus modestement espérer en tirer les premiers éléments de réponses et surtout des pistes de réflexion.

Nous ferons dans le cadre du scénario B une étude comparée mettant en parallèle deux types de puits collectifs caractérisés par des règles de gestion et de fonctionnement collectifs différents. Deux modèles A1 et A3 seront utilisés, qui représentent deux puits dont l'organisation collective est respectivement très rigide (type Los Lobos) et très souple (type San Juan). L'intérêt est de voir comment et combien chacun de ces deux puits s'adapte à la mise en place du quota sur l'eau.

B – Réalisation de la simulation B : mise en place d'un quota sur l'eau

Il s'agit dans le modèle de plafonner la variable de consommation globale en eau (CG EAU) à un volume d'extraction maximale (VEM) choisi de manière à assurer durabilité de la ressource. La détermination d'un volume d'extraction «durable» est complexe et nécessiterait des études approfondies, hydrogéologiques, climatiques... de la zone. Il est bien sûr impossible à notre niveau de le déterminer de façon exacte et scientifique. Nous avons donc cherché à trouver un ordre de grandeur qui soit logique, plus qu'un chiffre exact.

Détermination empirique du VEM

Deux statistiques du district d'irrigation 011 ont servi de base à nos calculs du VEM :

- Le déficit annuel enregistré sur le niveau des aquifères est de 117 millions de m³. (Cf. chap II, II-B)
- Le nombre de puits enregistrés dans le district 011 est de 1714. (Gillet et Ollivier, 2002)

En le répartissant le déficit annuel entre les 1714 puits, nous calculons une valeur fictive du «déficit par puits» (DF) de 68 261 m³.

A partir de cette valeur de DF et de la consommation actuelle du puits de Los Lobos, nous fixons VEM :

$$\text{VEM} = \text{CG EAU (simulation A1)} - \text{DF}$$

$$\text{VEM} = 325\,596 - 68\,261 = 257\,335 \text{ m}^3$$

Dans les simulations B1 et B2 du scénario B, une nouvelle équation de contrainte va donc être introduite respectivement dans les modèles A1 et A3, limitant la variable CG EAU à un maximum de 257 335 m³.

Remarque : ce qui est considéré comme la base de la « stratégie agricole » est habituellement schématisée en terme d'une combinaison de techniques et de cultures, adaptables selon différents contextes. Nous avons reproduit dans le modèle la disponibilité d'une large gamme de cultures (ensembles de culture C₁ et C₂) mais la possibilité de progrès techniques, notamment l'amélioration de l'efficacité d'irrigation, n'a pas pu être modélisée. Pourtant, de nombreuses adaptations techniques permettent la réalisation d'économies significatives d'eau à la parcelle (Cf. partie I, IV, 2-C).

Il faut donc garder à l'esprit en interprétant les résultats obtenus que la simulation du scénario B est privée d'une partie importante des possibilités réelles dont disposent les agriculteurs. Nous reviendrons sur cet aspect du travail de modélisation plus loin (Cf. partie I, I).

C – Présentation et interprétation des résultats des simulations B

Tab. 23 - Résultats du modèle et Indicateurs pour l'analyse du scénario B

Simulations	A1	B1	A3	B2
	Fonctionnement rigide		Fonctionnement souple	
		cg eau < vem		cg eau < vem
RG'	168 717	156 313	455 729	439 495
ECTYPE RmI	13 024	12 177	43 113	43 920
MOY RmI	28 120	26 052	75 955	73 249
COEFF VARIATION	0,4632	0,4674	0,5676	0,5996
SFTot cult	47,34	40,55	53,70	41,74
SFTot céréales	42,04	40,55	28,31	4,09
SFTot Hortalisas			24,92	37,65
SFTot luzerne	5,30		0,47	
% Cultures horticoles	0%	0%	46%	90%
CG EAU	325 596	257 335	340 148	257 335
RG' / CG EAU (2)	0,52	0,61	1,34	1,71
CG EAU / SFTot cult	6 878	6 346	6 334	6 165

Comparaison B1 / B2

L'implémentation d'une politique de quota ne modifie pas les conclusions que nous avons tirées du scénario A : avec ou sans plafond d'extraction, les résultats du modèle continuent à montrer qu'un puits à fonctionnement collectif souple obtient un revenu global nettement supérieur à un puits dont les règles d'organisation sont plus rigides. Sous une politique de quota, le basculement de l'assolement vers l'horticulture en parallèle à l'assouplissement des règles d'organisation est encore plus net : la sole devient à 90% horticole dans le cas B2. Sans le quota, en simulation A3, la sole ne devient horticole qu'à 46%.

De plus, sous une politique de quota, le creusement de l'écart entre les revenus individuels, qui accompagne l'assouplissement du fonctionnement interne du puits, (Cf. scénario A) est encore plus prononcé : entre B1 et B2 le groupe d'agriculteurs I₂ augmente son revenu de 55% alors que cette augmentation atteint 508 % pour le groupe I₁.

Comparaison des transitions A1 → B1 et A3 → B2

Cette comparaison permet d'observer le niveau d'adaptation et le type d'adaptation de chacun des puits (collectif/souple) à l'augmentation de la pression sur l'eau créée par la politique de restriction.

Tab. 24 - Principales évolutions dans chaque cas lors de la mise en place du quota sur l'eau

	Puits à fonctionnement collectif rigide	Puits à fonctionnement collectif souple
Mise en place quota sur l'eau	A1 → B1	A3 → B2
Evolution RG	-7,35	-3,56
Evolution coeff variation	+0,92	+5,64
Evolution surf cultivée	-14,34	-22,27
Evolution rentabilité eau	+17,22	+27,47
Evolution consommation eau	-7,73	-2,67

Observation 1 : Nette amélioration de la rentabilité de l'eau dans chaque cas

Observation 2 : Chute du revenu global RG'.

Observation 3 : Répartition inégale de la pénalisation liée au quota

Observation 1 : Nette amélioration de la rentabilité de l'eau dans chaque cas

La hausse de la rentabilité globale du m³ d'eau provient de choix de culture pertinents :

- abandon complet de la luzerne, forte consommatrice d'eau mais peu rémunératrice,
- spécialisation dans les cultures horticoles dans le cas A3 → B2 avec un puits qui devient producteur horticole à 90 %,
- maximisation du semis précoce de l'orge dans le cas A1 → B1.

Le modèle B1 privilégie effectivement l'orge C₃ qui est semée début décembre. Les besoins en eau d'une orge semée tôt dans le cycle sont moindres que ceux d'une orge semée début janvier. Dans le modèle A1, la culture C₃ représente 12 ha sur les 47,5 ha semés. Dans le modèle B1, ce sont 12 ha sur les 40,5 totaux.

Observation 2 : Chute de revenu global RG' dans les deux cas.

Ce résultat est logique étant donné l'importance de l'intrant « eau » dans les cycles de culture OI. La réduction de RG' est plus importante dans le cas d'un fonctionnement rigide (1^{er} cas) que dans le cas d'un fonctionnement souple (2^e cas). L'explication est vraisemblablement liée à la plus grande marge de manœuvre dont disposent les agriculteurs pour s'adapter au changement politique dans le 2^e cas.

Parmi les adaptations, on note dans les 2 cas une diminution importante de la surface en culture : -14% et -22%, ainsi qu'une sélection des cultures les plus rentables vis-à-vis de leur consommation en eau. (Cf. observation 1)

Observation 3 : Répartition inégale de la pénalisation liée au quota

Les résultats de la simulation indiquent que la diminution du revenu global s'accompagne d'un fort creusement des écarts de revenus entre les membres : le coefficient de variation des revenus individuels augmente de 0,92% entre A1 et B1 et de 5,64 % entre A3 et B2.

Dans les 2 cas, la diminution du revenu global n'est pas supportée uniformément par l'ensemble des membres, mais par certains groupes uniquement. Les groupes I₂ et I₆ voient paradoxalement leur revenu augmenter dans un contexte pourtant défavorable (Cf. tab 24).

Tab 25 - Evolution différentielle des revenus individuels suite à la mise en place du quota

	Fonctionnement collectif rigide	Fonctionnement collectif souple
Mise en place quota sur l'eau	A1 → B1	A3 → B2
Evolution variation	0,92	5,64
Evolution RM11	-15,37	-0,46
Evolution RM12	13,64	0,97
Evolution RM13	-22,77	-27,05
Evolution RM14	2,57	-3,89
Evolution RM15	-16,05	-0,27
Evolution RM16	2,53	2,06

De même, l'étude plus précise des consommations d'eau individuelles montre que dans le puits A1 comme dans le A3, l'effort de réduction des consommations en eau lors de la mise en place du quota est très hétérogène à l'intérieur du groupe (Cf. tab 26) : certains individus réduisent de 50 % leur consommation alors que d'autres ne réalisent qu'un effort très faible.

On note également que la diminution de la surface cultivée est très importante pour certains groupes qui sacrifient plus de 50% de leur surface, alors que d'autres groupes continuent de cultiver l'intégralité de leur surface (Cf. tab 25).

Tab 26 - Evolution différentielle des surfaces cultivées suite à la mise en place du quota

	Fonctionnement collectif rigide	Fonctionnement collectif souple
Mise en place quota sur l'eau	A1 → B1	A3 → B2
Evolution surface cultivée	14%	22%
Evolution surface 11	-18%	0%
Evolution surface 12	-10%	-40%
Evolution surface 13	-32%	-56%
Evolution surface 14	0%	-11%
Evolution surface 15	-23%	-34%
Evolution surface 16	0%	-5%

Tab 27. Evolution différentielle des consommations en eau suite à la mise en place du quota

	Fonctionnement collectif rigide	Fonctionnement collectif souple
Mise en place quota sur l'eau	A1→B1	A3→B2
Evolution conso eau totale	21%	25%
Evolution conso eau 11	-18%	-4%
Evolution conso eau 12	-44%	-38%
Evolution conso eau 13	-40%	-57%
Evolution conso eau 14	0%	-17%
Evolution conso eau 15	-23%	-35%
Evolution conso eau 16	0%	-5%

Il est clair d'après ces chiffres que la pénalisation liée à la mise en place du quota sur l'eau n'est supportée, dans la solution proposée par le modèle, que par quelques membres du puits. Le phénomène est nettement plus accentué dans le cas d'un puits au fonctionnement collectif souple.

Pourtant, imaginer une telle situation, où le handicap serait concentré sur quelques agriculteurs du groupe seulement, voire avec le « sacrifice » du revenu de certains, ne correspond pas à une réalité de terrain. Le chapitre suivant développe cette critique et essaye de trouver des explications.

D – Analyse critique de ces résultats

La pénalisation consécutive à la politique restriction sur l'eau, répartie inégalement entre membres du groupe, selon la solution du modèle peut en partie être justifiée par une hétérogénéité de situation que l'on retrouve sur le terrain.

Par exemple, dans le cas A1 → B2, les agriculteurs placés en début de tour d'eau (groupe I₄) sont naturellement avantagés lors de la mise en place du quota puisque l'orge précoce (semis début décembre) est moins consommatrice en eau que l'orge semée tardivement (semis en janvier). Il est indéniable que tous les agriculteurs ne bénéficient pas des mêmes atouts pour s'adapter à un contexte défavorable : la place dans le tour d'eau (qui permet un semis plus ou moins précoce), la disponibilité en trésorerie... sont des paramètres susceptibles de créer des inégalités entre les agriculteurs dans un contexte difficile. Cependant, cet aspect a une portée limitée dans l'explication du phénomène du fait que la possibilité d'améliorer l'efficacité technique d'irrigation, qui serait un facteur d'hétérogénéité entre utilisateurs d'eau, n'a pas été reproduite dans le modèle (Cf. Remarque Partie 3, I, 3-C).

Il nous semble que la construction du modèle est susceptible d'accentuer le creusement des écarts entre individus dans la solution. En effet, dans le cas d'un tour d'eau souple, seule une contrainte quantitative globale conditionne, dans le modèle, l'utilisation de l'eau : le modèle procède donc à l'allocation optimale de l'eau d'un point de vue économique sans tenir compte d'aspects sociaux et ni d'équité entre les utilisateurs (Cf. Partie 3, I, 2-B). C'est ce qui explique une telle disparité de distribution d'eau entre les différents utilisateurs lors de la mise en place de la contrainte de quota.

De plus, la construction de la fonction-objectif est susceptible d'encourager cet aspect en favorisant les agriculteurs jugés plus performants pour la maximisation du revenu. (Cf. Partie 2, II, 3-B). En cas de situation économique défavorable, telle que celle que nous avons simulée dans le scénario B avec l'augmentation de la pression sur l'eau, ce fonctionnement peut avoir conduit le modèle à opérer une sélection plus poussée entre les individus, pour maximiser le revenu, quitte à sacrifier le revenu individuel de certains.

Ainsi, les solutions proposées correspondent à des solutions économiquement optimales, mais qui ne prennent pas en considération que, dans la réalité, des règles au sein du groupe assurent un certain niveau d'équité dans la répartition de la ressource en eau. Cet aspect « social » manque aux solutions pour pouvoir leur donner une interprétation directe. Cependant, cela ne remet pas en cause l'ensemble des résultats du scénario B. Les tendances observées vis-à-vis des adaptations culturelles, diminution de surface semblent tout à fait plausibles. Ce sont les résultats économiques quantitatifs (RG', RmI' I₁ et I₆...) qui doivent être revus à la baisse pour être plus conformes à la réalité.

Dans le chapitre suivant, nous essayerons de proposer des améliorations du modèle permettant de traiter de façon plus « réaliste » ce type de scénario.

Enfin, nous avons vu également qu'il manque dans le modèle une donnée très importante relative aux techniques de culture et techniques d'irrigation.

Le scénario B montre clairement un basculement de l'assolement vers des cultures qui rentabilisent mieux l'eau, mais le modèle n'a pas les moyens d'envisager d'adaptations en terme de spécialisation technique vers des méthodes d'irrigation plus efficaces. Cela limite beaucoup la marge de manœuvre dont disposent les individus du modèle pour s'adapter au changement de l'environnement que nous avons introduit.

Les changements de techniques d'irrigation à la disposition des agriculteurs sont très divers (Cf. Chap IV, II-C) et présentent des niveaux d'investissement extrêmement variables : depuis de simples contrôles réguliers en sortie de raie, jusqu'à l'équipement pour l'irrigation au goutte à goutte. Pour pouvoir introduire ces facteurs dans le modèle, il faut pouvoir évaluer, pour chacune des techniques, l'investissement en temps et l'investissement financier argent qu'elle représente et mettre en parallèle ses effets sur l'efficacité d'irrigation et donc les économies d'eau.

Cela représente un travail de grande ampleur, mais serait une suite très intéressante à donner à ce travail, et qui compléterait efficacement le modèle.

Conclusion

Intérêts et limites du modèle collectif, propositions d'amélioration

La mise en pratique du modèle au cours des simulations, a permis d'une part de progresser dans la compréhension de l'outil que nous avons construit et d'autre part, a fait apparaître plusieurs pistes d'amélioration du modèle.

L'introduction de la possibilité d'une différenciation technique de l'irrigation (irrigation à la raie, aspersion, goutte-à-goutte) ainsi qu'au niveau des pratiques (niveau de gaspillage en eau chiffré au travers d'une gamme de coefficients d'efficience d'irrigation), devrait permettre d'enrichir considérablement le modèle, en donnant accès à davantage de modulation dans les réactions et les adaptations des individus vis-à-vis des changements proposés. Cette étape complémentaire est indispensable si on envisage une utilisation plus poussée du modèle comme outil de simulation des politiques de gestion de l'eau. En supplément, il serait intéressant d'inclure également dans le modèle une gamme des pratiques culturales au sens large : travail du sol, semis (direct, avec labour...) telles que nous les avons rencontrées sur le terrain. Cela représente un travail de collecte de données considérable car il faut évaluer d'une part les investissements (temps, matériel) et les coûts de chacune de ces pratiques, d'autre part leur impact vis-à-vis de plusieurs critères : économie d'eau, rendement...

De plus, il est apparu très clairement qu'une grande attention devait être accordée à l'interprétation des résultats du modèle. Le modèle ne donne pas toujours une solution directement transposable au terrain et un certain recul est nécessaire pour discerner ce qui peut être directement applicable au terrain de ce qui constitue simplement une information théorique.

Dans le cas de la représentation d'un fonctionnement collectif souple, nous avons vu que le modèle réalise une allocation de l'eau optimale d'un point de vue économique. La solution proposée est économiquement optimale, mais n'est pas socialement acceptable. Pour obtenir une solution plus réaliste, il faudrait compenser ce système d'allocation par une contrainte sociale qui imposerait un minimum d'équité entre les utilisateurs de la ressource. Il convient de réfléchir au moyen d'introduire cette contrainte sans créer simultanément une rigidité inopportune dans un modèle censé représenter un tour d'eau souple.

Enfin, nous avons vu qu'une part des divergences entre la solution théorique du modèle et son applicabilité directe sur le terrain provenait de la construction de la fonction objectif du modèle collectif. Le modèle fonctionne sur l'hypothèse d'une concertation entre les agents économiques et d'une synergie pour la maximisation du profit collectif. Pour remédier à cette déviation, d'autres constructions de fonction-objectif existent, qui permettent d'individualiser davantage les objectifs au sein d'un groupe.

Basée sur cette hypothèse et caractérisée par une allocation de l'eau économiquement optimale, la solution du modèle est forcément optimiste d'un point de vue économique et pessimiste du point de vue social, puisqu'elle introduit une tendance à mettre de côté les agriculteurs les moins performants économiquement. Elle représente donc la situation extrême, fictive, dans laquelle le groupe ne viserait que l'optimum économique collectif.

Cependant, si le modèle tel qu'il est construit actuellement, ne donne pas une solution directement transposable au terrain, il présenterait néanmoins un certain intérêt dans le cadre d'un travail avec les agriculteurs de puits collectifs à propos de l'amélioration du fonctionnement en collectivité. En effet, les résultats obtenus avec ce type de modèle peuvent servir de base pour que le groupe définisse « son » objectif entre l'optimum économique collectif, donné par la solution et le niveau d'équité ou de solidarité « souhaité » par les membres. Le modèle construit peut donc servir d'outil d'aide à la négociation au sein

du groupe d'agriculteurs irrigants afin de définir, en interne, des nouvelles règles de gestion de l'eau et de les adapter au contexte socio-économique changeant.

Bibliographie

1. **Adamowicz et al., (1996).** The role of economic instruments to resolve water quantity problems. *Canadian Journal of Agricultural Economics*. vol. 44, n. 4, p. 337-344.
2. **Allen R.G. et al. (1998).** *Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements [on line]*. Rome : FAO. (Irrigation and drainage ; n. 56). Chap. Mean Crop Coefficients, Kc, for Subhumid Climates. [Consulté en mars 2005]. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>
3. **Arreola (1993).** *Cuando y Cuanto Regar*. México : INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (Folleto tecnico tome 3, n°1).
4. **Bandaragoda (1998).** *Design and Practice of Water Allocation Rules: Lessons from Warabandi in Pakistan's Punjab*. Colombo : International Water Management Institute. (Research Report. n°17).
5. **Barreteau O., Bousquet F. (1998).** *Shadoc : un système multi-agent représentant les modes d'organisation dans un système irrigué*. Communication au séminaire «L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde », novembre 1998, Montpellier. Disponible à l'IAM de Montpellier.
6. **Beauchamp J. (2000).** *L'eau et le sol [en ligne]*. Cours université de Picardie. Chap. 6. Calcul des valeurs d'évapo-transpiration ETM [Consulté en mars 2005]. <http://www.u-picardie.fr/~beauchamp/cours-du/du-6.htm>
7. **Benoît-Cattin, Jourdain, Triomphe. (2002).** *La réduction du gaspillage de l'eau souterraine par l'agriculture ne serait-elle qu'une simple question de prix de l'énergie d'extraction ? Le cas des agriculteurs du Bajío Guanajuatense, Mexique*. Document disponible au CIRAD Montpellier.
8. **Brouwer C., Prins K., Kay M. (ca 1987)** *Irrigation water management : irrigation methods [on line]*. Rome : FAO. (Training manual ; n. 5). Chap. Irrigation Methods. [Consulté en mars 2005]. <http://www.fao.org/docrep/S8684E/s8684e00.htm#Contents>
9. **Carles J., Avella L., Garcia M. (1998).** *Relación entre precios y consumos de agua en el regadio intensivo del mediterráneo español. Tipos de sociedades de riego y tarificación*. Communication au séminaire «L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde », novembre 1998, Montpellier. Disponible à l'IAM de Montpellier.
10. **Castellanos et al. (2002).** Changes in the quality of groundwater for agricultural use in Guanajuato. *Terra Volumen*, vol. 20, n°2, p. 162-168 .
11. **Castro (1995).** Decentralization and Modernization in Mexico : the Management of Water Services. *Natural Resources Journal*, vol. 35, n°3, p. 462-487.
12. **CNA (Comisión Nacional del Agua, Mexico). (2003).** Estadísticas del Agua a México. Situación de los Recursos Hídricos. Document disponible auprès de la CNA.
13. **Descotes, (1998).** *Gestion sociale de l'eau : modèle d'évolution et mise en perspective historique d'un système d'irrigation du haut-Atlas Marocain*. Communication au séminaire «L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde », novembre 1998, Montpellier. Disponible à l'IAM de Montpellier.
14. **Ducrot R. et al. (2002).** Transitions institutionnelles et agricoles dans les périmètres irrigués du pôle Petrolina-Juazeiro (Brésil). D'une logique sociale vers une logique managériale. In : Garin, P., Le Gal, P.Y., Ruf, T. (eds). *La gestion des périmètres irrigués collectifs à l'aube du XXI^e siècle : enjeux, problèmes, démarches. Actes de l'atelier du PCSI, 22-23 janvier 2001, Montpellier*. Montpellier : CIRAD. p. 109-124.
15. **Dutilly-Diane C. (2001).** *Action collective et coopération partielle dans la gestion des ressources communes : le cas des ejidos mexicains*. Thèse Doctorale Sciences Economiques : Université Clermont 1, 201 p.
16. **Faysse (2001).** *L'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs. Des petits périmètres irrigués tunisiens aux prélèvements en rivière du Bassin de l'Adour*. Thèse Doctorale Economie : Université Paris X Nanterre. 258p.

17. **FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, Banco de México) (2003).** *Costos de cultivo [en ligne]*. México : FIRA. [Consulté en mars 2005]. <http://www.fira.gob.mx/Sinacos/SinacosOpciones.asp>
18. **Garin P., Strosser P., Lamacq S. (1998).** *Quelle représentation pour la gestion des systèmes irrigués, ou les chercheurs de la table ronde à la recherche du Graal*. Communication au séminaire «L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde », novembre 1998, Montpellier. Disponible à l'IAM de Montpellier.
19. **Gillet V., Ollivier I. (2002).** *Evolution des règles de gestion de l'eau superficielle et souterraine & Impact du transfert*. Thèse de Master : CNEARC Montpellier. 116 p.
20. **Goulet (2002).** *Analyse du fonctionnement des systèmes de culture en zone irriguée au Mexique. Le cas du municipio de Valle de Santiago, Etat du Guanajuato*. Mémoire d'Ingénieur : ESA Angers. 106 p.
21. **INIFAP (1982).** *Guía para cultivar cebada en el Bajío*. Mexico : INIFAP. (Folleto tecnico para los productores; n. 7).
22. **INIFAP.** *Información básica del campo de Guanajuato [en ligne]*. [Consultation en 2003]. http://intranet.inifap.conacyt.mx/pagina_web/campos/bajio/inf-gto.htm
23. **Jacquet F. (2002).** *Programmation Mathématique, Application à l'Economie Agricole et des Ressources Naturelles*. Document disponible à l'IAM Montpellier.
24. **Jeffrey D., Brewer et al. (1997).** *Water Distribution Rules and Water Distribution Performance: A Case Study in the Tambraparani Irrigation System*. Mexico : IWMI. (Research Report n°12).
25. **Jourdain (2002).** Vers la représentation des puits collectifs : bases empiriques. (Chapitre de thèse de doctorat, CIRAD. Document provisoire)
26. **Kloezen et al., (1998).** *Impact Assessment of Irrigation Management Transfer in the Alto Rio Lerma Irrigation District*. Mexico : IWMI. (Research Report; n°15).
27. **Latif et al. (1994).** Proposal for equitable water allocation for rotational irrigation in Pakistan. *Irrigation and Drainage Systems*; n. 8, p. 35-48.
28. **Le Gal P.Y., Perret S. (1998).** *Analyse des pratiques, modélisation et aide à la décision dans le domaine de l'irrigation : le cas de la gestion d'une retenue collinaire collective à la Réunion*. Communication au séminaire «L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde », novembre 1998, Montpellier. Disponible à l'IAM de Montpellier.
29. **Montginoul (1997).** *Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : des instruments, de l'information et des acteurs*. Thèse Doctorale Economie du Développement : Université Montpellier I. 269 p.
30. **Morardet et al. (2001).** *Instruments de régulation de la demande en eau des agriculteurs et Politique Agricole Commune*. Communication au colloque PIREE « les instruments des politiques environnementales », 5 et 6 avril 2001, Sophia-Antipolis. CEMAGREF UR Irrigation-Université Montpellier I
31. **Naranjo et al. (1994).** *Modernización Integral del Distrito de Riego 085 «La Begoña », Guanajuato*. Memoria : Instituto Tecnológico Agropecuario, n°33. 50 p.
32. **Verdeil D. (1993).** *Diagnostic agro-économique et hydraulique du périmètre irrigué de la Begoña – Mexique*. Mémoire de Master Spécialisé Agropolis : ENSA Montpellier. 130 p.

Annexes

Annexe 1 : Détermination des besoins en eau des cultures et des apports en eau d'irrigation

La détermination des besoins en eau mensuels (BE mensuels) des cultures s'est faite de deux façons, selon la disponibilité des informations :

1) A partir du calcul de l'Evapo-Transpiration Maximale (ETM), pour chaque mois du cycle de croissance de la culture considérée. On a alors utilisé les formules :

$ETM = ETP.Kc$, et $BE \text{ mensuel} = ETM \text{ mensuelle} = ETP \text{ mensuelle}.Kc$, avec :

- $ETP_{\text{mensuelle}}$: Evapo-Transpiration Potentielle mensuelle, en mm

(Source des valeurs d'ETP à Valle de Santiago : Districts d'irrigation 085 & 011)

- Kc : coefficient cultural à la période de temps t considérée (Source : site Internet FAO)

2) Directement par recherche bibliographique. Dans ce cas, la valeur des besoins en eau totaux était fournie directement.

De légères inexactitudes dans les besoins en eau relatifs des différentes cultures peuvent provenir du fait de cette double source de données.

Le calcul des apports en eau d'irrigation, AE, correspondants à ces besoins, se calcule ensuite au niveau du modèle : $AE = BE.K$, à partir :

- des besoins en eau des cultures, BE, précédemment déterminés,

- d'un coefficient d'efficience d'irrigation k affecté à chaque agriculteur, compris entre 0 et 1

La détermination du coefficient k s'est faite en tenant compte :

- des temps d'irrigation relevés et la comparaison à l'ha avec les autres membres du puits,
- des caractéristiques de la parcelle (pente, nivellement du terrain...)
- éventuellement de certaines observations faites sur le terrain : l'attention qui est portée aux irrigations, la mention d'une stratégie d'irrigation « anti-risque » (CF. chap IV)

Il aurait fallu également prendre en compte de très nombreux autres paramètres susceptibles d'influer sur les réserves en eau du sol et donc sur les besoins d'irrigation :

- propriétés du sol et de l'apparition de fentes de retrait plus ou moins prononcées,
- techniques de semis et de travail du sol, qui influent sur les propriétés de rétention,
- culture considérée : dans le cas d'une culture irriguée tous les 15 jours (type culture maraîchère), le sol se resèche moins entre deux irrigations que dans le cas d'une culture irriguée tous les mois (céréales), ce qui occasionne moins de perte d'eau.

Le cadre de ce travail n'a pas permis d'approfondir les aspects hydriques et pédologiques. Cependant, l'étude se situe davantage dans une problématique socio-économique et permet dans un premier temps de se satisfaire de ces approximations.

Annexe 2 : Expression mathématique de la Pression sur l'Eau

Pour évaluer la pression sur l'eau qui existe au sein du groupe d'utilisateurs, il faut relier le débit du puits à la surface à irriguer.

Jourdain, 2002 utilise pour cela un indicateur de pression, le Tour d'Eau Théorique (TET) :

$$TET = STHE \cdot LameE / DébitJ$$

avec :

DébitJ (en m³/j) : débit journalier (en m³/j)
STHE (ha) : surface théorique irriguée
LameE (m) : lame d'eau de 250 mm

Cette valeur correspondrait à la longueur d'un tour d'eau pour un groupe semant, sur sa surface STHE, exclusivement des céréales, et irriguant avec une lame d'eau de 250 mm (hauteur moyenne de lame d'eau actuellement en pratique pour une irrigation sur céréales).

Les céréales nécessitent un retour d'eau pouvant descendre à 30-35 j en fin de cycle.

Si le TET calculé dépasse ce seuil, il est à prévoir que les agriculteurs auront du mal à terminer le tour d'eau dans les temps requis et que les derniers utilisateurs souffriront d'un retard de riego.

Si on calcule le TET avec la dotation initiale de 1 l/s/ha, on obtient un tour d'eau de 29 jours, ce qui permet une bonne irrigation des céréales.

Cependant, on a vu que les débits ont fréquemment baissé depuis l'attribution initiale des surfaces. Avec une baisse du débit du puits, le nombre de jours nécessaires pour irriguer la totalité des surfaces augmente, ce qui explique que dans certains groupes, la surface réellement irriguée en hiver soit inférieure à la STHE.

Annexe 3 : Paramètres affectés aux cultures en fonction des périodes

Mois	quinzaine	Blé	Brocoli	Tomate	Cornichon	Orge
		BWF(P,C)	Besoin en travail familial			
NOV	Q1		7			
	Q2		5,5			
DEC	Q3		5			
	Q4	3,5	3,5			3,5
JAN	Q5		3,5	7		
	Q6	3	6	2,4		3
FEV	Q7	0,8	6,5	2,4		1
	Q8	0,9		2,4	7,5	1
MAR	Q9	0,8		2,4	5	1
	Q10	0,9		2,4	6,25	
AVR	Q11			6	4	
	Q12			6	6,5	0,5
MAI	Q13	0,5			7,5	
	Q14				6	
Total cycle OI		10,4	37	31	42,75	10
		BWS(C)	Besoin en travail salarial			
NOV	Q1					
	Q2		10			
DEC	Q3		12			
	Q4		12			
JAN	Q5					
	Q6			7,0		
FEV	Q7		4	3,0		
	Q8		12	3,5	7	
MAR	Q9			3,0	9	
	Q10			3,5	9	
AVR	Q11			3,0	9	
	Q12			24,0	90	
MAI	Q13			24,0	170	
	Q14				100	
Total cycle OI			50	71	394	

Annexe 3 (suite)

Mois	Quinzaine	Blé	Brocoli	Tomate	Cornichon	Orge
		DA (C,P)	Dépenses agricoles pendant le cycle OI			
NOV	Q1		2366			
	Q2		330			
DEC	Q3		330			
	Q4	2560	220			2560
JAN	Q5	0	220	6800		0
	Q6	1535	710	908		1535
FEV	Q7	10	1470	908		10
	Q8	10		908	860	10
MAR	Q9	10		908	280	10
	Q10	10		908	980	
AVR	Q11	0		800	0	
	Q12	0		800	940	650
MAI	Q13	540			1400	
	Q14				940	
Total cycle OI		4674,6	5646	12940	5400	4774,7
		FC (P,H)	Frais de culture payables à la récolte			
NOV	Q1					
	Q2		6656			
DEC	Q3		1474			
	Q4		1356			
JAN	Q5		775			
	Q6		1295			
FEV	Q7		705			
	Q8				3882	
MAR	Q9				1531	
	Q10				1100	
AVR	Q11				763	
	Q12				843	
MAI	Q13				686	
	Q14				239	
Total cycle OI			12261		9044	

Annexe 4 : Valeurs des besoins en eau (Be = etm) utilisées pour chaque culture

(En fonction des mois M, quinzaines Q et semaines S)

(En fonction des mois M, quinzaimes Q et semaines S)								
M	Q	S	Blé semé en Q4	Brocoli semé en Q1	Tomate semée en Q6	Cornichon semé en q8	Orge semée en Q4	Location (*)
NOV M1	Q1	S1	0	750	0	0		68
		S2	0	0	0	0		0
	Q2	S3	0	0	0	0		68
		S4	0	0	0	0		0
DEC M2	Q3	S5	0	495	0	0		165
		S6	0	0	0	0		118
	Q4	S7	1349	0	0	0	1350	290
		S8	0	495	0	0		168
JANV M3	Q5	S9	0	0	0	0		172
		S10	0	495	0	0		205
	Q6	S11	0	0	420	0		38
		S12	1289	589	0	0		307
FEV M4	Q7	S13	0	589	0	0	1150	230
		S14	0	589	0	0		305
	Q8	S15	0	0	860	450		277
		S16	1049	0	0	225		288
MAR M5	Q9	S17	0	0	0	0	1350	180
		S18	0	0	0	0		235
	Q10	S19	0	0	680	525		246
		S20	1259	0	0	0		172
AVR M6	Q11	S21	0	0	0	0		0
		S22	0	0	680	525		148
	Q12	S23	0	0	0	225		59
		S24	0	0	453	0		79
MAI M7	Q13	S25	0	0	453	450		82
		S26	0	0	455	240		63
	Q14	S27	0	0	0	225		20
		S28	0	0	0	225		20
Total cycle OI			4946	4001	4000	3088	3850	4003

Annexe E 4 (suite)

(*) Les valeurs ETM de la culture « LOCATION » sont calculées comme la moyenne de toutes les autres cultures.

En effet, dans le cas où la parcelle de l'agriculteur avait été laissée en location à un agriculteur hors du puits, la culture nous était en général inconnue. Pour affecter néanmoins une consommation d'eau sur cette parcelle, nous avons choisi d'utiliser cette valeur moyenne.

Remarque

Ce tableau ne présente qu'une partie des cultures utilisées. Dans le modèle, pour chaque culture, nous avons établi plusieurs sous-types selon la date de semis.

Entre plusieurs « sous-types » d'une même culture, les valeurs totales de l'ETM peuvent être différentes : par exemple une orge semée en période Q3 a une ETm de 3600 m³ au lieu de 3850 m³. De plus, les périodes de besoin hydrique sont décalées.

Annexe 5 : Chiffres d’Affaires affectés aux cultures C₁

* Dans le cas de la luzerne, il s’agit d’un CA par quinzaine.

Etats de nature	Luzerne*	Location parcelle	Blé	Brocoli	Tomate verte	Cornichon	Orge
E1	280	2000	9588	39405	31309	48900	8710
E2	280	2000	11200	28812	37089	54030	7330
E3	280	2000	6790	34023	11233	57000	12271
E4	280	2000	9240	24220	20833	49987	9455
E5	280	2000	8734	10000	43167	66666	7859
E6	280	2000	10400	33024	48288	68640	13553
E7	280	2000	9000	20891	49403	69332	10961
E8	280	2000	5600	41017	19769	55800	9687
E9	280	2000	7694	31375	29553	62730	8842
E10	280	2000	8432	21966	53800	70000	10480
E11	280	2000	8811	23700	52129	72090	12151
E12	280	2000	6914	24767	17816	45321	9199
E13	280	2000	7300	42001	36201	63200	10249
E14	280	2000	6590	15875	13665	59300	5030
E15	280	2000	10956	26476	10000	48500	9670
E16	280	2000	7250	44505	13725	44678	8767
E17	280	2000	8765	40586	12346	67100	10604
E18	280	2000	8421	26650	40352	45900	7180
E19	280	2000	9834	30022	80903	15500	10472
E20	280	2000	8737	40386	100585	36800	8076
E21	280	2000	9834	40386	49403	62730	8918
E22	280	2000	8737	24220	20833	70000	10341
E23	280	2000	9000	10000	43167	72090	11280
E24	280	2000	5600	23700	40352	44678	9786
E25	280	2000	7694	30022	80903	69332	10621
E26	280	2000	10956	31375	100585	55800	10516
E27	280	2000	9240	21966	52129	57000	7768
E28	280	2000	8734	42001	17816	49987	8906
E29	280	2000	6914	15875	36201	66666	12073
E30	280	2000	7300	44505	19769	68640	11959
E31	280	2000	6590	39405	37089	48900	9584
E32	280	2000	8421	28812	13725	54030	10232
E33	280	2000	9588	34023	12346	45321	9153
E34	280	2000	11200	40586	31309	45900	6823
E35	280	2000	10400	26650	11233	48500	11456
E36	280	2000	8432	26476	29553	15500	8090
E37	280	2000	8811	33024	53800	67100	11053
E38	280	2000	6790	20891	48288	36800	5959
	280	2000	7250	24767	13665	63200	9653
E40	280	2000	8765	41017	10000	59300	10077
Moyenne	280	2 000	8 513	29 985	36 108	55 074	9 620

Cela permet de refléter que la culture fourragère apporte un revenu régulier tout au long du cycle.

Annexe 6 :Chiffres d’Affaires affectés aux cultures C₂

Etats de nature	Blé	Brocoli	Tomate	Cornichon	Orge
E1	8188	39405	31309	48900	8710
E2	8000	28812	37089	20030	7330
E3	6790	20023	11233	57000	12001
E4	7240	24220	20833	49987	9455
E5	8734	10000	43167	48766	7859
E6	5600	33024	8288	68640	9553
E7	9000	20891	49403	69332	10961
E8	5600	41017	19769	55800	6687
E9	7694	31375	29553	62730	8842
E10	8432	21966	53800	70000	6480
E11	8811	23700	32129	38390	9151
E12	6914	14447	17816	45321	8000
E13	7300	12001	36201	63200	10249
E14	6590	15875	13665	33700	5030
E15	8956	26476	10000	48500	9670
E16	7250	44505	13725	44678	6767
E17	8765	40586	12346	67100	8604
E18	8421	26650	11392	45900	7180
E19	5834	30022	80903	15500	10472
E20	8737	21226	100585	36800	8076
E21	5834	21226	49403	62730	8918
E22	8737	24220	20833	70000	8341
E23	9000	10000	43167	38390	11280
E24	5600	23700	11392	44678	9786
E25	7694	30022	80903	69332	9621
E26	8956	31375	100585	55800	8516
E27	7240	21966	32129	57000	7768
E28	8734	12001	17816	49987	8906
E29	6914	15875	36201	48766	8073
E30	7300	44505	19769	68640	6959
E31	6590	39405	37089	48900	9584
E32	8421	28812	13725	20030	10232
E33	8388	20023	12346	45321	9153
E34	8000	40586	31309	45900	6823
E35	5600	26650	11233	48500	10456
E36	8432	26476	29553	15500	8090
E37	8811	33024	53800	67100	11053
E38	6790	20891	8288	36800	5959
E39	7250	14447	13665	63200	9653
E40	8765	41017	10000	33540	6077
Moyenne	7 648	26 311	31 660	49 510	8 658

Annexe 7 : Typologie puits 17, Los Lobos

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Types d'Agriculteurs ↓		Age	a	Surf Puits 17	EF /EC % Luz.	Surf hors Puits 17	Activité Supp.	Aide USA	PFam/Q	Dispo. Travail Familial	Dispo. Travail Supp.	Trésorerie initiale	Coût Travail Salarial
Agriculteur				(ha)		(ha)			(pesos)	(UTH)	(j/Q)	(pesos)	(pesos)
I1	Ramiro Guadalupe Fernando	<50	0.3	11.1	10%	40	OUI		0	0	40	110000	90
I2	Antonio M Delfino	>50	0.45	4		8			825 1650	0.5 1.2	5 10	35000	100
I3	Antonio P Rafael P	>50	0.4	5.8	EC 33%			OUI	1150 2300	1.25 2.5	5 10	50000	100
I4	Jose M Javier Nicolas B	<50	0.35	12	EF 10%			OUI	1150 3450	1.25 3.75	5 15	100000	90
I5	Fransisco Albino Merced Sixto	>50	0.45	16.8	EF 10%			OUI	1150 4600	1.25 5	3 12	130000	110
I6	Jesus Rafael M Enrique C Miguel D	<50	0.35	4			OUI		275 1100	0.25 1	3 12	40000	90

(1) Age

(2) a coefficient d'aversion au risque

(3) Surface dans le puits (ha)

(4) Élevage familial et commercial et % de la surface semée en luzerne

→ Activité d'élevage familial (EF) ou commercial (EC)

→ Pourcentage de l'assolement semé en fourrage (ici luzerne exclusivement)

(5) Surface hors puits

Surface des parcelles que l'agriculteur possède hors du puits concerné. Ce sont des parcelles irriguées par d'autres puits collectifs de la zone, plus rarement des parcelles de temporal (sans accès à l'eau d'irrigation).

(6) Activité supplémentaire exercée par le chef d'exploitation

→ Activité rémunérée autre que culture ou élevage, exercée par le chef d'exploitation.

Nous avons considéré que l'exercice d'une activité extérieure hors agriculture ou élevage était susceptible d'influer la stratégie de l'agriculteur en modifiant sa disponibilité horaire sur l'exploitation, et la contrainte de trésorerie. Voir paragraphes suivants.

(7) Aide financière des membres de la famille aux USA

Nous avons fait deux hypothèses :

→ Pour les familles en situation la plus difficile (peu de surface en propriété et pas de source de revenu supplémentaire, ou personnes âgées), cette aide financière a été supposée régulière pendant le cycle d'hiver au moins, et a été fixée après calibration du modèle à une valeur de 1000 p / mois.

→ Pour les familles dont on suppose plus d'aisance, il n'a pas été « attribué » dans le modèle d'aide financière mensuelle provenant des USA.

(8) Valeur prélèvements familiaux par quinzaine Q

Nous ne disposons pas de données précises d'enquête. Les valeurs choisies proviennent d'estimations et de la calibration du modèle. La taille des familles étant relativement réduite à Los Lobos, sans doute du fait de l'exode important vers les USA, nous avons basé le calcul des prélèvements familiaux (PFam) sur un foyer composé de 4 personnes, avec une dépense moyenne de 25 à 30 pesos par jour par personne. Ces calculs nous amènent à une valeur de 1650 p de prélèvements familiaux par quinzaine Q. Ces prélèvements familiaux ont été ensuite plus ou moins réduits, selon les cas :

→ aide financière provenant de l'émigration aux USA (groupes I3, I4, I5)

→ revenu provenant d'une activité extérieure (groupes I1, I6)

→ parcelles cultivées en dehors du puits (groupes I1, I2)

→ activité d'élevage à fins commerciales (I3)

Pour le groupe I1, nous avons jugé qu'étant donné l'ampleur de leur situation économique, les prélèvements privés réalisés sur la culture des quelques hectares du puits pouvaient être considérés comme nuls.

(9) Disponibilités en main-d'œuvre familiale (sur les parcelles appartenant au puits d'étude)

Nous avons opté pour une base de 1.25 UTH / exploitation, ce qui représente le chef d'exploitation, et l'aide ponctuelle de quelques membres de la famille. Il est courant que les enfants et l'épouse participent un peu aux travaux culturels, notamment pour la coupe de la luzerne. Cette disponibilité en main-d'œuvre a été réduite selon les cas :

→ parcelles cultivées en dehors du puits (groupes I1, I2)

→ activité extérieure à l'exploitation (groupes I1, I6)

Nous avons considéré que les agriculteurs du groupe I1 faisaient réaliser la globalité des opérations culturales par des ouvriers. Nous ne leur avons donc pas attribué de disponibilité en main-d'œuvre familiale.

(10) Disponibilité en jours de travail familial supplémentaire. Nous avons pris une base « d'extension » du travail familial comptant 5 jours de travail supplémentaire par période Q. Ce chiffre a été réduit pour les agriculteurs âgés et ceux exerçant une activité extérieure (groupes I5 et I6).

Rem : Le cas du groupe I1 a été traité à part. Pour représenter que toutes les opérations culturales sont réalisées par des ouvriers, il a été plus simple, pour des questions d'écriture du modèle, de remplacer la ressource « disponibilité en main-d'œuvre familiale » par du « travail familial supplémentaire » facturé à 90 p / jour.

(11) Coût du travail salarial

Dans cette zone, une journée de travail d'un ouvrier se paye 90 pesos.

Nous avons choisi d'élever ce prix dans certains cas pour traduire un coût supplémentaire liée à la pénibilité de l'embauche : recherche d'ouvriers, leur transport jusqu'aux parcelles...

Ces aspects de l'embauche sont plus rebutants pour les agriculteurs âgés, et nous avons donc choisi d'attribuer des coûts d'embauche salariale de 100p ou 110p au lieu des 90 p aux groupes I2, I3, I5.

(12) Trésorerie initiale en début de cyclez OI

Elle représente les liquidités dont dispose l'agriculteur pour le semis de cycle OI au sortir du cycle d'été (PV). Après calibration des modèles de Los Lobos et San Juan, nous avons opté pour une valeur approchant les 10 000 p.

Annexe 8 : Règles de gestion de l'eau dans le puits collectif de San Juan Grande

Le village de San Juan se situe dans le *municipio* de Huanimaro.

Le module d'irrigation de Huanimaro ne parvient pas à fournir toutes les zones en eau d'irrigation de surface : 25 % de la surface du module sont irrigués par eau souterraine (Kloezen & Al., 1997 cité par (Gillet & Ollivier, 2002). Certaines parties hautes, en position de piémont comme c'est le cas pour le village de San Juan, n'y ont pas accès.

Pour combler les lacunes du réseau superficiel, le gouvernement du Guanajuato a réalisé la construction de 7 puits officiels dans les années 1980, (par exemple celui de La Lobera à Huanimaro que nous avons également étudié).

De plus, indépendamment du programme gouvernemental, des groupes d'agriculteurs (souvent des *ejidos*) se sont organisés pour forer des puits supplémentaires. Le puits de San Juan, que nous présentons ici succinctement, fait partie de ces puits.

I – Caractéristiques agronomiques du puits

A – Des surfaces agricoles hétérogènes et souvent difficiles à travailler

Le village de San Juan et la superficie agricole du puits se situent au pied de petites montagnes et l'ensemble du terrain est donc assez pentu. La surface totale théorique du puits compte 50 ha et se divise en 11 parcelles.

On différencie 2 types de sols sur ces parcelles : des sols de type vertisol, plutôt fertiles et profonds mais sujets aux fentes de retrait et des sols de type argilo-sableux, plus pauvres, parfois pierreux, avec par endroits des remontées de terre blanche stérile. L'irrigation ne se gère pas de la même manière sur ces 2 sols et les temps d'irrigation à l'hectare sont très variables dans le puits. L'implantation de toutes les cultures maraîchères ne peut pas se faire dans ces sols. Les carottes par exemple ne poussent pas suffisamment droit pour satisfaire aux critères de qualité.

Certaines parcelles présentent des reliefs très irréguliers. Un des agriculteurs a fait réaliser un nivellement laser, mais la présence de terre blanche représente un frein à ce type d'opération car beaucoup d'agriculteurs craignent d'amplifier le problème en remuant le sol. Le coût de l'opération reste néanmoins l'obstacle majeur.

B – Diversité des cultures adoptées

On trouve dans ce puits une grande diversité de cultures, aussi bien pendant le cycle OI que le cycle PV. La particularité de ce puits est l'intégration de cultures horticoles à plus de 50% dans l'assolement (tableau 23). Nous avons vu (Partie 1, IV, 1-E) qu'une telle proportion de cultures horticoles dans la surface cultivée d'un puits collectif était relativement rare.

Les agriculteurs de San Juan sont libres du choix de leur production. Les cultures horticoles de l'année à venir se décident surtout en fonction des demandes des entreprises d'exportation et des demandes des revendeurs avec lesquels les agriculteurs travaillent. Seuls 3 agriculteurs ont choisi de travailler sous contrat avec des entreprises d'exportation. Ceux qui ne travaillent pas sous contrat ne sont pas en général producteurs purs de cultures horticoles. Ils sèment des surfaces en céréales dans le puits ou dans leurs parcelles à l'extérieur. Tous les producteurs horticoles sèment au minimum deux différentes cultures sur leurs parcelles. Cette diversification est nécessaire étant donné le haut niveau de risque des cultures maraîchères. Le seul membre du puits non producteur de cultures horticoles travaille comme professeur à

Irrapuato (ville voisine) et ne vit pas sur l'exploitation. Son père et son frère en revanche sont restés au village et le secondent pour les principaux travaux sur céréales.

Certains agriculteurs n'ont pas semé cette année : presque 4 ha sont ainsi restés non cultivés et donc non irrigués. Des raisons climatiques ont été invoquées (les pluies tardives ont empêché de semer à temps), ou personnelles. Il semble cependant que la totalité des 50 ha du puits ne soit pas forcément cultivée chaque année pendant le cycle OI, ce qui a pour conséquence de diminuer la pression sur l'eau (voir III-C).

Le tableau ci-dessous indique les répartitions des surfaces agricoles appartenant au puits de San Juan pour le cycle OI 2002-2003.

	Céréales	Cultures horticoles sous contrat	Cultures horticoles hors contrat	Cultures alimentaires	Friche
Surface totale du puits	13	6	24	3.5	3.75
% de la surface totale	26 %	12 %	48 %	7 %	7 %

II – Caractéristiques des exploitations de San Juan

Les membres du puits sont au nombre de 10. La petite dimension du groupe facilite sans doute les accords collectifs. De plus, le représentant du puits se distingue par son dynamisme et son esprit d'entreprise.

Certaines caractéristiques nous ont semblé particulières aux exploitants de San Juan :

- Surfaces de cultures intra-puits fortement variables : de 2.5 ha à 6.75 ha, avec une moyenne relativement élevée, de 5 ha. La moyenne était de 4,3 ha sur les 36 puits étudiés (Cf. chap IV, II-D)
- Détention de superficies irrigables non négligeables en dehors du puits concerné, pour au moins 3 des membres.
- Emigration plus modérée des jeunes, en comparaison avec d'autres zones : peu d'agriculteurs font mention d'un membre de la famille aux Etats-Unis. De fait, les fils des agriculteurs aident souvent au travail à la parcelle.
- Exercice de l'activité agricole à plein temps. Seul agriculteur exerçant une activité extérieure rémunératrice (professeur en lycée agricole). Ceci est à relier notamment aux cultures horticoles qui nécessitent des quantités de travail considérables, et particulièrement pendant certaines phases intensives (semis, récolte...).

Tab 24 : Répartition par agriculteur des surfaces du puits de San Juan, cycle OI 2003.

Superficies→ (en ha)	Superficie totale	Superficie horticole	Superficie céréales	Culture alimentaire	Superficie en friche	Superficie totale irriguée
José	4	1 cornichon	2 blé	0.5 haricot 0.5maïs blanc		4
Armando	6	3 brocolis 2 courgette 1 cornichon				6
Angel	6		5 blé tendre		1	5
Alfonso	6.75	1 courgette 2 tomate verte 1 cornichon 2.75 (location)				6.75
Jose H	5.75	4.75 courgette 1 tomate verte				5.75
Refugio	6.5	3 tomate verte	3 orge	0.5 haricot		6.5
Macario	5.75	0.5 pomme de terre 2 autre	2 (location)		1.25	
Luis	2.5	1.25 oignon 1.25 courgette				2.5
Benito	3	1.5 tomate verte			1.5	1.5
Remedio	4	1 tomate verte	1 blé tendre	1 maïs B 1 haricot		4
Groupe	50.25	30	13	3.50	3.75	46.50

III - Caractéristiques techniques du puits et du système de pompage

A – Efficience du système de pompage de l’eau

La pompe a fait l’objet d’un diagnostic d’efficience technique réalisé par le CEAR. (*Centro de Educacion y Asistencia del Irrigation*). Nous n’avons pas eu accès jusqu’à présent (nov. 2003) aux conclusions définitives ni à l’estimation de l’efficience électro-mécanique de la pompe.

D’après les mesures réalisées pendant le cycle OI 2001 – 2002 par le technicien ASOSID chargé de ce puits, le débit était de 45.8 l.s⁻¹.

B - Coût d’extraction de l’eau

Le prix au m³ a été calculé grâce à l’observation des consommations kW au cours des irrigations et la liaison avec les factures d’électricité.

Le coût a ainsi été évalué à 30 p/h, soit 0.1789 p/m³ avec un débit de 45.8 l.s⁻¹

C - Pression moyenne sur la ressource en eau

On mesure la pression sur l’eau au rapport : R = débit du puits / STH (surface théorique) :
R_{SAN JUAN} = 0,91

Ce rapport indique pour le puits de San Juan une pression sur l'eau légèrement plus forte que pour la moyenne théorique de 1 l.s^{-1} .

Cependant, pendant le cycle OI 2003, toutes les surfaces du puits n'ont pas été semées : presque 4 ha sont restés en friche. Cela hausse le rapport $R_{\text{SAN JUAN}}$ à 0.99 pour l'année 2003 en même temps que la pression sur l'eau diminue. Cette situation n'est pas habituelle, mais il arrive que des petites surfaces ne soient pas semées certaines années.

La pression sur l'eau est moins forte qu'à Los lobos, mais plusieurs agriculteurs mentionnent néanmoins des retards récurrents en fin de cycle, quand la pression sur l'eau devient plus importante :

→ sur le blé, ce qui occasionne des pertes de rendements élevées, même pour des retards de quelques jours.

→ sur les cultures horticoles. Un agriculteur s'est plaint cette année que l'eau n'ait pas été disponible pour une partie de sa surface maraîchère au moment de l'irrigation « de rattrapage », qui s'effectue une semaine après l'irrigation de semis, pour faire germer les semences retardataires.

IV – Déroulement des irrigations, détermination du Tour d'Eau et règles d'organisation au sein du puits

A - Stratégies et techniques d'irrigation

Déroulement du Tour d'eau

Le rythme et l'enchaînement des irrigations de ce puits sont assez complexes.

Etant donné la diversité des cultures, les dates de semis s'étalent tout au long du cycle, ainsi que les calendriers d'irrigation.

Chaque agriculteur semant des cultures différentes à des périodes différentes, il n'y a pas de « tour » d'irrigation bien identifié, mais plutôt plusieurs tours d'eau intercalés : le tour d'eau sur céréales se chevauche en décembre avec les derniers tours d'eau sur les brocolis, les premières irrigations sur tomates et courgettes qui commencent en janvier et celles sur le cornichon depuis février jusqu'à mai.

Le puits reste rarement éteint une semaine entière. En revanche, il fonctionne souvent de manière discontinue avec des arrêts et reprises fréquents.

Les agriculteurs suivent l'ordre de semis plutôt de manière indicative. Il arrive que l'ordre s'inverse entre deux agriculteurs d'une irrigation à l'autre, généralement d'un accord commun suivant les intérêts de chacun.

Techniques d'irrigation

Etant donné le morcellement d'une même parcelle en différentes cultures, les agriculteurs doivent irriguer par petites surfaces. Ils procèdent fréquemment au partage du débit, afin d'éviter les problèmes d'érosion et d'humidification insuffisante qui se créent lorsque l'eau court trop vite sur la parcelle.

Les tubes PCV ne sont pas utilisés systématiquement.

Les durées d'irrigation à l'hectare sur blé sont extrêmement variables d'un agriculteur à l'autre. Nous avons vu que le type de sol et le degré de pente diffèrent d'une parcelle à l'autre. De plus, les pratiques agricoles sont relativement hétérogènes dans ce groupe : certains éléments, plus dynamiques ou motivés,

testent de nouvelles pratiques (semis direct par exemple). Les pratiques agricoles, notamment de préparation du sol (semis direct ou semis après labour), et de gestion des résidus de sorgo (brûlés après récolte, ou bien laissés sur la parcelle), influent fortement sur l'évaporation en eau du sol et sur la vitesse d'avancée de l'eau au cours de l'irrigation.

Dates et durées des irrigations

D'après ce qui vient d'être rappelé au paragraphe précédent, on comprend que les durées d'irrigation à l'hectare relevées puissent varier fortement d'un agriculteur à l'autre. Ceci se traduira dans le modèle au niveau des coefficients d'irrigation.

Nous avons effectivement constaté pour le cycle 2002-2003 des durées d'irrigation du blé à l'hectare variant entre 7h et plus de 20 h, selon les utilisateurs, selon les parcelles et l'époque d'irrigation (l'irrigation de semis étant plus légère que les auxiliaires qui arrivent au moment où les températures s'élèvent).

Il serait trop compliqué d'essayer de reproduire ici toutes les dates d'irrigations étant donné la complexité de l'utilisation de l'eau au sein de ce puits : la main d'eau passe entre les utilisateurs selon les besoins des cultures et les dates de semis.

Les calendriers d'irrigation définis dans le modèle se sont calqués sur ceux appliqués à San Juan. Les cultures horticoles demandent des fréquences d'irrigations très soutenues, tous les 10 jours environ, particulièrement autour de la récolte.

B – Souplesse du tour d'eau et accords au sein du groupe

Nous avons vu qu'il s'agissait non pas d'un tour d'eau unique basé sur les céréales, mais de plusieurs tours d'eau intercalés, basés sur des fréquences différentes. Ces tours multiples demandent beaucoup de souplesse et de flexibilité dans les passages de la main d'eau entre utilisateurs. Même sur les céréales, l'ordre peut être modifié en fonction d'arrangements entre producteurs, notamment pour faciliter les irrigations du membre du puits vivant à la ville d'Irapuato.

Il semble que le groupe se soit entendu pour que, en cas de concurrence sur l'eau, la priorité soit laissée aux cultures horticoles. Presque tous les agriculteurs étant producteurs de cultures horticoles, ils sont sensibles aux dégâts occasionnés par un retard d'eau. Cependant, cela n'exclut pas des concurrences entre cultures horticoles elles-mêmes. Il est clair que dès le mois de février, la pression se fait plus forte car l'ensemble des cultures arrive à une période de demande croissante en eau (floraison, début de récolte), et que les températures deviennent plus élevées.

Cette pression engendre quelques litiges (Cf. II-C). Certains agriculteurs voudraient qu'un véritable accord soit mis en place pour définir les priorités d'irrigation, l'accord actuel n'étant que oral.

Le fait que deux entreprises d'exportation agricoles aient établi des contrats avec ces *ejidatarios* nous semble être néanmoins un signe de bon fonctionnement du puits.

C - Système de paiement

Après quelques années de négociations, le puits a effectué une transition vers la facturation volumétrique. Ce système de facturation est indispensable étant donné les hétérogénéités de consommation d'eau liées à la large gamme de cultures mises en place. Chaque agriculteur relève donc ses propres temps d'utilisation de l'eau, entre le moment où il allume le puits, (ou bien reçoit l'eau de son voisin), et celui où il l'éteint (ou il repasse la main d'eau). Il n'a pas été évoqué de soupçons de tricherie, ce qui arrive pourtant fréquemment dans ce genre de système. Le fait que le groupe soit de petite taille est sans doute un atout pour l'implémentation de la facturation au m³. Il est possible que certains agriculteurs aient été pénalisés

par ce changement du fait des caractéristiques de certaines parcelles peu propices aux économies d'eau (pente, relief...)

Les agriculteurs de San Juan semblent chercher activement des solutions pour résister au contexte économique défavorable ainsi que pour dépasser certains handicaps naturels pédologiques et agronomiques, liés à leur situation géographique. Le puits de San Juan se démarque des autres puits étudiés par sa souplesse de fonctionnement : on n'y observe pas de réglementation rigide sur le droit d'accès à l'eau, ni sur l'allocation ni sur la distribution.

Le tour d'eau instauré est nettement moins contraignant qu'à Los Lobos, même s'il continue de conditionner fortement la production agricole, surtout les années de plus forte pression sur l'eau. Le calcul de la pression sur l'eau pour l'année 2002-2003 donne un rapport proche de 1 : $R_{\text{SAN JUAN}} = 0.99$, qui indique une pression sur l'eau correcte. Celle-ci est due à un débit qui reste élevé : 46 l.s^{-1} , mais également à des diminutions de la surface irriguée.

Grâce au dynamisme de ses membres et de son représentant et sans doute facilités par la petite taille du groupe, les accords entre membres ont abouti à d'importantes modifications du règlement d'origine, notamment le passage au paiement au volume. La diversification des cultures consentie permet aujourd'hui au puits d'être producteur horticole à plus de 50 %.

Annexe 9 : Listing modèle collectif de Los Lobos

\$Ontext

\$Offtext

***** INDICES *****

Sets I individus /I1,I2,I3,I4,I5,I6/
 C cultures /LOCA,T4,T3,Br1,Br2,Tv5,Tv6,Pp8,C4,C5,C4b,C3,LZ1,LZ2
 LZ3,T4i,T3i,Br1i,Br2i,Tv5i,Tv6i,Pp8i,C4i,C5i,C4bi,C3i/
 C1(C) /LOCA,T4,T3,Br1,Br2,Tv5,Tv6,Pp8,C4,C5,C4b,C3,LZ1,LZ2,LZ3/
 C2(C) /LOCA,T4i,T3i,Br1i,Br2i,Tv5i,Tv6i,Pp8i,C4i,C5i,C4bi,C3i/
 Cluz(C) /LZ1,LZ2,LZ3/
 CCer(C) cereales /T4,T3,C4,C5,C4b,C3,T4i,T3i,C4i,C5i,C4bi,C3i/
 CHor(C) hortalisas /Br1,Br2,Tv5,Tv6,Pp8,Br1i,Br2i,Tv5i,Tv6i,Pp8i/
 S semaines (periode de base du calendrier) /S1*S28/
 M /M1*M7/
 Q quinzaines /Q1*Q14/
 E etats de la nature sur chiffre d'affaire /E1*E40/

***** DONNEES *****

Scalars

n nbre de j travaillables dans 1 periode Q /13/
 PE prix du m3 d eau /0.16/
 txF taux emprunCCT fournisseur /0.1/
 maxCF valeur max du CCT accorde par Fournisseur /15000/
 d debit journalier avec un debit de 40 l s /3456/

***** CARACTERISATION AGRICULTEURS *****

Parameters

a(I) aversion au risque /I1 0.3, I2 0.45, I3 0.4 , I4 0.35, I5 0.45, I6 0.35/
 DTERRE(I) disponibilite de terre en hectares /I1 11.1, I2 4 , I3 5.8 , I4 12 , I5 16.8, I6 4 /
 UTH(I) MO familiale /I1 0 , I2 1, I3 2.5 , I4 3.75, I5 4 , I6 1 /
 ns(I) max de j de travail supp par Q /I1 500 , I2 10 , I3 10 , I4 15 , I5 12 , I6 12 /
 CWSal(I) cout travail salarial par jour /(I1,I4,I6) 90,(I2,I3)100, (I5) 110 /
 CWFsupp(I) cout virtuel heures supp familiales /I1 90, (I2,I3,I4,I5,I6) 120 /
 Ti(I) tresorerie initiale en Q1 /I1 110000, I2 35000, I3 50000, I4 100000, I5 130000, I6 40000 /
 txB(I) taux empruntCCT banque /(I2,I3,I4,I5,I6) 0.12 , (I1) 0.07 /
 maxCB(I) max emprunt Banque /I1 110000, I2 20000, I3 30000, I4 60000, I5 84000, I6 20000 /
 PFam(I) Prelev familiaux periode Q /I1 0, I2 1100, I3 2100, I4 3450 , I5 4600 , I6 1200 /
 k(I) efficience irrigation /(I1,I4)0.65,(I2,I3,I6)0.55,(I5) 0.60/

***** CA *****

TABLE CAE(E,C) Chiffre Affaire par Etat de nature

\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabCAAll.txt

TABLE a2(C,I) aversion ou impossibilite de cultiver

	I1	I2	I3	I4	I5	I6
LOCA	1	1	1	1	1	1
*Br1	1	1	1	1	1	1

*Br2	1	1	1	1	1	1
*Tv5	1	1	1	1	1	1
*Tv6	1	1	1	1	1	1
*Pp8	1	1	1	1	1	1
*Br1i	1	1	1	1	1	1
*Br2i	1	1	1	1	1	1
*Tv5i	1	1	1	1	1	1
*Tv6i	1	1	1	1	1	1
*Pp8i	1	1	1	1	1	1

TABLE mCA(C,Q) matrice des CA selon Q

	Q7	Q8	Q12	Q13	Q14	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11
LOCA					1									
T4				1										
T3			1											
Br1	1													
Br2		1												
Tv5			1											
Tv6				1										
Pp8					1									
C4					1									
C5					1									
C4b					1									
C3					1									
T4i					1									
T3i			1											
Br1i	1													
Br2i		1												
Tv5i			1											
Tv6i				1										
Pp8i					1									
C4i					1									
C5i					1									
C4bi					1									
C3i					1									
LZ1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LZ2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LZ3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Parameter CA(C,E,Q,I) calcul final du CA par periode et pour chaque E;

$CA(C,E,Q,I) = CAE(E,C) * mCA(C,Q) * (1 - a2(C,I))$

display CA ;

*****PARAMETRES DES CULTURES*****

TABLE DA1(Q,C1) sorties argent liees a activite agricole hors postes MO et EAU

\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabDA.txt

TABLE DFC1(Q,C1) deduction des frais de culture au moment de l'apport de la recolte

\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabDFC.txt

TABLE BWF1(Q,C1) besoin en travail familial (en journees)

\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabBWF.txt

TABLE BWS1 (Q,C1) besoin en MO salariée (en journées)
 $\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabBWS.txt$

Parameter matR(Q) matrice de date des remboursements credit
 $/Q1*Q13\ 0, Q14\ 1/$
 ;

***** EAU *****

Parameters

DEM(M) disponibilite en eau du puits sur 1 mois (m3) pour un debit de 40 l.s
 $/M1*M7\ 96768/$

DEQ(Q) disponibilite en eau par quinzaine
 $/Q1*Q14\ 48384/$

DES(S) disponibilite en eau par semaine si tour par semaine
 $/S1*S28\ 24192/$

TABLE DEQi(Q,I) disponibilite en eau par individu par quinzaine
 $\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabDEQi.txt$

TABLE DESi(S,I) disponibilite en eau par individu par semaine
 $\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabDESi.txt$

TABLE BES1(S,C1) besoins en eau des hortalias pour chq semaine (en m3)
 $\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabBES.txt$

TABLE BEQ1(Q,C1)
 $\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabBEQ.txt$

TABLE BEM1(M,C1) besoins en eau des cultures par mois
 $\$include C:\Documents and Settings\sarah\Mes documents\Finclude\TabBEM.txt$
 ;

***** LIAISON C1 C2 *****

TABLE matC1C2(C1,C2) matrice reliant les C1 aux C2
 T3i T4i Br1i Br2i Tv5i Tv6i Pp8i C4i C5i C4bi C3i
 T3 1
 T4 1
 Br1 1
 Br2 1
 Tv5 1
 Tv6 1
 Pp8 1
 C4 1
 C5 1
 C4b 1
 C3 1

Parameter DA2(Q,C2);
 $DA2(Q,C2) = \text{sum}(C1, \text{matC1C2}(C1,C2) * DA1(Q,C1))$;
 Parameter DFC2(Q,C2);

```

DFC2(Q,C2)= sum(C1,matC1C2(C1,C2)* DFC1(Q,C1));
Parameter BWF2(Q,C2);
BWF2(Q,C2)= sum(C1,matC1C2(C1,C2)* BWF1(Q,C1));
Parameter BWS2(Q,C2);
BWS2(Q,C2)= sum(C1,matC1C2(C1,C2)* BWS1(Q,C1));
Parameter BEQ2(Q,C2);
BEQ2(Q,C2) = sum(C1,matC1C2(C1,C2)* BEQ1(Q,C1));
Parameter BEM2(M,C2);
BEM2(M,C2) = sum(C1,matC1C2(C1,C2)* BEM1(M,C1));

```

```

Parameters BES2(S,C2);
BES2(S,C2) = 0 ;

```

```

Display DA2;

```

***** **CALCUL MARGE BRUTE** *****

```

Parameter MBQ1(C1,E,Q,I) marge brute calculee sans le cout EAU ni WFsupp ;
MBQ1(C1,E,Q,I) = CA(C1,E,Q,I)- DA1(Q,C1)- DFC1(Q,C1) - BWS1(Q,C1)*CWSal(I)

```

```

Parameter MBQ2(C2,E,Q,I) marge brute calculee sans le cout EAU ni WFsupp ;
MBQ2(C2,E,Q,I) = CA(C2,E,Q,I)- DA2(Q,C2)- DFC2(Q,C2) - BWS2(Q,C2)*CWSal(I)

```

TABLE matCC1(C,C1) matrice reliant les C aux C1

	T3	T4	Br1	Br2	Tv5	Tv6	Pp8	C4	C5	C4b	C3	LZ1	LZ2	LZ3
T3	1													
T4		1												
Br1			1											
Br2				1										
Tv5					1									
Tv6						1								
Pp8							1							
C4								1						
C5									1					
C4b										1				
C3											1			
LZ1												1		
LZ2													1	
LZ3														1

TABLE matCC2(C,C2) matrice reliant les C aux C2

	T3i	T4i	Br1i	Br2i	Tv5i	Tv6i	Pp8i	LOCA	C4i	C5i	C4bi	C3i
T3i	1											
T4i		1										
Br1i			1									
Br2i				1								
Tv5i					1							
Tv6i						1						
Pp8i							1					
LOCA								1				
C4i									1			
C5i										1		
C4bi											1	
C3i												1

Parameter MBQ (C,E,Q,I);

$$MBQ(C,E,Q,I) = \text{sum}(C1, \text{matCC1}(C,C1) * MBQ1(C1,E,Q,I)) + \text{sum}(C2, \text{matCC2}(C,C2) * MBQ2(C2,E,Q,I));$$

Parameter MBT(C,E,I);

$$MBT(C,E,I) = \text{sum}(Q, MBQ(C,E,Q,I));$$

Parameter MBmoy(C,I) ;

$$MBmoy(C,I) = \text{sum}(E, MBT(C,E,I)) / \text{card}(E);$$

 Display MBQ, MBT, MBmoy;

***** **EQUATIONS** *****

Variables

Rall(E,I) revenu pour chaque etat de la nature

Rml(I) revenu moyen des Ral

Z a maximiser

RG SOMME DES REVENUS MOYENS INDIVIDUELS

;

Positive variables

X(C,I) superficie par culture (ha) pour chaque individu

Xg(C) superficie globale par culture sur le puits

Wsal(Q,I) quantite de travail salarie embauche par periode

Wfsupp(Q,I) quantite W familial heure supp

WFam(Q,I) quantite de travail familial utilise

T (Q,E,I) tresorerie debut de periode

CB (Q,E,I) valeur de CCT (credit court terme) Banque

CF (Q,E,I) valeur de CCT Fournisseur

AESi(S,I) apports en eau par semaine

AEMi(M,I) apports totaux par mois

AEQi(Q,I) apports totaux par quinzaine

AETOT CONSOMMATION EAU TOTALE m3

FETOT FACTURE EAU TOTALE

FETOTha FACTURE EAU PAR ha

ECTYPE(I)

;

FETOTha.UP = 1300 ;

FETOTha.LO = 800

;

Equations

REVENUaI calcul du revenu aleatoire pour chaque E et chaque I

REVENUmoyI calcul du revenu moyen de chaque I

REVENUG calcul Revenu Global

OBJECTIF fonction objectif

ECART ecart type des revenus par etat de nature de chaque I

TRESOR calcul tresorerie de chaque I
 TINI on fixe tresorerie initiale pour chaque I
 TRESORF on impose tresorerie finale positive pour chaque I

 TERRE contrainte de terre

 CtravailF calcul quantite de W familial utilise
 TRAVAILF contrainte sur travail familial
 TRAVAILS calcul quantite travail salarie
 LimWFsupp limitation heures supp

 CsurfaceG calcul de la surface globale d une meme culture
 CLOCA interdiction location
 AppEAUM calcul de l'apport en eau par mois POUR CHAQUE i
 AppEAUS calcul de l'apport en eau par semaine POUR CHAQUE i
 AppEAUQ calcul de l'apport en eau par quinzaine POUR CHAQUE i
 AppEAUTOT calcul de l'apport total en eau POUR L'ENSEMBLE des i
 EAUM contrainte en eau par mois
 EAUS contrainte en eau par semaine
 EAUQ contrainte en eau par quinzaine

 CTES contrainte TE a la semaine
 CTEQ contrainte TE a la quinzaine

 CfactuEAU calcul de la facuration en eau par ha
 CfactuEAUha

 LimCREDITF limite credit fournisseur
 LimCREDITB limite credit banque

 ;
 REVENUall(E,I).. $\text{sum}(C, \text{MBT}(C,E,I)*X(C,I))$
 $-\text{sum}(Q, \text{WFsupp}(Q,I)*\text{CWFsupp}(I)) - \text{sum}(C, X(C,I))*\text{FETOTha}$
 $-\text{card}(Q)*\text{PFam}(I)$
 $-\text{sum}(Q, \text{CB}(Q,E,I)*\text{txB}(I) + \text{CF}(Q,E,I)*\text{txF})$
 $=e= \text{Rall}(E,I)$
 ;
 REVENUmoyI(I).. $\text{sum}(E, \text{Rall}(E,I))/\text{card}(E) =e= \text{RmI}(I)$
 ;
 REVENUG.. $\text{sum}(I, \text{RmI}(I)) =e= \text{RG}$
 ;
 ECART(I).. $\text{SQRT}(\text{sum}(E, \text{SQR}(\text{RmI}(I) - \text{Rall}(E,I)))/\text{card}(E)) =E= \text{ECTYPE}(I)$
 ;
 OBJECTIF.. $\text{sum}(I, \text{RmI}(I) - a(I)*\text{ECTYPE}(I)) =e= Z$
 ;
 TRESOR(Q,E,I)\$ (ord(Q)<14).. $\text{T}(Q,E,I) - \text{PFam}(I)$
 $+ \text{sum}(C, X(C,I)*\text{MBQ}(C,E,Q,I)) - \text{sum}(C, X(C,I))*\text{FETOTha}/\text{card}(Q)$
 $+ \text{CB}(Q,E,I) + \text{CF}(Q,E,I)$
 $=e= \text{T}(Q+1,E,I)$
 ;
 TRESORF('Q14',E,I).. $\text{T}('Q14',E,I) - \text{PFam}(I)$
 $+ \text{sum}(C, X(C,I)*\text{MBQ}(C,E,'Q14',I)) - \text{sum}(C, X(C,I))*\text{FETOTha}/\text{card}(Q)$
 $- \text{sum}(Q, \text{CB}(Q,E,I)*(1+\text{txB}(I)) + \text{CF}(Q,E,I)*(1+\text{txF}))$
 $=g= 0$
 ;

```

TINI(E,I).. T('Q1',E,I) =e= Ti(I)
;
TERRE(I).. sum(C, X(C,I)) =l= DTERRE(I)
;
CtravailF(Q,I).. sum(C1,BWF1(Q,C1)*X(C1,I)) + sum(C2,BWF2(Q,C2)*X(C2,I)) =e= WFam(Q,I)
;
TRAVAILF(Q,I).. WFam(Q,I) =l= UTH(I)*N + Wfsupp(Q,I)
;
TRAVAILS(Q,I).. sum(C1,BWS1(Q,C1)*X(C1,I))+ sum (C2,BWS2(Q,C2)*X(C2,I)) =e= Wsal(Q,I)
;
LimWfsupp(Q,I).. Wfsupp(Q,I) =l= ns(I)
;
CsurfaceG(C).. sum(I,X(C,I))=e= Xg(C)
;
CLOCA.. Xg('loca')=e= 0
;
AppEAUM(M,I).. (sum(C1, BEM1(M,C1)* X(C1,I))
+ sum(C2,BEM2(M,C2)* X(C2,I)))/k(I) =e= AEMi(M,I)
;
AppEAUS(S,I).. sum(C1, BES1(S,C1)* X(C1,I))/k(I) =e= AESi(S,I)
;
AppEAUQ(Q,I).. (sum(C1, BEQ1(Q,C1)*X(C1,I))+ sum(C2,BEQ2(Q,C2)*X(C2,I)))/k(I) =e=
AEQi(Q,I)
;
AppEAUTOT.. sum((Q,I), AEQi(Q,I))=e= AETOT
;
EAUM(M).. sum(I,AEMi(M,I)) =l= DEM(M)
;
EAUS(S).. sum(I,AESi(S,I)) =l= DES(S)
;
EAUQ(Q).. sum(I,AEQi(Q,I)) =l= DEQ(Q)
;
CTES(S,I).. AESi(S,I) =l= DESi(S,I)
;
CTEQ(Q,I).. AEQi(Q,I) =l= DEQi(Q,I)
;
CfactuEAU.. AETOT*PE =e= FETOT
;
CfactuEAUha.. FETOT/(0.1+sum(C,Xg(C))) =e= FETOTha
;
limCREDITF(E,I)..sum (Q,CF(Q,E,I)) =l= maxCF
;
LimCREDITB(E,I)..sum (Q,CB(Q,E,I)) =l= maxCB(I)
;

```

***** **MODELE** *****

Model MODEXPLOT choix de techniques /all/;

```

option limrow = 10;
Parameter RESULT(*,*)
Parameter SURFACE(*,*)
Parameter CREDITB(*,*,*)
Parameter CREDITF(*,*,*)
Parameter REAUQ(*,*)

```

***** **SOLUTION** *****

Solve MODEXPLOT using NLP maximizing Z;

RESULT(C,I) = X.L(C,I);
RESULT('Total',I) = sum(C, X.L(C,I));
RESULT('Rev moyen', I) = RmI.L(I);

REAUQ(I,'ConsEAU')= sum(M,AEMi.L(M,I));

SURFACE('SurfTOT',C) = Xg.L(C);
SURFACE('SurfTOT',C) = Xg.L(C);
SURFACE('SurfTOT','Cereales') = sum(CCer,Xg.L(CCer));
SURFACE('SurfTOT','Hortalisas') = sum(CHor,Xg.L(CHor));
SURFACE('SurfTOT','TOT PUITs') = sum(C,Xg.L(C));

SURFACE('SurfTOT','TOT PUITs') = sum(C,Xg.L(C));

Option RESULT:2:1:1;
Option SURFACE:2:1:1;
Option CREDITB:3:1:1;
Option CREDITF:3:1:1;
Option REAUQ:2:1:1;

Display RESULT;
Display SURFACE;
Display REAUQ;
Display RG.L;
Display AETOT.L;
Display FETOT.L;
DISPLAY FETOTa.L;