

Université Montpellier II
Sciences et techniques du Languedoc

THESE de DOCTORAT

pour l'obtention du Diplôme de
Docteur de l'Université Montpellier II
Discipline : Sciences de l'Eau
Formation Doctorale : Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental
Ecole Doctorale : Sciences de la Terre

Présentée par

Sarah FEUILLETTE

**VERS UNE GESTION DE LA DEMANDE SUR UNE NAPPE EN ACCES LIBRE :
EXPLORATION DES INTERACTIONS RESSOURCE USAGES
PAR LES SYSTEMES MULTI-AGENTS**
Application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale.

Soutenue publiquement le 27 mars 2001, devant le Jury composé de :

Michel DESBORDES
Patrick LE GOULVEN
Jean-Marie ATTONATY
Claude MILLIER
Jacques WEBER
Nourredine ENNABLI

Président du jury
Directeur de thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

Pr., Université Montpellier II
Directeur de Recherches, IRD
Directeur de Recherches, INRA
Directeur de Recherches, ENGREF
Directeur de Recherches, CIRAD
Pr., INAT, Tunisie

RÉSUMÉ

Pour enrayer la surexploitation des nappes en accès libre, une gestion de la demande en eau est de plus en plus préconisée. Jusqu'alors, la gestion des nappes a été étudiée par des modèles de fonctionnement du système physique, les usages étant modélisés simplement, sans tenir compte des comportements non marchands, des interactions locales entre usagers, et des investissements à long terme.

Le présent travail, fondé sur le cas de la nappe de Kairouan, vise à tenir compte plus explicitement des comportements socio-économiques réels et à fournir un outil d'aide à la décision. Le modèle SINUSE repose ainsi sur l'hypothèse centrale d'importance des interactions locale sur la dynamique globale. Il représente des agents autonomes communiquant et agissant dans un environnement distribué et réactif. Après avoir permis de tester la validité de l'hypothèse centrale, les simulations sont consacrées à l'évaluation des impacts de certains outils techniques, économiques et réglementaires. Dans le contexte du modèle et parmi les scénarios testés, l'instauration d'un quota semble constituer la mesure la plus efficace pour limiter l'abaissement de la nappe et le coût social de l'intervention de gestion. Si les résultats des simulations doivent être interprétés avec prudence, SINUSE, en tant que formalisation conjointe des dynamiques sociales et physiques du système, peut déjà constituer une base commune stimulant les discussions entre chercheurs et acteurs sur la représentation du système et sur les effets de différentes interventions.

Mots clefs : interactions entre ressource en eau et usages, nappe en accès libre, nappe surexploitée, gestion de la demande, modélisation multi-agent

TOWARDS A DEMAND MANAGEMENT ON A FREE-ACCESSIBLE WATERTABLE : EXPLORING INTERACTIONS BETWEEN WATER RESOURCE AND USES BY MULTI-AGENT SYSTEMS. Application to the Kairouan watertable, Center of Tunisia.

Demand management of water resources is more and more recommended to prevent the overexploitation of free-accessible watertables. Until now, models on watertable management have been focusing on physical processes, water demand being simply modelled, without taking into account non-market behaviours, local interactions between users, and long term investments.

The present work, based on the Kairouan watertable case, aims at accounting for more explicit socio-economic behaviours and at providing a tool for decision making. A model, named SINUSE, is therefore proposed, which lies on the main hypothesis that local interactions have an impact on the global dynamic of the system. This model represents autonomous agents, communicating and acting in a distributed and reactive environment. After having allowed to test the validity of the central hypothesis, simulations were devoted to assess the impacts of some technical, economical and regulatory tools of demand management. In the model context, and among the tested scenarios, the establishment of water quotas appears to be the most efficient tool to limit both the watertable falling and the social cost of the measure. Provided that the simulations results have to be cautiously interpreted, SINUSE, as a joint implementation of social and physical dynamics, can already constitute a common basis stimulating discussions between researchers and actors, about the system representation and about the effects of different management measures.

Je tiens en premier lieu à remercier les personnes qui ont encadré mon travail.

Patrick Le Goulven m'a donné les moyens de mener ma recherche. En Tunisie, il m'a fait bénéficier de sa riche expérience du travail de terrain et m'a accordé une autonomie appréciable. C'est sans doute à lui que je dois mon goût pour la gestion de l'eau à l'interface entre système physique et société. Patrice Garin a depuis le début apporté un soutien convaincu et chaleureux à mon travail. Il a su m'enrichir de ses conseils avisés, et a toujours offert des réponses réfléchies et promptes aux interrogations que je lui soumettais. J'ai beaucoup apprécié ses qualités scientifiques et humaines. François Bousquet a également contribué pour beaucoup au développement de ce travail, en m'inculquant les bases des systèmes multi-agents, en me faisant réfléchir à l'intérêt du modèle SI NUSE et en m'apportant ses conseils pratiques lors de la phase de modélisation. Le soutien de Christian Leduc a été tout aussi important, pour analyser le foisonnement d'études et de données disponibles et parfois contradictoires sur la nappe de Kairouan.

J'ai également tiré partie, à plusieurs étapes de ma thèse, de discussions à propos de mon travail avec différents chercheurs non impliqués dans mon encadrement. Je remercie en particulier Pascal Kosuth et Thierry Rieu pour ces échanges enrichissants.

Je suis très reconnaissante à Claude Millier et à Jean-Marie Attonaty d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, malgré des emplois du temps dignes de leur renommée scientifique ! Jacques Weber, Nourredine Ennabli et Michel Desbordes m'ont fait un grand honneur en acceptant de faire une lecture critique de ma thèse et de se constituer membres du jury ; je les en remercie vivement.

Pour la phase du travail réalisé en Tunisie, je remercie Jacques Bourges et Eric Delaitre, qui m'ont chaleureusement accueillie dans leur foyer, respectivement en mai 1997, lors d'une première mission de terrain, puis à mon arrivée d'expatriée en Tunisie, en septembre 1997, avant que je ne creuse mon nid. Sur le terrain, je remercie toutes les personnes qui ont bien voulu répondre à mes questions, et en particulier les fellahs de la plaine de Kairouan, dont l'accueil a souvent été chaleureux. La sérieuse équipe des enquêteurs tunisiens ainsi que les responsables de secteur ont largement contribué au bon déroulement du travail de terrain. Je tiens en particulier à remercier Raïssi Ahmed, omda de Houfia, qui à plusieurs reprises a sillonné la plaine avec moi et m'a fait bénéficier de sa connaissance de la région. Mes premières tournées de terrain ont été enrichies par la compagnie de Mohamed Ben Younès, technicien de l'IRD, qui m'a enseigné les rudiments de la langue tunisienne, m'a aidée à comprendre les réactions parfois surprenantes de mes interlocuteurs, et m'a donné des conseils bienveillants sur le tact à déployer dans différentes circonstances. Merci à Said, chauffeur-interprète de l'IRD, dont l'entrain et l'humour m'ont aidée à surmonter des conditions de travail difficiles. La sympathie de Hassen a également agrémenté certains voyages. J'ai toujours pu compter, lors de mes séjours à Kairouan, sur la présence amicale et serviable d'Ali Jelliti, du CRDA, grâce à qui je ne me suis jamais sentie seule dans cette ville au climat rude. J'ai apprécié l'accueil des responsables, techniciens et secrétaires du CRDA, en particulier à la Division des Ressources Hydrauliques. Je remercie bien entendu messieurs le gouverneur et le commissaire de Kairouan, ainsi que les délégués de Chébika et de Haffouz, qui m'ont permis de mener mon travail sur le terrain.

Merci à toute l'équipe MERGUSIE pour les études et données dont j'ai pu tirer partie. Mon travail de terrain a bénéficié des conseils expérimentés de Jean Vachez, de Michel Picouet et de Laurent Auclair à la mission IRD de Tunis ; je les en remercie. De manière générale, je tiens à remercier Jacques Claude, le responsable de la mission, pour son accueil, et tous les chercheurs, thésards, stagiaires et techniciens, ainsi que le personnel local de la mission IRD à Tunis. Leur sympathie, les amitiés développées ont ensoleillé le quotidien de ma vie tunisienne.

Lors de la phase de modélisation, Christophe Le Page a toujours répondu promptement à mes questions, notamment sur le plan technique... Merci pour cette aide, et les mots de soutien qui l'ont accompagnée ! Yahaya Nazoumou, qui effectue sa thèse sur la modélisation de la nappe de Kairouan, a également été remarquablement réactif à mes questions - sans jamais s'en impatienter, malgré leur grand nombre !

La dernière année de ce travail s'est déroulée au sein du Laboratoire d'Informatique Appliquée, au centre IRD de Bondy. Pour cela, je remercie vivement Edith Perrier et Jean-Pierre Treuil de m'avoir accueillie dans leur laboratoire, où j'ai pu bénéficier d'un agréable bureau et de ressources informatiques appréciables. Initialement, mon travail devait être suivi à Bondy par Michel Rieu. Je l'ai malheureusement peu connu, mais je me souviens parfaitement de notre unique réunion, et de ses dernières recommandations bienveillantes. De manière générale, je remercie toute l'équipe du LIA pour sa sympathie, son aide et son soutien... Merci en particulier à Chantal Bernard pour la mise en page des photos et des cartes, et à Marie Piron et Stéphanie Carrière pour leurs conseils. Les quelques présentations orales que j'ai pu faire devant l'équipe du LIA ont été très enrichissantes en questions et en remarques. Je n'oublie pas de remercier Françoise Pelletier, souriante et vigilante responsable du réseau informatique ! Mes journées au LIA auraient été bien mornes sans Edem Fianyoy, Yunne Shin et Gaston Pichon, qui ont su les agrémenter de leur bonne humeur (à bon entendeur, salut !) et d'échanges intéressants sur la mondialisation, les relations humaines, l'Afrique... Leur amitié a constitué pour moi un soutien important, et une véritable soupape de décompression. Par ailleurs, je remercie Gaston Pichon pour ses programmes sur mesure de transfert de fichiers et d'analyse statistique, et Yunne Shin qui a attentivement lu et commenté une grande partie de mon travail. J'ai également profité des relectures complémentaires de mes encadrants, de Gilles Belaud, de Gaston Pichon, d'Olivier Barreteau et de Franck Le Gall ; je les en remercie tous vivement.

Je remercie Franck de m'avoir soutenue tout au long de cette aventure, et d'avoir fait preuve de beaucoup de patience et de compréhension dans les moments difficiles. Pardonne-moi, petite Enora, d'avoir été si peu joueuse avec toi durant les nombreux week-ends studieux.

Je ne remercierai jamais assez Christiane et Jos, et Julie, qui pendant plusieurs mois m'ont accueillie chez eux comme leur fille, chaque fin de semaine, et se sont adorablement occupés d'Enora pendant que je travaillais.

Je n'oublie pas non plus les milliers de petits gestes des amis et de la famille - les mots, les discussions, les rires, les nombreuses tablettes de chocolat... qui m'ont insufflé force et joie !

Merci à Gaëlle pour sa présence attentive et précieuse.

Et, même si ces lignes appartiennent pour toi à une autre dimension, merci, doux Pierrot, pour la richesse de nos discussions passées, pour nos folles descentes dans les puits de Kairouan, pour ton amitié, qui est restée.

à Pierre, mon grand ami

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	17
PREMIÈRE PARTIE : LA GESTION DE LA DEMANDE... SUR QUEL SYSTÈME RESSOURCE - USAGES ?	
PRÉLIMINAIRE : UN DÉVELOPPEMENT DURABLE FORT, FAIBLE, OU UN DÉVELOPPEMENT VIABLE ?.....	27
1. LA GESTION DE LA DEMANDE SUR UNE NAPPE : ÉLÉMENTS D'ANALYSE	29
1.1. Une ressource collective en accès libre.....	29
1.2. Les instruments de gestion de la demande appliqués aux ressources collectives.....	31
1.2.1. Plusieurs échelles d'intervention sur la demande en eau.....	31
1.2.2. Des instruments techniques de gestion par la demande.....	33
1.2.3. Des instruments économiques de gestion par la demande.....	34
1.2.3.1. Les tarifications, redevances et taxes	34
1.2.3.2. L'accès payant	35
1.2.3.3. Les marchés de l'eau	35
1.2.4. Des instruments non économiques de gestion par la demande.....	38
1.2.4.1. L'éducation et l'information des usagers	38
1.2.4.2. Les règles d'accès et d'usage	38
a. Prescription de normes	38
b. Prescription de droits d'eau.....	38
c. Les quotas, des droits d'usage particuliers	39
d. Les zones d'accès, outils spatialisés	40
e. Le contrôle de la demande	40
1.2.4.3. Des contrats de gestion.....	41
1.2.5. Choix d'un outil de gestion.....	41
1.2.5.1. L'efficacité des instruments de gestion	41
1.2.5.2. Complémentarité ou exclusion des instruments de gestion	42
1.3. Difficultés de gestion de la demande inhérentes aux nappes.....	42
1.3.1. Les caractéristiques des nappes.....	42
1.3.2.Rendent difficile la mise en œuvre de certaines mesures	43
1.3.3. Les différentes perceptions de la nappe et de l'eau	44
1.3.4. Cadre institutionnel et efficacité des outils de gestion des nappes	46
1.4. La gestion de la demande sur une nappe : quel bilan ?	48
2. LE SYSTÈME NAPPE - USAGES ÉTUDIÉ	50
2.1. La gestion de l'eau en Tunisie.....	50
2.1.1. D'une amélioration de l'offre.....	51
2.1.2. ...A une nécessaire maîtrise de la demande globale.....	52
2.1.3. Le cadre institutionnel de la gestion de l'eau.....	53

2.2. <i>La plaine de Kairouan : une nappe et un contexte agraire</i>	56
2.2.1. La nappe de Kairouan	57
2.2.1.1. Génèse et géométrie de la nappe de Kairouan.....	57
2.2.1.2. Apports et sorties de la nappe.....	58
a. Apports et exutoires	58
b. Qui sont les usagers de la nappe ?	60
2.2.1.3. Un bilan discuté.....	62
2.2.1.4. L'eau de la nappe est-elle de bonne qualité ?.....	63
2.2.1.5. Le suivi de la nappe	63
2.2.1.6. Les modèles de fonctionnement de la nappe	64
2.2.1.7. Un historique des prélèvements... Et des profondeurs	65
2.2.1.8. Les perspectives d'évolution de la nappe	67
2.2.2. Principales caractéristiques du système agraire kairouanais.....	68
2.2.2.1. Un contexte physique difficile.....	69
2.2.2.2. Quelques mots sur l'historique du système.....	70
2.2.2.3. Caractéristiques actuelles du système agraire.....	71
2.2.3. La gestion de la demande sur la nappe de Kairouan	73
2.2.4. Le système d'étude : sous-système de la nappe de Kairouan	75
2.2.4.1. Délimitation du système d'étude	76
2.2.4.2. Point de vue préliminaire sur le système étudié.....	77
a. La nappe dans le système d'étude	77
b. Les usagers du système d'étude	77
c. Les interactions entre ressource et usagers et au sein des usagers.....	78
2.2.4.3. Un regard global sur le système étudié.....	78
3. CHOIX DE MODÉLISATION DU SYSTÈME ÉTUDIÉ.....	82
3.1. <i>Une approche systémique de l'objet d'étude</i>	82
3.2. <i>Quel modèle pour étudier la gestion de la demande sur une nappe ?</i>	84
3.2.1. Un modèle destiné à l'exploration du système	84
3.2.2. Les modèles réductionnistes	85
3.2.2.1. Des modèles hydrogéologiques pour contraindre la demande à l'offre	85
3.2.2.2. Des modèles pour décrire la demande en eau et tester certains outils de gestion.....	85
3.2.3. Les modèles intégrés	88
3.2.4. Intérêts des systèmes multi-agents	90
3.2.4.1. Principes de base des SMA	90
3.2.4.2. Des modèles adaptés à la représentation des dynamiques ressources/usages	91
3.2.4.3. Des modèles pour appuyer des choix de gestion	94
4. VERS LA MODÉLISATION.....	96

DEUXIÈME PARTIE : DU TERRAIN AU MODÈLE

1. UNE COLLECTE DE DONNÉES ESSENTIELLEMENT BASÉE SUR DES ENQUÊTES	102
1.1. <i>Vue d'ensemble de la démarche</i>	102
1.2. <i>Une approche systémique à plusieurs échelles</i>	104
1.2.1. Une approche globale du système	104
1.2.1.1. Quelles données collecter pour la construction du modèle ?.....	104
1.2.1.2. Limites, entités et échelles d'étude du système.....	105
a. Délimitation du système étudié	105
b. Principaux éléments du système étudié	106
c. Echelles de temps et d'espace	107
1.2.2. Une approche systémique des exploitations	108
1.2.2.1. Comment étudier le comportement des agriculteurs ?.....	108
1.2.2.2. ...Sur l'approche « système exploitation-famille ».....	110
1.2.2.3. ...Et sur le contexte rural Maghrébin.....	111
1.3. <i>Des enquêtes pour formaliser le comportement des acteurs</i>	113
1.3.1. Les enquêtes préliminaires : un premier aperçu des stratégies	114
1.3.2. Les enquêtes approfondies : trajectoires d'évolution et précisions sur les déterminants de la demande en eau.....	116
1.3.3. Les enquêtes statistiques : stratégies dominantes, diversité, caractérisation de la zone	117
1.4. <i>Source des données sur la ressource et les points de prélèvement</i>	122
1.4.1. Comment représenter la nappe ?.....	122
1.4.2. Comment modéliser simplement le fonctionnement de la ressource ?	124
1.4.2.1. Cohérence des paramètres hydrogéologiques avec les données de travail.....	124
1.4.2.2. Quels transferts entre les zones ?.....	125
1.4.2.3. La réaction des zones aux prélèvements.....	125
1.4.3. Etude des points d'accès à la ressource	126
1.4.3.1. Comment caractériser les PPI ?.....	126
1.4.3.2. Comment caractériser les puits ?.....	126
2. A L'ISSUE DES ENQUÊTES, UN POINT DE VUE SUR LE SYSTÈME AGRAIRE ÉTUDIÉ.....	127
2.1. <i>Des exploitations morcelées de taille et d'accès à l'eau différents</i>	127
2.2. <i>Les stratégies d'assolement et d'irrigation</i>	130
2.2.1. Une tendance générale à la polyculture	130
2.2.2. Des stratégies d'irrigation différentes selon le type d'accès à l'eau.....	132
2.3. <i>Un objectif commun : l'acquisition ou l'extension de l'irrigation privée</i>	134
2.4. <i>Plusieurs types d'échanges fonciers</i>	136
2.5. <i>La construction et l'approfondissement des puits</i>	138
2.6. <i>D'autres interactions en jeu ?</i>	140
2.7. <i>Les grandes dynamiques du système</i>	142

3. SINUSE, SIMULATEUR DES INTERACTIONS ENTRE NAPPE ET USAGES DE L'EAU	145
3.1. <i>L'hypothèse forte du modèle</i>	145
3.2. <i>Entités et initialisation du modèle</i>	145
3.2.1. Une seule classe #Exploitant pour une diversité de situations	148
3.2.2. Une classe #ZoneNappe pour une nappe hétérogène	149
3.2.3. A l'interface entre ressource et usages : les classes #Parcelle, #Puits, #PPI	151
3.2.4. Un modèle initialisé à l'image du système actuel	152
3.2.4.1 Des exploitations définies à chaque initialisation	152
3.2.4.2 Une configuration initiale fixée pour la nappe	153
3.2.4.3 Un parcellaire fixé pour plusieurs simulations, ou redéfini à chaque initialisation	154
3.2.4.4. Des PPI caractérisés par leur prix de l'eau et leur efficience	155
3.2.4.5 Des puits initialement concentrés dans les zones peu profondes	155
3.3. <i>Formalisation des interactions dans le modèle SINUSE</i>	156
3.3.1. Les attributs économiques	157
3.3.1.1. Articulation des différents attributs économiques	157
3.3.1.2. Quels seuils d'endettement ?	160
3.3.1.3. Une marge brute à la parcelle fonction de la sole cultivée, du prix de l'eau et du climat	160
3.3.1.4. Un coût d'accès à l'eau fonction de la profondeur	160
3.3.2. Les stratégies d'échanges fonciers en FVI	162
3.3.3. Représentation disjointe de l'assolement et de l'irrigation	165
3.3.3.1. Choix des cultures : une stratégie et une aversion au risque implicites	165
3.3.3.2. Les stratégies d'irrigation sur puits et en PPI	168
3.3.3.3. Le calcul de la marge brute sur la parcelle, fonction du taux d'irrigation et de l'assolement	172
3.3.4. Les stratégies à long terme	175
3.3.5. Impact des prélèvements sur la nappe	181
4. VUE D'ENSEMBLE DU SYSTÈME À TRAVERS LE PRISME DU MODÈLE	182

TROISIÈME PARTIE : EXPLORATION DU SYSTÈME PAR LA SIMULATION

1. EVOLUTION DE QUELQUES FACTEURS CLEFS : PRÉVISIONS HORS MODÈLE ET SORTIES DE SIMULATION	190
1.1. <i>Les facteurs clefs du système et leur évolution probable</i>	190
1.2. <i>Evolution des principaux facteurs d'après la simulation</i>	193
2. QUELLE CONFIANCE ACCORDER AU MODÈLE SINUSE ?	199
2.1. <i>De la validation des modèles complexes</i>	199
2.2. <i>Démarche retenue pour l'accréditation de SINUSE</i>	201
2.3. <i>Définition d'un plan d'expériences et choix des indicateurs de suivi</i>	205
2.4. <i>Cohérence du modèle et comparaison des sorties de simulation avec le terrain</i>	207
2.4.1. La variabilité des dynamiques issues du modèle SINUSE	207
2.4.2. Quel comportement du modèle à plus long terme ?	210

2.4.3. Comparaison de quelques indicateurs avec les observations de terrain.....	213
2.4.3.1. L'évolution du nombre de puits suit une dynamique réaliste.....	213
2.4.3.2. Le rythme d'abaissement de la nappe est proche des mesures piézométriques.....	214
2.4.3.3. La proportion des parcelles échangées en FVI est réaliste.	214
2.4.3.4. L'évolution du volume prélevé par l'ensemble des PPI est retrouvée dans le système étudié.....	214
2.4.3.5. Les volumes prélevés par les puits sont proches de la réalité.....	215
2.4.4. Réaction du modèle à plusieurs situations extrêmes	215
2.4.4.1. Des revenus exceptionnellement forts	215
2.4.4.2. Une aversion au risque nulle.....	217
2.4.4.3. Un fort taux d'abandon	218
2.4.4.4. De très forts apports à la nappe	219
2.4.4.5. Un climat très humide en permanence.....	220
2.4.4.6. En conclusion des tests de cohérence.....	222
2.4.5. Suivi de quelques individus types.....	222
2.5. Analyse de sensibilité du modèle à quelques facteurs clefs	225
2.5.1. Les facteurs de nature économique	225
2.5.1.1. Le minimum de "dépenses courantes"	225
2.5.1.2. Plus d'emprunts à long terme.....	226
2.5.1.3. Minimiser les emprunts de campagne.....	227
2.5.1.4. Un faible taux d'aversion au risque	229
2.5.1.5. Aucun aléa sur la valorisation de l'épargne.....	229
2.5.2. Les facteurs d'interaction sociale.....	230
2.5.2.1. Une règle d'imitation plus forte	231
2.5.2.2. Sensibilité à l'imitation	232
2.5.2.3. Sensibilité au faire-valoir indirect.....	233
2.5.2.4. Sensibilité au marché foncier	234
2.5.2.5. Sensibilité aux associations pour la construction des puits	235
2.5.3. Les facteurs de nature technique	236
2.5.3.1. Une efficacité de distribution minimale.....	236
2.5.3.2. Un seuil de profondeur plus limitant pour la construction des puits	237
2.5.3.3. Une plus forte capacité d'irrigation des puits en moyenne.....	238
2.5.4. Les facteurs liés au milieu	239
2.5.4.1. Aucun aléa sur les cultures maraîchères	239
2.5.4.2. Une nappe moins réactive.....	240
2.5.4.3. Des apports plus forts à la nappe.....	241
2.5.4.4. Un climat uniformément moyen, sec ou humide	242
2.5.5. Conclusions sur l'analyse partielle de sensibilité.....	246
2.6. Le modèle est-il "accrédité" ?.....	247

3. DES INTERVENTIONS EN LABORATOIRE VIRTUEL.....	249
3.1. <i>Choix de quatre scénarios d'intervention</i>	249
3.2. <i>Formalisation et résultats de simulation des scénarios d'intervention</i>	252
3.2.1. Scénario 1 : plusieurs tarifications de l'eau	252
3.2.1.1. Un prix de l'eau doublé par rapport au prix moyen actuellement payé en PPI.....	253
3.2.1.2. Un prix de l'eau quintuplé par rapport le prix actuellement payé en PPI.....	254
3.2.1.3. Un prix de l'eau équivalent à environ sept fois le prix actuellement payé en PPI.....	254
3.2.1.4. Conclusion sur la simulation d'une tarification	255
3.2.2. Scénario 2 : la généralisation de l'irrigation au goutte à goutte selon deux hypothèses	256
3.2.2.1. Premier jeu d'hypothèses : impact sur l'efficience.....	256
3.2.2.2. Deuxième jeu d'hypothèses : impact sur le rendement.....	259
3.2.3. Scénario 3 : un droit d'accès à l'eau payant	261
3.2.4. Scénario 4 : un quota d'accès à l'eau	263
4. L'INTÉRÊT DE LA MÉTHODE	266
4.1. <i>Portée des résultats de simulation</i>	266
4.1.1. Les grandes dynamiques du système modélisé.....	266
4.1.2. Des interventions efficaces sur le système modélisé	268
4.1.3. Discussion sur la validité du modèle	270
4.2. <i>Les apports de l'approche SMA dans le cas étudié</i>	272
4.2.1. Un autre regard sur le système	272
4.2.2. Quelques questions sur la gestion du système	274
CONCLUSION GÉNÉRALE	277
BIBLIOGRAPHIE.....	285
ANNEXES	
<i>Annexe 1.a : Carte de la nappe de Kairouan. Situation des piézomètres et isopièzes.....</i>	299
<i>Annexe 1.b : Carte des limites administratives de la zone d'étude</i>	300
<i>Annexe 1.c : Carte des PPI de la zone d'étude.....</i>	301
<i>Annexe 1.d : Carte isoprofondeurs</i>	302
<i>Annexe 1.e. Exemples de relevés piézométriques sur la zone d'étude</i>	303
<i>Annexe 2.a : Formulaire de l'enquête préliminaire.....</i>	304
<i>Annexe 2.b : Formulaire de l'enquête statistique</i>	306
<i>Annexe 2.c : Tests de cohérence des enquêtes statistiques.....</i>	312
<i>Annexe 2.d : Résumé des enquêtes approfondies</i>	315
<i>Annexe 2.e. Quelques images</i>	317
<i>Annexe 3.a. Diagramme de séquence détaillé du modèle.....</i>	318
<i>Annexe 3.b. Diagrammes d'activité des méthodes modélisées.....</i>	319
<i>Annexe 3.c. Interfaces spatiales</i>	331
<i>Annexe 3.d. Paramètres du modèle.....</i>	332
<i>Annexe 3.e. Aléas sur les cultures maraîchères et sur la valorisation de l'épargne</i>	333
<i>Annexe 3.f. Probabilité d'échec à la construction et à l'approfondissement d'un puits</i>	333

<i>Annexe 3.g. Corrélation entre coûts de l'eau et profondeur.....</i>	<i>333</i>
<i>Annexe 3.h. Calcul des marges brutes</i>	<i>334</i>
<i>Annexe 3.i. Fiches technico-économiques des cultures</i>	<i>335</i>
<i>Annexe 3.j. Initialisation des exploitations.....</i>	<i>343</i>
<i>Annexe 3.k. Lien entre dépenses familiales et revenus.....</i>	<i>344</i>
<i>Annexe 3.l. Diversification des revenus</i>	<i>344</i>

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'objet du présent travail est l'étude de la gestion d'une nappe d'eau en accès libre, à partir du cas de la nappe de Kairouan, située en Tunisie Centrale. Les autorités tunisiennes déclarent cette nappe surexploitée, et sont confrontées au problème de sa gestion par la demande, cette dernière ne cessant d'augmenter, et l'offre étant difficilement maîtrisable. Or par rapport à la gestion de l'eau de surface, la gestion de la demande sur une nappe pose des problèmes particuliers, surtout lorsque les usagers sont nombreux et ont librement accès à la ressource. Ceci conduit à préciser la question étudiée : **compte tenu des caractéristiques du système nappe/usages de Kairouan, quelle gestion de la demande peut freiner l'abaissement de la nappe, tout en étant socialement acceptable ?**

Le cas de la nappe de Kairouan est en fait l'archétype d'un problème fréquemment rencontré, dans un contexte mondial où la ressource en eau douce se raréfie.

L'or bleu du XXI^{ème} siècle

L'augmentation de la demande en eau due au développement économique des sociétés et à la croissance démographique accroît les situations de surexploitation de la ressource en eau, ce qui place sa gestion au centre des préoccupations politiques actuelles, et lui confère une attention particulière dans le monde de la recherche.

"A partir du XX^{ème} siècle, le besoin total en eau a amorcé une hausse spectaculaire suivant logiquement la courbe d'accroissement de la population mondiale. Les réserves en eau ont, à l'opposé, amorcé une chute verticale due à leur surexploitation et à leur contamination. Le plus fataliste des scénarios futurs est celui d'une crise majeure de l'eau, au moment où les deux courbes se rejoindront. La plus grande appréhension réside donc dans l'incertitude de la proximité de ce moment charnière où le manque d'eau se fera cruellement ressentir" (Al-Alawi, 2000). Parmi les scénarios développés par le projet Vision mondiale de l'eau, le *statu quo* qui consiste à poursuivre les tendances actuelles, aboutirait en 2025 à la situation suivante : les limites des systèmes naturels et socio-économiques sont atteintes, la diminution des ressources en eau et la dégradation de leur qualité mettent en péril l'intégrité des écosystèmes, ce qui conduit au mieux à des problèmes environnementaux chroniques, au pire à des catastrophes, amorces de crises régionales voire mondiales (Cosgrove et Bouayad-Agha, 2000).

Qu'est-ce que le projet "Vision mondiale de l'eau" ? Soutenu par toutes les agences des Nations Unies, il cherche à sensibiliser les usagers et décideurs à la question de l'eau, à développer pour 2025 une vision sur la gestion de l'eau, qui soit partagée par la société, et à fournir des données pour un cadre d'action.

Bien d'autres auteurs et institutions tirent cette même sonnette d'alarme (Grimble *et al.*, 1996 ; Whittlesey et Huffaker, 1995 ; Premier et Second Forum Mondial de l'Eau¹, Global Water Partnership , Commission Française du Développement Durable..), à tel point que ce sujet est de plus en plus prisé par les médias² . Face aux scénarios catastrophes révélés au grand public, les politiciens souhaitent accorder leur vision de la ressource en eau et trouver des modes de gestion durables de l'eau sur la base des conseils d'experts privés, de chercheurs, d'Organisations Non Gouvernementales, et d'associations.

Pour éviter la "crise de l'eau" annoncée, les garants du bien être collectif (l'ONU, l'Etat, les collectivités locales...) se soucient de plus en plus du caractère durable du développement, tel que défini par le rapport Brundtland (1988) : "*Le développement durable est celui qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins*". On cherche donc de manière générale à éviter la surexploitation des ressources en eau en ayant recours à des ressources alternatives (par la désalinisation, la réutilisation des eaux usées...), mais aussi en maîtrisant le développement des usages. Dans ce contexte de raréfaction de l'eau et de renouveau nécessaire dans les modes de gestion, les eaux souterraines méritent une attention particulière, du fait de leur importance, de leurs caractéristiques spécifiques et du nombre de nappes surexploitées.

La notion de nappe surexploitée n'est pas simple : une surexploitation temporaire peut être bénéfique (pour pallier une période de sécheresse, accroître les apports, gérer un excès de salinité des sols...). D'autre part, sans dépasser le taux de recharge de la nappe, des prélèvements trop concentrés peuvent entraîner une baisse locale des rendements, qualifiable de surexploitation. De fait, la notion de nappe surexploitée est souvent réservée aux situations posant effectivement problème pour la société ou l'écosystème, auquel cas sa définition varie selon les contextes (Villaroya, 1994). Par la suite, cette notion se référera à un taux d'exploitation de la nappe excédant son taux de renouvellement moyen, sur le long terme.

¹ Premier Forum de l'Eau, Marrakech, 21-22 mars 1997 ; Second Forum de l'Eau, La Haye, 17-22 mars 2000.

² cf Sciences et Vie hors série n°211 de juin 2000 : "Menaces de l'eau, comment éviter une crise mondiale", Le Monde, 28/3/1997 : "L'eau : la guerre ou le marché", J.-P. Besset, Le Monde, 17/3/2000 : "La planète est menacée par de graves pénuries d'eau au XXIème siècle", H. Kempf, Le Monde Diplomatique, mars 2000 : "La nouvelle conquête de l'eau", Ricardo Petrella.

Une vision alarmiste du devenir des nappes

L'eau souterraine constitue un compartiment essentiel de l'eau douce terrestre, dont l'exploitation durable est sérieusement menacée par des problèmes de gestion : *"The regulation of groundwater exploitation is a universal but often untractable problem"* (Berkoff, 1994).

D'après l'UNESCO, les eaux souterraines représentent 30% de l'eau douce terrestre, tandis que seulement 1% de l'eau douce totale est contenu dans les eaux de surface continentales (et 69% dans les glaciers). Au total les nappes constitueraient 97% de l'eau douce disponible sur Terre. En terme d'usages, les eaux souterraines couvrent plus de 60% des besoins humains en eau de boisson et la majeure partie des besoins agricoles en zones arides et semi-arides.

L'exploitation de l'eau souterraine présente des avantages par rapport à l'eau de surface, comme la qualité de l'eau, la proximité de la ressource sur de grandes étendues, son "rôle tampon", contrairement aux fluctuations des écoulements de surface... Mais certains de ces facteurs deviennent contraignants, dès lors qu'il s'agit de maîtriser les prélèvements :

- la surexploitation, encouragée par la fonction de stockage des nappes, entraîne un rabattement³ global susceptible de conduire à une augmentation des coûts d'extraction, une diminution des rendements ou un abandon des points de captage ;
- les cônes de rabattement dus aux pompages peuvent entraîner des interférences ponctuelles entre captages ;
- la surexploitation peut entraîner une subsidence du terrain aquifère non saturé ;
- la surexploitation peut entraîner une dégradation de la qualité de l'eau (par intrusion saline pour les nappes côtières) ;
- l'exploitation peut entraîner une contamination par les usagers, diffuse ou localisée.

La prise de conscience de la surexploitation des nappes semble être plus récente que pour l'eau de surface du fait d'une exploitation intensive moins ancienne, de leur caractère invisible, de leur fonctionnement et de leur géométrie mal connus, et enfin d'une exploitation à une échelle en général très locale comparée à celle de l'aquifère.

A l'orée du XXI^{ème} siècle, de nombreux hydrogéologues ont une vision alarmiste du devenir des nappes, comme l'indiquent le 23^{ème} Congrès de l'IAH sur la surexploitation des aquifères, tenu aux Canaries en 1991, la conférence "Future Groundwater at Risk" tenue à Helsinki en 1994, le thème 3 "Groundwater resources at risk" du programme IHP-V de l'UNESCO à l'œuvre en 1996 et 2001.... Concrètement, la surexploitation des nappes touche

³ Opération qui consiste à abaisser le niveau d'une nappe d'eau par pompage.

un grand nombre de pays, industrialisés ou non (Bahrein, Grèce, Espagne, France, Maghreb, Egypte, Inde, Chine, Etats-Unis, etc.). Elle entraîne notamment une dégradation due à l'intrusion de biseaux salés, dans le cas des nappes côtières. Selon l'ampleur du problème, les sociétés concernées s'interrogent sur la marche à suivre pour enrayer ce déséquilibre. Cet objectif est particulièrement difficile à atteindre en zones arides et semi-arides où les nappes sont des ressources stratégiques, comme le montrent par exemple les cas d'études rapportés par Zubari *et al.* (1993), Al-Rashed *et al.* (1998) et Narain (1998).

Pour limiter la surexploitation des nappes, deux solutions sont offertes au gestionnaire : augmenter le taux de recharge ou diminuer le taux d'exploitation (ou mieux répartir les points d'extraction en cas de surexploitation locale). Or il peut s'avérer impossible, ou très coûteux, d'augmenter le taux de renouvellement d'un aquifère (approche par l'offre), ou de substituer son usage par une autre ressource en eau. Dans ce contexte, un autre mode de gestion est à envisager : la gestion de la demande, qui consiste à limiter et/ou mieux allouer les prélèvements. **Toute la difficulté de cette gestion de la demande est de concilier cet objectif avec le développement de la société.**

D'une gestion de l'offre à une gestion de la demande

Le concept de "gestion de l'eau" mérite d'abord d'être éclairci. Pour Hubert (1986), la gestion de l'eau "*consiste à organiser grâce à des instruments réglementaires, financiers, technologiques, l'interface entre le milieu hydrique et le milieu social de telle sorte que celle-ci soit satisfaisante, selon les exigences socialement exprimées à son endroit*", sachant que ces exigences sont "*très diverses et souvent contradictoires*".

Grimble *et al.* (1996) distinguent 3 grandes stratégies de gestion :

- par l'offre, en modifiant la disponibilité de la ressource en eau grâce à des investissements structurels,
- par la demande, en modifiant la répartition des usages ou en réduisant leur volume, et en augmentant leur efficacité, par des incitations ou des règles,
- et enfin, par des mesures intermédiaires sur la distribution, par exemple en réduisant les pertes.

Margat (1996) précise que **la gestion de l'offre** consiste à jouer sur les volumes et les flux dans le temps et dans l'espace en créant des ressources, afin de répondre à des objectifs, qui peuvent être "aveugles", c'est-à-dire ne tenant pas compte de la demande ; c'est le cas du gestionnaire de barrage qui cherche à remplir le barrage sans tenir compte de l'impact sur les usages, ou au contraire élaborés en fonction de la demande.

Selon une définition de la Banque Mondiale, **la gestion de la demande** comprend un ensemble d'actions telles que l'élaboration de programmes d'éducation et de mise en garde, la mesure des prélèvements, la tarification, les restrictions qualitatives (Berkoff, 1994). Le terme de gestion est presque inadapté dans le cas de la gestion par la demande d'après Margat (*op. cit.*), dans la mesure où c'est un ensemble de facteurs de provenances variées, influençant des paramètres différents, qui vont agir en concomitance, avec des temps d'effet divers sur la demande. *La gestion macroéconomique de la demande*, qui repose sur une réallocation intersectorielle de l'eau (depuis le secteur agricole vers les secteurs industriels de l'eau potable le plus souvent), est distinguée ici de *la gestion de la demande agricole, intrasectorielle*, sur laquelle portera exclusivement cette étude, nommée par commodité "gestion de la demande", dans la suite de ce document.

A l'interface entre ces deux notions, **la gestion intégrée** consiste à prendre en compte les deux maillons de la chaîne : gestion de l'offre et gestion de la demande. Mais suivant les approches, cette terminologie désigne aussi une gestion à la fois qualitative et quantitative, ou portant à la fois sur l'eau de surface et l'eau souterraine, sur plusieurs secteurs économiques, etc.

Comme la plupart des ressources renouvelables, les systèmes liés à l'eau ont très longtemps été gérés par l'offre. Depuis quelques années, face à la multiplication des situations de surexploitation et de compétition lorsque la ressource est rare, et face à l'augmentation du coût marginal de l'accès aux ressources en eau, les gestionnaires, les chercheurs et les institutions internationales prennent conscience de l'intérêt d'une gestion de l'eau par la demande (Bhatia *et al.*, 1995), notamment sur le pourtour Méditerranéen où le déséquilibre se fait déjà cruellement ressentir (Hamdy et Lacirignola, 1997). Ce passage d'une gestion par l'offre à une gestion par la demande de ressources naturelles comme l'eau a été étudié par plusieurs chercheurs, comme Karshenas et Allan, qui modélisent le lien entre le développement d'une société et son stock de ressources naturelles (Allan, 1996). Ces modèles montrent que tout pays puise dans son stock de ressources naturelles pour se développer, ce qui le conduit à une phase de développement non durable, puis, si la tendance se poursuit, à une catastrophe écologique qui entraîne inéluctablement une chute du niveau de vie. Le pays peut toutefois continuer de se développer sans pour autant accroître ses prélèvements sur la ressource. En effet, une stabilisation des prélèvements peut être obtenue par une réallocation intersectorielle de la ressource, impliquant une contraction de la demande d'un secteur, généralement le secteur agricole, par le biais d'outils de gestion de la demande en eau. Le pays peut même reconstituer le stock de

ressource pour les générations futures⁴, grâce à une réduction de la demande globale - qui passe notamment par une diversification de l'économie. Celle-ci repose sur le concept d'importation "d'eau virtuelle" (Allan, *op. cit.*), qui consiste à développer les activités à forte valeur ajoutée et peu consommatrices d'eau, susceptibles de dégager des capacités financières pour importer, depuis les pays riches en eau, les produits dont la production est fortement consommatrice en eau - notamment les produits agricoles de base : céréales, sucre, etc. - et dont la production nationale est peu à peu abandonnée. Ces transformations impliquent à chaque étape des décisions dont le coût politique et social peut être fort vis à vis des acteurs affectés par les changements d'option. Ces acteurs peuvent être le secteur de l'ingénierie et des travaux publics quand les programmes de création de ressource sont abandonnés, ou celui de l'agriculture irriguée, quand des outils pénalisant les productions de moins bonne valorisation sont instaurés. Dans ce sens, Turton (1999) a développé le concept de "capacité adaptative" qui illustre la manière dont certains pays sont parvenus, sans crise politique majeure, à mettre en place des mécanismes de maîtrise voire de réduction de la demande, quand d'autres connaissent des oppositions fortes à ces changements. Une "faible capacité adaptative" peut être due à une diversification insuffisante de l'économie ou à l'absence de crise légitimant une réforme de la gestion.

Comment envisager la gestion de la demande sur la nappe de Kairouan ?

La nappe de Kairouan est un exemple parmi bien d'autres, de nappe en accès libre surexploitée. Ses usages, surtout liés à une **irrigation privée**, par les puits, et **collective**, en périmètre irrigué, ne cessent de croître. Ils sont actuellement très supérieurs à ses apports, théoriquement maîtrisés par deux grands barrages. Le niveau de cette nappe est en baisse continue depuis une vingtaine d'années. Les autorités cherchent à gérer la demande en eau, faute de pouvoir augmenter l'offre, mais les outils de gestion appliqués jusqu'alors ont eu peu d'effet.

Cette nappe est actuellement étudiée par une équipe pluridisciplinaire franco-tunisienne dans le cadre du programme de recherche MERGUSIE.

Le programme MERGUSIE (pour MERguellil : Ressources, Gestion et USages Intégrés de l'Eau) a démarré officiellement à Kairouan en 1998, en partenariat avec la Direction Générale des Ressources en Eau, le Commissariat Régional de Développement Agricole de Kairouan, la Direction Générale du Génie Rural et l'Institut National d'Agronomie de Tunis.

⁴ c'est le cas d'Israël (Turton, 1999)

Ce programme propose de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes barrage / nappe / usages sous plusieurs angles de vue, en raisonnant sur le cas concret du bassin endoreïque⁵ du Merguellil, dont l'exutoire est la nappe de Kairouan.

Le programme MERGUSIE aborde la gestion de l'eau en raisonnant sur l'ensemble du bassin versant pour formaliser les dynamiques qui existent entre écoulements, ouvrages de stockage, société des usagers et environnement. L'objectif du programme est de fournir des critères de gestion pertinents en simulant, au niveau global, les impacts de divers scénarios : (i) une modification du milieu ou une variabilité de l'offre en eau (nouveaux aménagements, gestion de risque sur les petits ouvrages ou gestion de pénurie), (ii) des changements des règles du jeu (prix agricoles, tarification, incitations financières, priorités nationales, accès à l'eau), (iii) la combinaison de ces deux aspects.

Pour cela, le programme MERGUSIE a cherché à modéliser les fonctionnements et/ou les comportements des différents éléments en jeu (modélisations hydrologique, agro-socio-économique...).

Le présent travail s'inscrit donc dans ce programme à deux niveaux :

- **géographiquement**, il s'attache à étudier une des trois zones définies par le programme (la nappe, au niveau de la zone d'épandage du Merguellil) ;
- **thématiquement**, il s'intéresse en particulier à l'aspect « formalisation des dynamiques d'usages en lien avec la ressource ».

L'hypothèse centrale de ce travail est que **la dynamique d'abaissement de la nappe de Kairouan provient des interactions locales entre agriculteurs et nappe, et au sein du groupe des agriculteurs**. La question du mode de gestion de la demande sur cette nappe doit alors nécessairement tenir compte de ces interactions. Par rapport à cette question, deux objectifs complémentaires ont été assignés à ce travail : sur un plan pratique, **la recherche des variables moteurs de la dynamique d'abaissement de la nappe** à partir d'une approche systémique de l'objet d'étude, tandis qu'en terme de méthodologie, cette recherche vise à **élaborer un support pertinent pour l'étude de la gestion de la demande**, tenant compte des interactions en jeu et capable d'aider à la formulation de modes de gestion et à la discussion de leurs effets sur le système. Ainsi, cet outil pourrait être utilisé pour aider à la négociation, entre décideurs, sur des interventions publiques visant à réguler le système, de sorte que le développement des usages n'altère pas de manière irréversible les caractéristiques de la nappe.

⁵ qui ne débouche pas sur la mer.

Un travail d'enquêtes et une collecte de données ont d'abord permis d'élaborer des hypothèses sur les mécanismes principaux de la dynamique du système nappe - usages étudié⁶. Ces données ont été utilisées pour la construction d'un modèle exploratoire, qui depuis son élaboration jusqu'à son usage en terme de simulation, a permis d'explicitier les processus en jeu, de discuter l'importance des variables, et de s'interroger sur l'impact de différentes interventions. La modélisation multi-agents a paru la plus adaptée à la question étudiée. En effet, contrairement aux approches classiques, les modèles multi-agents peuvent permettre d'appréhender la complexité des systèmes et des enjeux, compte tenu de leurs dimensions environnementales, sociales, économiques et cognitives, et de répondre ainsi en partie aux besoins d'information, de compréhension, de simulation prospective et de concertation attendants à la décision publique (Ferrand et Deffuant, 1998).

Le présent rapport est structuré autour des trois temps de ce travail : bibliographie et analyse globale du cas d'étude, travail de terrain et construction du modèle, expériences de simulation.

La première partie définit le cadre théorique du problème et spécifie les particularités du cas étudié, pour aboutir au choix d'une méthode d'étude adaptée. Les outils de gestion de la demande en eau sont d'abord présentés, compte tenu de leur application au cas des nappes. Ces connaissances, qui alimenteront les expériences de simulation menées par la suite, constituent un cadre pour l'analyse du système étudié. L'utilisation de plusieurs types de modèles est discutée, pour aboutir au choix des modèles multi-agents, les plus adaptés aux caractéristiques du système et aux objectifs fixés.

La deuxième partie présente le protocole d'étude mené sur le terrain, les principales données collectées et la structure du modèle construit. Les différentes étapes de la démarche de terrain sont exposées en premier lieu : une approche systémique, une série d'enquêtes, la collecte de données sur la ressource, conduisent à préciser dans un second temps les dynamiques de la demande et de l'offre. Le modèle SINUSE, Simulateur des Interactions entre Nappe et USages de l'Eau, est alors décrit : ses entités et ses processus les plus importants sont présentés, leur choix étant étayé par les données collectées sur le système réel. Ce modèle constitue finalement un point de vue particulier sur le système étudié.

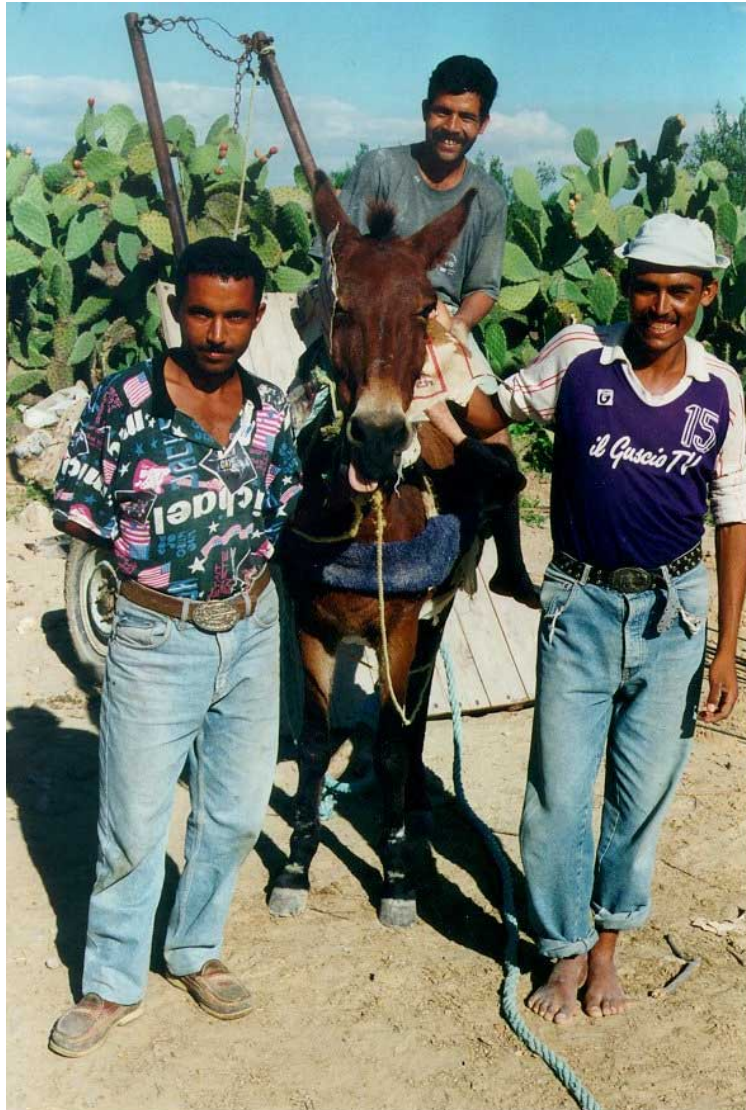
La force du modèle est aussi de constituer un laboratoire virtuel d'expérimentation, comme le montre **la troisième partie, consacrée aux expériences de simulation.** Le regard porté sur le système, autorisé par la phase de construction du modèle, permet déjà, avant de

⁶ Après une mission préliminaire d'un mois en avril 1997, ce travail de terrain s'est déroulé entre septembre 1997 et novembre 1998. Une rapide tournée de terrain a également eu lieu en février 2000.

plonger dans les simulations, de prévoir l'évolution possible de quelques variables clefs. Lesquelles sont comparées aux sorties du modèle. Le modèle est alors soumis à une série de tests inspirés des protocoles classiques de vérification et validation, afin de mettre l'utilisateur du modèle en confiance, et de repérer des variables dont l'étude devrait être approfondie, ou qui sont susceptibles de jouer un rôle dans la maîtrise de la demande. Des modes de gestion de la demande sont simulés sur la base du bilan établi en première partie, et donnent lieu à une discussion. Ces différentes étapes amènent à réfléchir à la portée pratique de ce modèle, et à la gestion de la nappe par la demande.

PREMIÈRE PARTIE

LA GESTION DE LA DEMANDE... SUR QUEL SYSTÈME RESSOURCES-USAGES ?



Photographie n° 1 : Un paysan entouré de deux constructeurs de puits dans la plaine de Kairouan (Cliché S. Feuillette, 1998).

Cette partie débute par la présentation de différents types d'outils de gestion de la demande et leurs conditions d'application sur les nappes. L'agriculture étant dans la plupart des cas l'usager le plus important, et le plus difficile à maîtriser, les références citées concernent le plus souvent la gestion de la demande en eau d'irrigation. Outre leur apport dans le débat sur l'efficacité de divers modes de gestion de la demande et leur usage ultérieur pour la constitution de scénarios de simulation, ces considérations constituent une grille d'analyse pour l'approche générale du cas d'étude.

La description générale du système étudié conduit ensuite à envisager différentes voies de modélisation, pour opter finalement pour les systèmes multi-agents, les plus adaptés par rapports aux objectifs fixés et aux caractéristiques du système.

Mais tout d'abord, interrogeons-nous sur le concept de développement durable et ses implications concrètes en termes d'objectifs et d'actions car les choix de gestion dépendent des objectifs du gestionnaire.

Préliminaire : un développement durable fort, faible, ou un développement viable ?

La notion de développement durable se réfère à l'idée que le développement actuel de la société ne doit pas empiéter sur les capacités de développement des générations futures. L'exploitation durable d'un aquifère¹ impliquerait les considérations suivantes (définies par la Conférence organisée par l'IAH à Dublin en 1991, *in* Villarroya, 1994) :

- **à long terme une nappe ne devrait pas être exploitée au-delà de son taux de renouvellement**, même si des surexploitations de court terme peuvent être acceptables sur des ressources renouvelables, dans certaines conditions ;
- **la qualité de la nappe** doit être gérée selon **le principe de précaution**² ;
- **la gestion doit être intégrée** en termes de quantité et de qualité, et d'eau souterraine et de surface;
- **les usagers de la nappe doivent être informés et éduqués** sur l'utilisation de l'eau souterraine et sa protection.

¹ L'aquifère désigne un massif de roche perméable comprenant une zone saturée, la nappe proprement dite.

² Le principe de précaution se résume ainsi : "*il peut être justifié (version faible) ou il est impératif (version forte), de limiter, encadrer ou empêcher certaines actions potentiellement dangereuses sans attendre que ce danger soit scientifiquement établi de façon certaine*" *in* Romagny (1996).

Si on ajoute à ces objectifs les aspects sociaux et économiques du développement durable, ils correspondent au choix d'un développement durable au sens "fort", visant à sauvegarder le capital naturel total, pour reprendre les termes de Godard (1994). Selon cet auteur, il est également possible d'entendre le concept de développement durable au sens "très faible" du terme (préservation de la "capacité productive" de la société grâce aux mécanismes de substitution, d'investissement et d'amélioration de l'efficacité), ou au sens "faible" (préservation de la "capacité productive" assortie d'un capital naturel minimal à transmettre en tant que tel). Ce choix dépend à la fois du degré de préférence pour le présent (formalisé par le taux d'actualisation appliqué aux dépenses et revenus futurs) et d'une confiance dans la mise en place de solutions de substitution. Par ailleurs, Weber (1995) insiste sur le fait que la notion de développement durable se caractérise par un raisonnement "à l'équilibre", alors que les ressources renouvelables sont caractérisées par des flux variables. Il lui préfère la notion de développement *viable*, qui met l'accent sur la variabilité, l'incertitude, l'irréversibilité et qui recherche une adaptation entre variabilités naturelles et socio-économiques.

Selon l'écart entre recharge et extraction et selon le risque de dégradation irréversible de la nappe, la société ou le gestionnaire peut donc préférer une exploitation durable au sens "fort" de l'aquifère (préservation intégrale du stock en quantité et en qualité), ou la conciliation d'un développement affectant le stock tout en en préservant un minimum (éventuellement déterminé par un calcul d'optimisation des productions en fonction de l'abaissement). Une situation d'incertitude face aux risques induits par une surexploitation peut conduire les gestionnaires à adhérer au principe de précaution.

D'autres objectifs accompagnent souvent celui de gestion durable ou viable : la recherche d'une meilleure efficacité économique de la ressource, d'un partage équitable de la ressource, d'un équilibre budgétaire...

Ce travail ne préjuge pas des objectifs des gestionnaires et ne vise pas non plus à déterminer un taux de prélèvement optimal en fonction des risques encourus. Son but est **d'apporter des éléments à la recherche de moyens adaptés pour réduire la demande, afin de limiter la surexploitation d'une nappe, dans un objectif général de développement durable au sens faible, ou de viabilité du système.**

1. La gestion de la demande sur une nappe : éléments d'analyse

1.1. Une ressource collective en accès libre

Le concept de ressource commune n'est applicable que si les usagers sont en quelque sorte "co-proprétaires" de la ressource et si les règles d'accès en sont clairement définies. A ce propos, Romagny (1996) insiste sur **la confusion trop souvent rencontrée entre ressource commune et ressource en accès libre**. On la trouve même dans des articles défendant l'approche de l'Ecole des Communaux (voir par exemple Jager *et al.*, 2000).

"In the absence of institutional constraints, groundwater is a common property resource ; a finite number of firms exploits the resource, but no firm holds exclusive rights to any portion of it. Economists have long argued that this common property arrangement leads to an inefficient rate of groundwater pumping." (Provencher et Burt, 1994).

Contrairement à ce qu'affirment Provencher et Burt (*op. cit.*), ou encore Narain (1998), victimes aussi de cette confusion, **les nappes sont pour la plupart des ressources collectives en accès libre et non des ressources communes**, dans la mesure où elles ne sont pas gérées, ni même appropriées par la collectivité des usagers.

Dans un article très réputé intitulé "The Tragedy of the commons", Hardin (1968) a montré que l'accès libre à une ressource collective conduit en général à sa surexploitation³. Cette **"tragédie de l'accès libre"**, selon le réajustement terminologique justifié de Weber (1995) **est souvent la situation rencontrée dans le cas des nappes**.

Dans le cas d'une nappe en accès libre, l'extraction de chaque usager, en entraînant un abaissement du niveau, provoque une augmentation des coûts de pompage pour l'ensemble des usagers. Personne n'assume entièrement les coûts des comportements individuels, ce qui encourage la "course au pompage", et donc la surexploitation, voire la destruction de la ressource. Certains économistes des ressources naturelles défendent un "laisser-aller" bénéfique à terme⁴ selon eux : la baisse du niveau éliminerait les usagers les moins valorisants, jusqu'à une stabilisation de la profondeur de la nappe, les prélèvements restants étant égaux au taux de renouvellement.

³ Cet article, sans doute responsable, pour une grande part, de la confusion fréquente entre ressources communes et ressources collectives, porte sur un pâturage en accès libre que Hardin qualifie de "ressource commune".

⁴ J. Bain, R.E. Caves et J. Margolis (1966) *in* Blomquist (1992).

Mais ce modèle d'équilibre compétitif rencontre plusieurs problèmes (Blomquist, 1992) :

- il suppose que la baisse a un impact sur les revenus des usagers, *via* les coûts de pompage, susceptible de modifier leur comportement, ce qui n'est pas forcément le cas suffisamment tôt comme nous le verrons en troisième partie ;
- de plus il suppose que si impact il y a, celui-ci est le même pour tous les usagers, ce qui est très rarement le cas, les nappes ayant souvent une géométrie non uniforme ; il se peut par conséquent que les usagers qui valorisent le mieux la ressource soient les premiers touchés par l'abaissement du fait de leur emplacement sur la nappe ;
- cet équilibre économique de court terme, s'il se réalise, n'est pas nécessairement compatible avec d'autres paramètres de durabilité, comme ceux liés aux effets secondaires du rabattement : subsidence, dégradation de la qualité par intrusion saline ou contamination par les minéraux de l'aquifère...

Ajoutons que les effets pernicioeux de cet équilibre (risque de regroupement des droits d'eau et des terres au sein des grosses exploitations, de déséquilibre entre différents types d'usage, exode rural...), peuvent se trouver en contradiction avec l'équilibre social **nécessaire à un développement viable**. De plus, la conclusion donnée par certains économistes selon laquelle une nappe en accès libre évolue de la même manière qu'en situation de "contrôle optimal" repose sur plusieurs conditions : le stock d'eau doit être très grand par rapport aux flux des apports et des prélèvements, et les usagers doivent chercher à ajuster leurs prélèvements de manière à ce que le coût du pompage soit au moins égal à la valorisation de l'eau (Gisser et Sanchez, 1980).

Les gestionnaires peuvent aussi être tentés d'encourager l'exploitation de la ressource, "tant que celle-ci s'écoule", pour tirer profit au maximum des "pertes à l'exutoire" (Hamza, 1988). Cette politique néglige les effets socio-économiques de la surexploitation et ses impacts sur la dégradation et la subsidence du système, en ne considérant qu'un bilan volumique global.

Dans une perspective de développement viable, qui implique un certain maintien de la ressource⁵ en quantité et en qualité, et de son environnement socio-économique, la gestion d'une nappe est donc préférable au laisser-aller, contrairement à ce qu'avance la théorie de l'équilibre compétitif. Cependant, comme nous l'avons vu en introduction, la gestion des nappes par la demande en est seulement à ses débuts et fait encore l'objet de recherches.

⁵ Le terme de "ressource exploitable" doit être assorti d'un système de valeurs des décideurs, basé sur les normes, les moyens techniques et économiques, et les préférences des décideurs (el Magnouni, 1993) .

Dans ce contexte, voyons quels sont les outils proposés par la littérature pour gérer la demande sur les ressources collectives, en tenant compte de leurs conditions d'efficacité et de leur mise en œuvre dans le cas particulier des eaux souterraines.

1.2. Les instruments de gestion de la demande appliqués aux ressources collectives

Un instrument de gestion de la demande doit être susceptible de modifier la demande de manière directe (autoritaire ou consensuelle) ou indirecte (incitative), pour tendre vers un équilibre offre/demande, ou du moins maîtriser la demande.

Les principaux instruments de gestion de la demande en eau sont inventoriés ci-après. Auparavant caractérisons la demande en eau agricole, qui déterminera les différentes échelles d'intervention possibles et guidera l'analyse du système étudié.

1.2.1. Plusieurs échelles d'intervention sur la demande en eau

La gestion par la demande de l'eau agricole peut être effectuée à plusieurs échelles (Margat, 1996), auxquelles doivent être adaptés les instruments de gestion :

- au niveau de **la parcelle** : choix de techniques d'irrigation plus ou moins économes : goutte à goutte, micro-aspersion, irrigation gravitaire modernisée etc. (l'équivalent pour l'eau domestique serait l'utilisation d'appareils ménagers moins consommateurs) ;
- au niveau de **la sole cultivée** : choix de productions plus ou moins exigeantes et de leur importance relative dans l'assolement (l'équivalent serait des types d'usagers moins consommateurs) ;
- au niveau de **l'exploitation et du périmètre irrigué** : choix d'allocation prioritaire entre parcelles ou secteurs, efficacité de la distribution, coordination offre /demande par des règles de distribution, (équivalent domestique : économie d'eau au sein du foyer et efficacité de la distribution urbaine) ;
- au niveau de **la région** : favoriser des demandes moins consommatrices, ou plus valorisatrices selon la politique pratiquée, inciter à l'économie d'eau et à une certaine répartition spatio-temporelle des prélèvements, augmenter l'efficacité de l'adduction au niveau régional.

Selon l'échelle choisie, la notion de demande n'a pas la même signification et n'est pas estimée de la même manière ; ainsi dans le cas de l'irrigation la demande en eau peut désigner (Margat, *op. cit.*) :

- **le besoin en eau des cultures, qui se calcule d'après l'ETP⁶**, le coefficient cultural et les caractéristiques du sol ;
- **le besoin en eau d'irrigation qui intègre l'efficience de la distribution du système d'irrigation, depuis le point de prélèvement jusqu'à la parcelle irriguée** : fuites, percolation et évaporation entre le point de prélèvement et la parcelle, pertes par infiltration et par colature notamment liées à une répartition hétérogène de l'eau dans la parcelle ;
- **la demande en eau qui intègre à un niveau supérieur le comportement de l'utilisateur** : son objectif de rendement par parcelle et son pilotage de l'irrigation au cours de la campagne agricole (règles de décision et pratiques d'irrigation), ses stratégies d'assolement et d'investissement.

A quoi peut être ajouté le comportement des usagers *potentiels*, dont dépend l'apparition de nouveaux points de prélèvement, et qui joue donc sur la demande globale.

Il faut également tenir compte du fait qu'une gestion de l'eau peu efficace à l'échelle locale (parcelle ou exploitation) peut devenir efficace à une échelle supérieure, si les pertes lors de la distribution sont restituées à la ressource (*via* l'eau infiltrée), ou sont réutilisées (Berkoff, 1994). Mais dans le cas d'une ressource souterraine, un retour par percolation à la nappe implique que l'eau ne s'est pas évaporée avant d'atteindre la zone saturée, ce qui dépend de la demande évaporative, de la couverture végétale, de la profondeur de la zone non saturée à traverser et de son état hygrométrique.

Présentons maintenant différents outils de gestion, classés selon deux grandes catégories : les instruments économiques et les instruments non économiques. La classe des instruments techniques, susceptible d'être rattachée aux deux premières selon le contexte, est traitée en préliminaire⁷.

⁶ Evapotranspiration potentielle

⁷ Les modes de classification des outils cités ci-dessous varient selon les auteurs ; par exemple certains classent les quotas dans les outils économiques (Montginoul, 1998) ou encore ne distinguent pas les instruments techniques, qui reposent souvent sur des aides financières, des instruments économiques (Barde, 1993)...

1.2.2. Des instruments techniques de gestion par la demande

Ce sont des outils visant à une utilisation plus efficiente de l'eau ou encourageant l'économie d'eau. On peut citer par exemple, selon les échelles d'application évoquées précédemment :

- **au niveau d'une exploitation agricole**, l'utilisation de cultures peu consommatrices en eau et de micro-irrigation, l'installation de compteurs volumétriques, l'électrification des pompes⁸, le nivelage du sol ; **au niveau d'un foyer domestique**, la pose de compteurs, un réseau interne plus efficient, l'encouragement à l'utilisation d'appareils électro-ménagers moins consommateurs...
- **au niveau d'un périmètre d'irrigation**, le tracé d'un canal de distribution, un réseau basse pression ou sous-pression pour réduire l'évaporation et les pertes par percolation, une adaptation de l'offre à la demande ; **au niveau d'un réseau urbain**, le tracé du réseau et la détection des fuites...
- **au niveau d'une région**, l'utilisation de modèles de gestion⁹ qui peuvent permettre aux gestionnaires de mieux allouer l'eau : citons le modèle de gestion intégrée d'un aquifère de Mañas *et al.* (1999), basé sur un Système d'Information Géographique (SIG) intégrant les données d'un modèle numérique de nappe et les données sur la demande en eau issues à la fois d'interprétation d'images satellites, d'estimations de consommation en eau des cultures locales et de mesures d'efficacités sur le terrain¹⁰.

Le gestionnaire doit tenir compte du fait **qu'une économie d'eau effective à une échelle peut avoir un effet nul à une autre échelle** : par exemple la micro-irrigation permettant d'utiliser moins d'eau à l'hectare irrigué peut entraîner une extension de la surface irriguée, le bilan sur la ressource étant inchangé, voire aggravé si les pertes par les techniques traditionnelles restituaient l'eau au système par percolation : "*Efficient technologies may not ensure the protection of the resource unless there is quantity regulation, as farmers continue to expand irrigation as long as it is profitable*" (Nagaraj *et al.*, 2000).

La mise en place de ces divers équipements est souvent permise par des subventions ou

⁸ L'électrification des pompes peut permettre de contraindre l'accès par une puissance restrictive et éventuellement variable ; mais ce genre d'outil peut être à double tranchant : en cas de restrictions trop contraignantes et/ou imprévisibles, l'utilisateur aura recours à d'autres ressources s'il le peut.

⁹ D'une manière générale, tous les modèles permettant d'améliorer la connaissance sur le système à gérer constituent des outils d'aide à la gestion par la demande.

¹⁰ De plus, cet outil est couplé à un conseil individuel pour économiser l'eau dans l'exploitation et à un système d'aide à la décision qui prend en considération différentes options de gestion dans un but de préservation de la réserve d'eau souterraine, tout en aidant les usagers à maintenir leur revenu. Cet ensemble d'outils, à la limite entre outil de gestion et modèle opérationnel, a nécessité le travail de plusieurs équipes pendant quatre années, le recours à d'importants moyens techniques, et la participation importante des usagers groupés en association, qui sont censés pouvoir utiliser l'outil intégré.

des prêts bonifiés accordés par le gestionnaire, ou encore par un système de normes accompagné de moyens de contrôle. Dans les deux cas, ils doivent nécessairement s'accompagner d'un effort de vulgarisation.

1.2.3. Des instruments économiques de gestion par la demande

Les instruments économiques sont de type indirect : il s'agit d'influencer le comportement des usagers par des incitations fondées sur les mécanismes de marché, comme une mesure de tarification, une redevance, une taxe, un droit d'accès payant, un marché de l'eau.

1.2.3.1. Les tarifications, redevances et taxes

L'utilisation de ces outils dans l'objectif de réduire la demande en eau revient à **faire payer à l'usager le prix de la rareté de l'eau** et éventuellement les frais de gestion de la nappe de recherche d'information et de communication conséquents¹¹. Ceci revient à considérer **l'eau comme un bien économique**. Cette mesure n'a cependant pas le même sens, ne présente pas les mêmes conditions de mise en oeuvre et n'est pas perçue de la même manière selon qu'elle est appliquée sous forme d'un tarif, d'une taxe ou d'une redevance.

Le tarif correspond au paiement d'un bien ou d'un service, à l'unité consommée. Dans le cas d'une nappe, la mise en place d'un tarif implique donc :

- que **l'eau soit vendue aux usagers en tant que bien** s'ils en assument eux-mêmes les frais d'extraction, ce qui nécessite que le gestionnaire soit propriétaire de la ressource **ou que l'eau leur soit distribuée** : ils payent alors le service de l'extraction, de la distribution et éventuellement du traitement ;
- **l'usage de compteurs au niveau de chaque captage et leur contrôle**, ce qui peut s'avérer difficile dans le cas de grandes nappes.

La tarification est théoriquement calculée en fonction de la demande, c'est-à-dire de la capacité des usagers à payer, de leur réaction par rapport au prix, de la valorisation de l'usage, et de la mise en place d'une péréquation, et en fonction de l'offre. Ces fondements se traduisent dans le choix de la structure tarifaire (Montginoul, 1998). Pour être efficace, le système tarifaire doit être compréhensible et peu coûteux à mettre en place (Montginoul, 1997).

La redevance (paiement d'un service public ou d'une concession proportionnellement à son utilisation) et la taxe (impôt autoritaire non proportionnel à un service) s'appliquent plus

¹¹ c'est le cas sur certaines nappes gérées collectivement en Californie du Sud (Blomquist, 1992)

facilement dans le cas d'usages captant directement la ressource. Sur les nappes françaises les forages sans compteur sont soumis à une redevance forfaitaire à l'hectare irrigué, et les forages avec compteur, à une redevance au volume consommé, faible par rapports aux coûts privé et social de l'eau (Kosciusko-Morizet *et al.*, 1998).

Meinzen-Dick et Rosegrant (1997) montrent que les cadres technique et institutionnel nécessaires à l'application de ces outils sont difficiles à mettre en place et que certaines interventions peuvent avoir des effets contraires à ce qui est attendu *a priori* :

- une tarification volumétrique implique la présence de compteurs au niveau de l'utilisateur, ce qui n'est pas toujours possible techniquement, cher à installer, et surtout à contrôler. En périmètre irrigué cette mesure est délicate à appliquer lorsque l'irrigation n'est pas à la demande ;
- l'augmentation de taxes proportionnelles à la surface irriguée légitime la consommation de l'irriguant et peut entraîner une augmentation de la quantité d'eau extraite.

Par contre, une tarification basée sur une approximation du volume consommé à partir de l'assolement peut pousser les exploitants à opter pour des cultures moins consommatrices. L'augmentation du prix de l'énergie peut être une manière indirecte de taxer l'eau pompée sur une nappe pour inciter à une réduction des extractions, sans pour autant introduire une nouvelle taxe ou redevance dont l'acceptation est délicate lorsque l'eau est directement captée.

1.2.3.2. L'accès payant

Le paiement d'un droit d'accès peut être un moyen de décourager les usagers à construire de nouveaux captages, à condition toutefois que l'enregistrement des droits d'accès soit réellement effectué et que le prix de la concession soit dissuasif. Cette mesure soulève des questions d'équité si seuls les nouveaux arrivants y sont soumis, et n'influence évidemment en rien le taux de consommation des captages une fois construits.

1.2.3.3. Les marchés de l'eau

La mise en place de marchés de l'eau apparaît depuis quelques temps avec l'importance grandissante attachée à la valeur économique de l'eau et la vogue des politiques de tendance néo-libérales (Montginoul, 1998).

Selon la définition donnée par Montginoul et Strosser (1999), un marché de l'eau est un lieu d'échange de l'eau (bien matériel ou droit à prélever) entre des individus ou des collectivités. Le marché de l'eau peut être plus ou moins organisé, et s'effectuer entre un même type

d'usages ou entre usages différents, à un niveau plus ou moins agrégé, et à des échelles spatiales différentes. Pour qu'il fonctionne, trois conditions au moins doivent être réunies :

- **la ressource en eau doit être inférieure aux besoins ;**
- **le droit d'eau doit être entièrement défini** (reconnu, exclusif, transférable et protégé) ;
- **une allocation initiale doit être réalisée** (selon une priorité de proximité, chronologique ou au plus offrant).

Sur le plan théorique, un marché de l'eau doit permettre de maximiser le bien-être, et de réallouer la ressource entre usagers de manière efficiente. Cependant, il peut s'accompagner de plusieurs types d'effets non marchands (Montginoul, 1997) : sur les droits des usagers non impliqués dans le marché ou sur les secteurs de l'économie liés à l'eau, sur les usagers futurs du fait de la myopie du marché, sur la répartition spatiale et temporelle des prélèvements. Par rapport à un système d'allocation autoritaire de l'eau par le gestionnaire, les marchés de l'eau permettent à celui qui vend, et donc qui n'utilise pas, de toucher une compensation monétaire et à ceux qui n'ont pas d'accès à la ressource, de se procurer de l'eau, ce qui pousse certains auteurs à les qualifier d'équitables ; cependant, ils peuvent également conduire à un déséquilibre social dans le cas où tous les droits se concentrent dans les grosses exploitations, conduisant à la disparition des petites.

Concernant les marchés de l'eau agricole sur les nappes souterraines, la littérature offre plusieurs analyses de cas en Inde (Palmer-Jones, 1994 ; Strosser, 1997 ; Meinzen-Dick, 1997), et souligne en général l'impact positif de ces marchés sur les rendements, les marges brutes, les assolements et les superficies cultivées, tout en révélant parfois une productivité inégale entre les propriétaires de puits et les acheteurs (Strosser, 1997). Montginoul et Strosser (*op. cit*) soulignent que **l'impact économique de tels marchés, trop peu étudié, n'est pas toujours significatif** et dépend principalement de la rareté des ressources en eau, des contraintes physiques de l'infrastructure, et de l'homogénéité des systèmes de production. Ces auteurs insistent aussi sur le fait que des marchés de l'eau nécessitent non seulement des infrastructures pour le transfert de l'eau, des moyens de mesure, mais surtout des institutions d'encadrement et d'arbitrage.

De plus, les exemples de marchés de l'eau souterraine pakistanais étudiés par Meinzen-Dick (1997), révèlent les limites suivantes :

- **il s'agit plus d'un échange de service** que d'un véritable marché car l'agriculteur ne consent à vendre que le surplus de l'eau prélevée qu'il n'utilise pas sur sa propre exploitation ;

- il peut s'avérer nécessaire de **recourir à un rationnement en cas de pénurie**, pour protéger certains usages ou usagers ;
- **les conséquences du marché de l'eau sur la durabilité de la gestion de la nappe et des sols sont encore mal connues** et peuvent même s'avérer négatives, l'accès pour tous à l'eau souterraine pouvant entraîner une forte augmentation des prélèvements et un usage d'eau de qualité médiocre néfaste à long terme (risques induits de salinisation et de sodisation) (Strosser, 1997) ;
- dans le cas de cultures très sensibles à l'eau, **les agriculteurs préfèrent avoir leur propre accès** plutôt que d'acheter de l'eau.

En conclusion, si les instruments économiques peuvent s'avérer nécessaires, ils ne sont jamais suffisants, ce que soutiennent des institutions internationales pourtant libérales, comme la Banque Mondiale (Bhatia *et al.*, 1995). De plus, l'accès bien souvent direct entre usager et nappe pose des problèmes techniques et psychologiques d'application de ces outils. Enfin, **leur efficacité pour réduire la consommation en eau dépend de la sensibilité de la demande au prix de l'eau**, qui est faible en irrigation dans les situations suivantes (Montginoul, 1997) :

- lorsque **les cultures irriguées sont à forte valeur ajoutée** ;
- lorsque **l'eau est un moyen de survie** ;
- lorsqu'il n'y a **pas de possibilités de cultiver en sec** ;
- lorsque **l'eau constitue une faible part des charges de la culture**.

Voyons maintenant quels outils non économiques peuvent permettre de gérer la demande.

1.2.4. Des instruments non économiques de gestion par la demande

Les instruments non économiques permettant de gérer la demande sur une ressource collective comportent essentiellement l'éducation, les règles qui déterminent les droits d'accès, d'usage et de participation à la gestion.

1.2.4.1. L'éducation et l'information des usagers

L'éducation peut inciter les usagers à l'économie et à une gestion plus efficiente, et leur faire prendre conscience du caractère collectif de la ressource. Par exemple, des graphes peuvent être utilisés pour montrer aux usagers l'évolution des niveaux piézométriques, et susciter des discussions et une participation dans les processus de décision (dans le cadre d'une gestion décentralisée) (Nagaraj *et al.*, 2000). Pour Lopez et Petit (2000), le SIG de la nappe de Beauce, support de données intégrées et spatialisées, constitue un outil de gestion à part entière.

1.2.4.2. Les règles d'accès et d'usage

Les règles peuvent être imposées par une autorité centrale ou être établies par un groupe local de gestion, dans le cadre d'un consensus plus ou moins formalisé entre usagers.

a. Prescription de normes

Les règles peuvent prescrire des normes techniques, d'accès, d'usages visant à réduire la consommation d'eau ; par exemple, l'utilisation obligatoire de la micro-irrigation ou un espacement limite entre les puits. Pour être efficaces, ces normes doivent être comprises par les usagers et doivent être accompagnées d'un contrôle et de mesures de sanctions en cas de non respect. Lorsqu'elles sont élaborées par les usagers eux-mêmes, l'auto-surveillance et la confiance mutuelle peuvent remplacer le contrôle autoritaire.

b. Prescription de droits d'eau

Ils peuvent être définis en termes de quantité, d'accès à la ressource, d'usage, de temps d'accès, de propriété etc. Par rapport aux ressources collectives, on distingue les droits d'accès et les droits d'extraction. Dans le cas d'une nappe, les premiers correspondent au droit de creuser un puits ou un forage, et les seconds, au droit de pomper de l'eau ou de recevoir de l'eau d'un puits jaillissant. Les droits d'eau peuvent être utilisés en terme de gestion *via* une allocation qui conduit au partage de la pénurie ou à une allocation prioritaires aux usages préférentiels.

La diversité des droits d'eau peut être illustrée par les différentes règles d'usages appliquées dans plusieurs états américains (Teerink et Nakashima, 1996) :

- **la propriété absolue**, par laquelle le propriétaire de la terre est également propriétaire de l'eau sous-jacente, et est donc libre de prélever, de gaspiller la ressource comme il le souhaite, sans se soucier des autres usagers ;
- **la règle de la raison** par laquelle le propriétaire a droit à l'eau souterraine sous-jacente mais est prié de l'utiliser raisonnablement ;
- **les droits corrélatifs** par lesquels non seulement les propriétaires doivent utiliser l'eau raisonnablement mais aussi doivent partager proportionnellement à la surface qu'ils possèdent les restrictions dues à la surexploitation ou à tout autre limitation sur la ressource ;
- **l'appropriation prioritaire** qui reconnaît les eaux souterraines comme appartenant à l'Etat et soumises à des droits de priorité dans l'ordre d'arrivée, avec en général une priorité à l'eau utilisée sur place par rapport à l'eau exportée.

Les avis sont partagés sur l'efficacité des différents régimes d'appropriation pour une gestion durable de la ressource : certains pensent qu'une appropriation totale conduit forcément à une surexploitation selon l'adage "use or lose" tandis que d'autres défendent la logique économique intrinsèque de la doctrine de l'appropriation (Gisser, 1983). Les droits corrélatifs constituent une règle intéressante ; encore faut-il qu'elle soit effectivement respectée.

c. Les quotas, des droits d'usage particuliers

Les quotas constituent une précision du droit d'accès en termes quantitatifs, en situation de rareté de la ressource. En définissant un plafonnement de consommation, ils contraignent directement les décisions des agents. Un quota peut être spécifié en volume maximum prélevable, ce qui implique des compteurs, en fraction du débit total, ce qui implique de connaître les capacités des pompes et les profondeurs de pompage, ou en temps de prélèvement (Montginoul, 1998).

Ainsi, en France, des limitations ou des suspensions provisoires d'usages peuvent être décrétées par le préfet sur les nappes classées en zones d'alerte ; cependant le caractère temporaire de ces restrictions quantitatives paraissent inefficaces à Kosciusko-Morizet *et al.* (1998) et à Labbé *et al.* (2000).

Nagaraj *et al.* (2000) rapportent l'expérience de gestion de la nappe du Nebraska (Etats-Unis), où un droit d'usage proportionnel à la surface en propriété, correspondant approximativement au déficit hydrique moyen des cultures pratiquées est alloué à chaque propriétaire usager ou non, pour une durée de 5 ans. L'usager décide de la répartition spatio-temporelle de ce droit durant cette période, et peut échanger son droit avec un autre propriétaire. La surface irrigable est limitée pour les nouveaux puits.

d. Les zones d'accès, outils spatialisés

La définition plus ou moins restrictive des modes d'accès par types de zones est souvent utilisée pour les nappes. Ainsi, en France on distingue les "zones de répartition des eaux", bassin ou système aquifère présentant un déséquilibre offre/demande, où les seuils d'autorisation de prélèvement sont abaissés, les "zones d'alerte" délimitées par arrêté préfectoral en cas de pénurie ou de sécheresse et les "zones de sauvegarde", où tout captage peut être interdit ou réglementé¹². En Espagne, les aquifères qui sont ou risquent d'être surexploités font l'objet de plans de gestion particuliers : aucun prélèvement nouveau n'est autorisé et ceux existants sont redéfinis de manière à restaurer et à préserver la ressource sur le long terme.

e. Le contrôle de la demande

Le contrôle de la demande consiste à imposer la déclaration ou la demande d'autorisation de prélèvement, et éventuellement à contrôler les prélèvements des points d'eau par la pose de compteur. Ainsi, en France, les prélèvements d'eaux souterraines doivent faire l'objet d'autorisation pour tout débit supérieur à 80 m³/h et pour les profondeurs de captage supérieures à 60 m ; de plus tout exploitant doit installer à ses frais un compteur ou tout autre appareil de mesure des débits prélevés. Mais ces mesures connaissent des limites évidentes : en 1998, 40% des forages agricoles n'étaient pas comptabilisés, et parmi ceux répertoriés, seulement la moitié étaient dotés de compteurs, malgré le caractère obligatoire de cette mesure depuis le 1^{er} janvier 1997¹³ (Kosciusko-Morizet *et al.*, 1998). De plus, les autorisations de prélèvement peuvent être accordées trop facilement (Goodhue *et al.*, 1998).

¹² Source : "Les outils juridiques de la question de l'eau : application aux eaux souterraines et à l'irrigation" note interne de la Direction de l'Eau du Ministère de l'Aménagement et du Territoire, 31 mars 1998, *in* Kosciusko-Morizet *et al.*, 1998.

¹³ d'après la loi sur l'eau de 1992

1.2.4.3. Des contrats de gestion

Les règles de gestion par la demande peuvent être définies dans le cadre d'un contrat local entre usagers, établi plus ou moins formellement. Ces contrats fixent de manière concertée les objectifs à atteindre pour chaque acteur ; ce sont des règles communes, qui peuvent s'appuyer sur des droits locaux d'accès, de quotas ou d'échanges. Ce type de gestion négociée suppose de disposer d'informations facilement utilisables sur l'état et les tendances d'évolution du milieu et des usages. De plus, il suppose que les acteurs soient animés par une même éthique. De telles "*coordinations de proximité, conduisant à des arrangements sans transferts financiers*" pour la gestion des espaces ruraux ont ainsi été étudiés par Beuret (1999). Montginoul *et. al* (1998) inventorient également les étapes de cette contractualisation de la gestion locale à travers des études de cas français de gestion concertée à l'œuvre ou en cours d'élaboration (notamment les nappes Astienne et de la Vistrenque). L'amélioration de la coordination entre offre et demande en eau au sein des périmètres irrigués peut également donner lieu à la mise en place de règles plus efficaces de gestion locales de la ressource en eau (Gilot, 1994).

Ces contrats formels ou informels ne peuvent avoir lieu que dans un cadre favorable aux négociations et dans un contexte de gestion commune. L'aspect institutionnel de ce type de gestion consensuelle, ou concertée, sera abordé dans le chapitre suivant¹⁴.

1.2.5. Choix d'un outil de gestion

1.2.5.1. L'efficacité des instruments de gestion

L'efficacité d'une gestion par la demande peut être freinée par l'insuffisance du cadre légal, des bénéfices au niveau de la collectivité, des moyens d'application, de l'acceptation par les usagers, de la définition des objectifs recherchés, et de la connaissance du système (Montginoul, 1997). Pour Briscoe (1997), une réforme de la gestion de l'eau pour une gestion par la demande doit être initiée à partir d'une demande explicite de changement par les usagers. Or le choix d'une gestion durable par les usagers et les gestionnaires dépend de la valeur qu'ils accordent au maintien de la ressource par rapport au bénéfice qui en est tiré dans le présent (Grimble *et al.*, 1996 ; Ostrom, 1990), et par la conscience qu'ils ont des problèmes et du caractère collectif de la ressource.

¹⁴ Plusieurs auteurs (comme Anne Laurent ou Olivier Godard) différencient la gestion patrimoniale de la gestion économique ou réglementaire, ce qui laisse entendre que les outils économiques et réglementaires ne peuvent être négociés dans un contexte de gestion décentralisée impliquant les usagers ; or on trouve aux Etats-Unis par exemple des nappes gérées "en bien commun" (même si ce n'est pas explicitement déclaré), utilisant des outils économiques et réglementaires, choisis par le groupe des usagers.

1.2.5.2. Complémentarité ou exclusion des instruments de gestion

Les instruments de gestion présentés peuvent être complémentaires, concurrents ou contradictoires. Par exemple, la tarification et le système de quotas peuvent être concurrents face à un objectif de répartition de la ressource en eau, et leur choix peut être imposé par les caractéristiques du système ou dépendre des préférences du gestionnaire (équité, équilibre budgétaire, répartition efficiente) (Montginoul, 1998). Les caractéristiques du système à prendre en compte sont l'élasticité de la demande, la rareté de la ressource, l'information disponible. Ces deux outils peuvent également être complémentaires. Pour la plupart des auteurs, une gestion de l'eau par la demande efficace *doit* reposer sur une combinaison de différentes approches du fait du statut spécifique de l'eau, pour être acceptée par les usagers (Meinzen-Dick et Rosegrant, 1997).

Ainsi, pour Gisser (1983), la solution pareto-optimale de gestion d'une nappe par la demande consiste à allouer des droits d'appropriation bien définis aux usagers, échangeables *via* un marché, tout en donnant aux usagers potentiels la possibilité d'entrer dans le groupe des usagers par le marché. Eheart et Barclay (1990) concluent également que la possibilité offerte aux usagers d'échanger leurs quotas combinée à une utilisation plus efficiente de l'eau, permet de compenser les restrictions imposées par la définition d'un taux global d'exploitation de la nappe et de rendre cette mesure plus acceptable sur le plan politique. Mais à l'inverse, une combinaison d'outils trop diversifiés peut conduire à des incohérences, des incompréhensions et des problèmes de communication (Faysse, 1998a).

Au-delà des limites soulevées par la mise en œuvre des différents outils pour toute ressource collective, identifions celles qui sont particulières aux nappes.

1.3. Difficultés de gestion de la demande inhérentes aux nappes

1.3.1. Les caractéristiques des nappes...

La mise en application de la gestion par la demande doit tenir compte des caractéristiques particulières des eaux souterraines, par rapport à d'autres types de ressources collectives :

- la ressource est **invisible**, sa délimitation est très difficile, sa perception est souvent plus ponctuelle que globale ;
- la **double fonction conductrice et capacitive** de la nappe permet le prélèvement de volumes d'eau supérieurs aux apports, ce qui entraîne une surexploitation ;
- la ressource est **étendue spatialement** et, la plupart du temps, les prélèvements sont atomisés, petits et dispersés, ils ne sont **pas reliés par un réseau** comme dans un

périmètre irrigué ou sur une rivière : le temps de réaction entre deux pompages voisins est beaucoup plus long ;

- la **géométrie et le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère sont inconnus des usagers** et souvent mal connus des gestionnaires ;
- la géométrie et le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère ne sont **pas uniformes dans l'espace ni dans le temps**, le comportement de la nappe variant avec l'abaissement ;
- les **temps de réaction de la nappe sont très lents** par rapport aux temps de prélèvement et d'apport ;
- par rapport à une ressource en eau de surface, il est **difficile de percevoir les résultats d'action** du fait de ces temps de réaction lents et du caractère invisible de la ressource.

1.3.2Rendent difficile la mise en œuvre de certaines mesures

Les difficultés de mise en œuvre des outils précédemment énumérés sont en effet accrues :

- **le contrôle de la demande, la pose des compteurs, la perception de taxes, redevances ou la tarification sont difficiles et coûteux** du fait de la dispersion des agriculteurs ;
- **les institutions administratives sont souvent inadaptées à l'extension** de la ressource et une nappe peut être gérée par plusieurs services territoriaux de l'Etat ce qui entraîne des redondances et des incohérences ;
- **les mesures de contrôle ou de tarification sont difficiles à accepter pour des usagers directs** assumant eux-mêmes les coûts d'extraction ;
- **lorsque l'eau est captée pour être exportée** du système, **les mesures d'incitation** à un comportement plus économe sont encore plus **mal comprises**.

Les caractéristiques spécifiques des nappes et de l'eau suscitent des perceptions de la ressource et du bien qui peuvent être très différentes d'un usager à l'autre, entre usagers et gestionnaires, ou même entre chercheurs. Cet aspect qui peut sembler secondaire, revêt en réalité une importance majeure, la perception influençant les études menées sur la ressource, le choix des outils de gestion, leur acceptation par les usagers.

1.3.3. Les différentes perceptions de la nappe et de l'eau

La nappe étant une ressource cachée, les usagers peuvent difficilement se représenter la ressource dans sa globalité, et ne réalisent pas nécessairement qu'ils utilisent la même ressource que leurs voisins en l'absence d'interactions fortes de voisinage. De fait, les usagers ne perçoivent la ressource qu'à travers leur captage, comme une eau qu'ils s'approprient par leurs propres moyens, dans certains cas c'est une eau "magique" ou un "don de Dieu". Cette perception de la ressource rend les outils économiques et réglementaires difficilement acceptables, surtout lorsque les usagers investissent eux-mêmes dans le captage et payent l'extraction de l'eau. En général, les autorités ont une vision plus renseignée et globale de la ressource, notamment grâce à l'apport de modèles hydrogéologiques. Ces différences de perceptions ne concernent pas seulement la ressource, mais aussi l'eau qui est extraite¹⁵. En effet, selon les gestionnaires, les institutions de développement, ou les chercheurs, l'eau peut être qualifiée de "droit universel", "bien naturel non produit" (Montginoul, 1997), "bien vital", "bien collectif" (Laville, 2000), "bien économique"...

Ces perceptions prêtent à débat, comme l'a montré le Second Forum Mondial de l'Eau, à l'issue duquel l'eau a été déclarée "*indispensable à la vie et à la santé des hommes et des écosystèmes, et [une] condition fondamentale au développement des pays*" mais non "droit fondamental de l'homme", ainsi que le revendiquaient de nombreuses organisations non gouvernementales. La littérature sur le sujet montre que pour la plupart des auteurs et des institutions internationales, il est admis que l'eau a une valeur économique dès lors qu'elle devient rare (Howsam, 1996 ; Montginoul et Rieu, 1996 ; Wimpenny, 1994 ; Briscoe, 1997 ; Meinzen-Dick et Rosegrant, 1997 ; Brodhag, 1998 ; Nations Unies¹⁶...). Dans cette logique, le fait de ne pas traiter l'eau comme un bien économique serait selon la Banque Mondiale une des causes principales des difficultés de gestion de l'eau (Serageldin, 1995), notamment dans le pourtour Méditerranéen (Hamdy et Lacirignola, 1997).

Cependant si la prise en compte de la "valeur économique de l'eau", préconisée de manière consensuelle par les institutions internationales de développement¹⁷, découle de la rareté croissante des ressources en eau, elle provient aussi de la nécessité de réduire la dette publique et d'obéir aux politiques d'ajustement structurel (Strosser, 1997). Même si cette vision consensuelle de l'eau comme un bien économique est atténuée par les notions de

¹⁵ La perception d'une même eau peut tout d'abord différer, pour plusieurs acteurs, selon l'usage qui en est fait, par rapport à ses propriétés physico-chimiques.

¹⁶ § 34 du Programme pour le prolongement de la mise en œuvre de l'Agenda 21, adopté en Session Spéciale de l'Assemblée Générale les 23-27 Juin 1997

¹⁷ Par l'OCDE en 1989, par la Banque Mondiale en 1993, par la FAO en 1994, in [Montginoul, 1998 #15]

"droit", de "bien vital" ou de "bien naturel"¹⁸, elle est présentée comme un dogme et donne priorité absolue aux instruments de gestion de type économique. Cette vision n'est cependant pas unanime : pour certains, elle correspond à un choix idéologique, et ne tient pas compte du fait que "*l'eau est une ressource unique, particulière, de nature différente des autres ressources*"¹⁹.

Ces différences de perception entre les acteurs de l'eau ne sont pas sans conséquences :

- une perception plutôt économique de l'eau favorise le choix d'instruments de gestion économique présentés comme efficaces, malgré une fréquente absence d'étude de leurs impacts dans les contextes spécifiques où ils sont préconisés ;
- une perception subjective et locale de la ressource par des usagers dont le comportement n'est pas forcément rationnel rendent difficiles la compréhension de mesures de sauvegarde et encore plus la mise en place d'outils consensuels (qui impliquent une prise de conscience du caractère fini de la ressource, des interactions entre usages et un accord sur les principes d'une gestion pour le bien commun, en contradiction avec des intérêts individuels de court terme).

Il semble finalement que les chercheurs et les institutions internationales ont tendance à imposer leur vision de l'eau aux pays en développement.

"Les principes de DUBLIN insistent fortement pour que l'eau soit traitée comme un bien économique et que, en conséquence, les instruments économiques soient de plus en plus largement utilisés, comme les taxes de prélèvement, les redevances de pollution, et les marchés de l'eau et que les coûts des usages non marchands soient pris en compte. La récente Conférence internationale sur l'eau et le développement durable, qui s'est tenue à Paris, en mars 1998, à l'initiative du Président de la République Française, a renforcé cette volonté au niveau politique dans le cadre de la 6^{ème} session de la Commission des Nations Unies du développement durable qui a choisi en 1998 l'eau comme thème prioritaire." (Babillot et Lourd, 2000).

¹⁸ Pour Babillot et Lourd (2000) "[...] *l'eau ne peut être assimilée à un bien économique comme les autres, ni même simplement à un bien économique : elle échappe clairement, pour l'économiste, à toute tentative réductrice de sa complexité*".

¹⁹ Ricardo Petrella, Le Manifeste de l'eau, éditions Page deux, Lausanne, in Le Monde, 17 mars 2000

1.3.4. Cadre institutionnel et efficacité des outils de gestion des nappes

Le cadre institutionnel de la gestion, plus ou moins centralisé ou consensuel, a un impact important sur l'efficacité du mode de gestion.

A priori, l'Etat semble le mieux placé pour assurer la gestion d'une nappe. En effet, il perçoit plus que l'usager la globalité de la ressource, et prend le parti d'un développement durable, souvent contradictoire avec les intérêts immédiats des usagers. Mais l'expérience montre que peu de pays ont les capacités administratives de contrôler directement l'exploitation des nappes et qu'il en résulte souvent une surexploitation incontrôlée (Berkoff, 1994 ; Tolentino, 1996 ; Grimble *et al.*, 1996). D'une manière générale, la gestion centralisée est rarement efficace, du fait du décalage fréquent entre décisions de gestion et réalité locale, de la complexité de l'interprétation des règles, d'un contrôle local difficile et d'une réglementation mal acceptée, le milieu local étant méconnu (Laurent, 1993). La gestion centralisée se traduit donc souvent par une situation d'exploitation en accès libre et de non-gestion *de facto*.

A l'opposé, une gestion commune ou négociée peut être officiellement instituée ou exister sans être reconnue. La gestion commune consiste à définir des règles d'appropriation sur la quantité, le temps, la localisation, la technique des prélèvements adaptées aux conditions spécifiques de prélèvements et reconnues des usagers, la plupart d'entre eux pouvant participer à leur élaboration et modification (Ostrom, 1990). Blomquist (1992) décrit plusieurs cas de gestion commune de nappe en Californie du Sud et avance les raisons probables de la réussite ou des limites de ces modes de gestion. En France, les ressources en eau sont également gérées avec la participation des usagers ou du moins d'instances représentatives de ceux-ci ; mais il s'agit plutôt d'une gestion concertée entre l'Etat et les usagers, que d'une gestion commune, dans le sens où elle est instituée par l'Etat tout en faisant participer les différents acteurs en jeu.

En France, les Agences de Bassin placées sous la tutelle de l'Etat suivent une politique de gestion définie par un Comité de Bassin, composé d'élus et de représentants d'usagers. Les acteurs locaux peuvent participer à la mise en place de Schémas d'Aménagements et de Gestion des Eaux (SAGE), outils contractuels visant à organiser la gestion collective à une échelle ayant du sens sur le plan hydraulique. L'Etat intervient dans l'encadrement et dans la coordination des SAGE, grâce à l'instauration de Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), à l'échelle des bassins versants, et aussi en dernier ressort puisque les SAGE doivent être soumis à l'autorisation du préfet. Dans le cadre d'un SAGE de nappe il peut y avoir organisation d'une gestion collective des prélèvements par concertation, qui aboutit à un ensemble de demandes, que l'administration autorise pleinement ou en leur appliquant un coefficient général de réduction si nécessaire (Kosciusko-Morizet *et al.*, 1998).

Un rapport de l'ANDA²⁰ (1999) répertorie différentes situations françaises de gestion collective de l'eau, notamment sur des nappes.

Si la gestion centralisée est largement remise en cause actuellement, la gestion consensuelle implique certaines conditions pour être efficace²¹, et présente aussi des limites, identifiées entre autre par Laurent (1993), Nicol (1996), Montginoul *et al.* (1998), Allain (1998), Goodhue *et al.* (1998), Ostrom (1990) et Salles et Zelem (1998). Il s'agit notamment du caractère local et immédiat de la perception et des exigences des acteurs, face à une ressource réagissant lentement et à préserver sur le long terme. De plus, la mise en œuvre d'une gestion consensuelle implique des conditions favorables, inventoriées par Ostrom (1990) et par Montginoul *et al.* (1998). Citons par exemple la nécessité d'une forte motivation du groupe des usagers, provenant souvent d'un conflit, une bonne information concernant la ressource, une ressource et un groupe d'usagers clairement identifiés, des règles claires, un suivi et un contrôle du système, accompagné de sanctions en cas de non respect des règles.

Pour conclure, la gestion consensuelle présente l'intérêt incontestable d'être acceptée par les usagers, hormis les limites susmentionnées, mais son émergence au niveau d'une nappe est difficile du fait d'un manque de perception fréquent du caractère commun de la ressource, de la faiblesse des connaissances techniques locales sur le fonctionnement de la nappe et de l'absence d'intérêt pour la sauvegarde de la ressource.

Le choix d'un cadre institutionnel dépend aussi des conditions politiques du pays et des caractéristiques de la ressource en jeu, par exemple sa taille et la connaissance qu'en ont les acteurs.

²⁰ Association Nationale pour le Développement Agricole.

²¹ Les conditions d'efficacité de la gestion concertée sont données par Montginoul *et al.* (1998), il s'agit entre autres d'une mobilisation progressive des usagers provenant d'un conflit d'usages, de la constitution d'une structure, de la définition d'objectifs de gestion...

1.4. La gestion de la demande sur une nappe : quel bilan ?

Finalement, le mode de gestion de la demande sur une nappe se réfère au choix des outils ainsi qu'aux acteurs impliqués d'une part dans ce choix, d'autre part dans la mise en œuvre de la gestion. L'efficacité de cette gestion dépend alors de la perception qu'ont les acteurs de la nappe et de l'acceptabilité sociale des outils mis en œuvre, mais aussi du contexte macroéconomique. Par exemple, des mesures incitatives nationales dans un objectif de sécurité alimentaire peuvent être incompatibles voire contradictoires avec une politique d'économie de l'eau.

Le tableau 1 récapitule les conclusions de cette recherche bibliographique sur la gestion de la demande sur les nappes : un panel d'outils, leurs avantages, leurs limites. Des exemples d'application sont fournis (dans certains cas, plusieurs outils sont associés dans un même mode de gestion, ce qui explique les répétitions).

La littérature sur la question montre que de nombreuses études sont menées par ailleurs sur l'efficacité, parfois comparée, d'outils de gestion sur des nappes données ou sur des archétypes de nappe. Ces études, basées sur des modèles ou sur des raisonnements socio-économiques ou institutionnels, conduisent parfois à des conclusions contradictoires dans une région donnée : c'est le cas des réflexions de Palmer-Jones (1997), qui considère les marchés de l'eau comme une solution inadaptée au contexte de l'Asie du Sud, tandis que Smith et Pathan (1996) préconisent au contraire cet outil pour la gestion des nappes pakistanaises.

Cet exemple (ainsi que Nagaraj *et al.*, 2000, et le § 2.2.4.3 de cette partie) révèle les limites d'une réflexion sur les outils de gestion de la demande pour un système nappe/usages donné uniquement basée sur des considérations globales à l'échelle d'un pays. Il semble important au contraire d'examiner les conditions spécifiques du système : "*Understanding the socio-political economy (and culture) surrounding groundwater and the management mechanisms that may apply is as important to management as understanding the physical system*" (Burke *et al.*, 1999) .

Le chapitre suivant décrit globalement le système étudié compte tenu du contexte de la gestion de l'eau en Tunisie et discute les interventions de gestion effectuées jusqu'alors et préconisées pour l'avenir.

Tab.1 : Les outils de gestion de la demande : avantages, conditions et limites

	<i>Outils</i>	<i>avantages</i>	<i>conditions</i>	<i>limites</i>	<i>exemples</i>
techniques	assolement moins consommateur en eau	adapter les cultures à la pluviométrie	acceptation locale, contextes économique et pédologique	difficulté à imposer	Israël
	couplage d'un SIG et d'une aide à la gestion de l'irrigation	limiter les abaissement dus aux prélèvements en concertation avec les usagers en limitant leurs pertes	contexte de concertation, disponibilité des données, niveau de développement	insuffisant dans certains cas, difficile à mettre en œuvre sur un système complexe et vaste	Castille, Espagne (Eheart et Barclay, 1990)
	efficience du réseau	réduire pertes en eau	rentabilité	insuffisant	Israël
	systèmes d'irrigation économes	réduire pertes en eau	moyens financiers, subvention, vulgarisation,	choix dépendant de la qualité de l'eau, du débit ou de la pression disponible	Nebraska, E.U ; Cap Bon, Tunisie Israël
	pose de compteurs	contrôler, facturer au volume	acceptation locale	contournement ; difficulté de contrôle ;	France
économiques	tarification (de l'eau ou de l'énergie)	inciter à l'économie d'eau (adaptation des assolements, des objectifs de rendement, des pratiques)	demande élastique ; facilité par le paiement d'un service ; acceptation locale	difficile en cas d'absence de service de distribution collectif ; difficulté de perception, de contrôle demande peu élastique	Système aquifère girondin, France (à l'étude <i>in</i> Reynaud 2000)
	taxes, redevances	inciter à l'économie	élasticité demande taxes : risque d'effet contraire,	difficulté de perception de contrôle, d'acceptation	nappes californiennes, E.U (Blomquist, 1992)
	accès payant	décourager la construction de nouveaux captages	acceptation locale, déclaration, prix décourageant	difficulté de contrôle ; non déclaration	
	marché de l'eau	augmenter l'efficience économique de l'eau accès des non propriétaires à l'eau	acceptation locale, infrastructures technique et institutionnelle	n'empêche pas la surexploitation à terme, risque de déséquilibre social	Pakistan (Meinzen-Dick, 1997)
non économiques	éducation des usagers	meilleure acceptabilité gestion	moyens, niveau éducation	insuffisant	Nebraska, E.U ; Castille, Espagne
	quotas	contraindre la demande de manière équitable	mesure du volume ou du temps	capacité de contrôle dans un système de prélèvement dispersé	nappes californiennes, E.U (Blomquist, 1992)
	droits d'accès	inciter les gens à ne pas construire	déclaration construction	autoritaire, implique moyen de contrôle ; inéquité	Chine (Grimble <i>et al.</i> , 1996)
	outils contractuels	adapté aux conditions locales, acceptés par la population	contexte de négociation, conscience du risque, conscience du caractère commun de la ressource	problèmes de représentation, vision locale, à court terme, problème fédérateur, longueur des négociation...	Astien, France (Laurent, 1993) Vistrenque, France (ANDA, 1999) nappes californiennes, E.U (Blomquist, 1992)
	écartement des puits	limiter les interférences locales	moyens de contrôle	parfois inutile	Nebraska, E.U.
	zones d'accès	réguler l'accès et l'usage	moyens de contrôle, acceptation	autoritaire, mal compris implique moyen de contrôle	nappe de Kairouan, Tunisie France

2. Le système nappe - usages étudié²²

Le contexte tunisien et le système étudié sont présentés dans ce qui suit. Cette description générale du cas d'étude repose sur la collecte et l'analyse de documents dispersés dans diverses institutions, par des échanges avec des personnes ressources, et par une quarantaine d'enquêtes préliminaires sur le terrain.

2.1. La gestion de l'eau en Tunisie

Dans ce pays du Maghreb la ressource en eau est insuffisante ($450 \text{ m}^3/\text{habitant}/\text{an}^{23}$) et inégalement répartie (la pluviométrie variant de moins de 100 mm à plus de 1500 mm du sud au nord du pays). Pourtant, l'agriculture, qui constitue le principal secteur consommateur d'eau (à raison de plus de 80% des eaux mobilisées d'après Bechtel International et Scet-Tunisie, 1999), représente un enjeu important (18% du PIB²⁴ tunisien), l'irrigation en particulier (35% de la valeur de la production agricole, 27% de l'emploi agricole). L'agriculture constitue un facteur de stabilité sociale dans le monde rural et participe à la politique de sécurité alimentaire poursuivie par l'Etat, qui vise à équilibrer sa balance commerciale alimentaire. Le secteur du tourisme, de plus en plus important dans l'économie du pays, est un consommateur exigeant en termes de qualité et de sécurité d'approvisionnement, ce qui localement, peut induire des tensions entre les secteurs utilisateurs de l'eau, et justifie des précautions accrues en terme de risque de salinisation des eaux.

Le cas des aquifères pose particulièrement problème : les nappes souterraines constituent une part importante des ressources en eau du pays (environ 40%), dont à peu près 1/3 provient des nappes phréatiques. Mais parmi les 196 nappes phréatiques du pays, 26 % et non des moindres, sont déjà surexploitées, dont la plupart encourent un risque grave de salinisation du fait de leur situation côtière (Khanfir *et al.*, 1998). Ennabli (1995) cite notamment les cas du Cap-Bon, du Sahel et de Sidi Bouzid, et insiste sur le fait que cette tendance à la surexploitation risque de compromettre l'avenir économique de ces régions, d'autant que la solution de transfert des ressources semble difficile à mettre en œuvre étant donné les ressources disponibles. Les nappes sont pourtant, outre leur intérêt quantitatif,

²² Cette partie reprend des extraits d'une communication présentée au colloque SFER de 1998 (Feuillette *et al.*, 1998).

²³ Ce chiffre est remis en cause par la Tunisie, ainsi que les normes internationales, qui qualifient les pays disposant de moins de $1000 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{an}$ de pauvres en eau. En effet, des ressources alternatives comme la réutilisation des eaux usées ou la désalinisation permettent par exemple de pallier les limites en eau douce disponible.

²⁴ Produit Intérieur Brut

des réserves stratégiques, puisqu'elles permettent de compenser par leur fonction de stockage les irrégularités du régime climatique méditerranéen, tout en évitant les pertes par évaporation et la salinisation résultante, au contraire des barrages.

Dans ce contexte, les objectifs prioritaires de l'Etat sont :

- assurer l'adduction en eau potable à tous les habitants ;
- assurer la sécurité alimentaire du pays et limiter le poids de l'importation sur le budget national, notamment à travers la production de céréales et de cultures d'industrie (Pérennes, 1993) ;
- développer l'agriculture d'exportation (agrumes, huile, dattes, fraises...) ;
- développer le tourisme, qui constitue une grande part des revenus de la Tunisie, et une source essentielle en devises ;
- développer l'industrie, notamment les branches du textile et des phosphates.

Présentons brièvement le contexte historique de la gestion de l'eau en Tunisie.

2.1.1. D'une amélioration de l'offre...

L'Etat a cherché à compenser la rareté et l'inégale répartition de l'eau depuis l'indépendance²⁵, par une politique de l'eau axée d'une part sur la mobilisation accrue des ressources en eau, d'autre part sur des transferts interrégionaux entre zones excédentaires et zones déficitaires. C'est ainsi que les trois dernières décennies ont vu la réalisation de nombreux ouvrages hydrauliques (grands et petits barrages, lacs collinaires, canaux, aqueducs, forages...)²⁶ avec une planification organisée par grande région et une gestion de l'offre et non de la demande. La "stratégie décennale de l'eau" pour 1990-2000 vise à parachever cette logique de mobilisation maximale par la mise en place des derniers grands ouvrages. La mobilisation devait atteindre 90% pour les eaux de surface et 100% pour les eaux souterraines à l'aube de l'an 2000 (Horchani, 1995) ; elle est encouragée au niveau individuel par une incitation à l'intensification des prélèvements : le décret 95-793 permet aux exploitants agricoles, selon leur catégorie économique, de toucher jusqu'à 60% de subvention sur la construction et l'équipement de leur puits (à condition de ne pas être en zone de sauvegarde ou d'interdiction de nappe).

²⁵ 1956

²⁶ Voir Ennabli (1993) pour un inventaire descriptif des différents types d'ouvrages hydrauliques et hydro-agricoles modernes et traditionnels en Tunisie.

2.1.2. ...A une nécessaire maîtrise de la demande globale

Malgré cette intense mobilisation des ressources en eau, le bilan offre/demande devient de plus serré : l'Etat évalue les ressources actuellement exploitables à 2700-3100 millions de m³, alors que la demande potentielle en 1996 était d'environ 2500 millions de m³ et continue d'augmenter chaque année. Ce bilan global se traduit par des situations diversifiées selon les zones, du fait des répartitions hétérogènes de l'offre et de la demande. Dans ce cadre, les économies d'eau devront surtout être effectuées au niveau de l'agriculture : c'est le plus gros consommateur, il reste encore à approvisionner en eau potable les zones rurales non desservies, et les prélèvements du tourisme et de l'industrie risquent de s'accroître, du fait de l'importance stratégique de ces secteurs (Treyer, 1999).

La gestion de la demande en eau constitue donc un axe important dans la politique générale de l'eau et en particulier dans le secteur agricole (Khanfir *et al.*, 1998) ; elle s'appuie principalement sur l'économie de l'eau, la valorisation et la rationalisation des usages de l'eau d'irrigation. Au cours des dernières années, plusieurs études de grande envergure ont été menées dans le secteur de l'eau²⁷, qui envisagent notamment des changements du cadre légal et institutionnel de la gestion de l'eau, la mise en œuvre de nouveaux outils de gestion et la constitution de véritables "laboratoires de nappe", c'est-à-dire la mise en place d'expériences sur des terrains spécifiques. Citons en particulier le bilan effectué par Ennabli (1995) sur l'irrigation en Tunisie, qui répertorie les principaux problèmes rencontrés sur les périmètres irrigués, et les mesures à prendre, et de manière plus générale, l'ensemble des limites du secteur irrigué susceptibles de donner lieu à des mesures de gestion de la demande (manques à gagner sur les plans de l'efficacité de distribution de l'eau et de la gestion de l'irrigation, choix de cultures moins consommatrices, leçons à tirer des techniques traditionnelles d'irrigation...).

Dans les faits, le développement durable des ressources en eau en Tunisie repose sur une recherche de la maîtrise conjointe de l'offre et de la demande en eau essentiellement par :

- **la recherche de ressources "non conventionnelles"** (réutilisation des eaux usées, désalinisation de l'eau de mer) ;
- **une économie de l'eau dans tous les secteurs** également encouragée par des subventions sur le matériel de micro-irrigation et de distribution de l'eau à la parcelle (le décret 94-427 sur les encouragements subventionne les installations d'irrigation permettant l'économie d'eau à hauteur de 30%), et par une augmentation du tarif de l'eau visant à recouvrir au moins les frais de fonctionnement (cette mesure provient

²⁷ plans directeurs, étude économie de l'eau 2000 : stratégie de gestion de l'eau sur le plan national, étude du secteur de l'eau (Khanfir, 1998).

également du PASA²⁸ adopté par la Tunisie à l'incitation du FMI) et à réduire la consommation (tarif progressif par tranches pratiqué pour l'eau potable pour décourager les consommations excessives sans pénaliser les petits consommateurs).

Outre une tarification incitant à économiser l'eau, et un encouragement des techniques d'irrigation efficaces, Ennabli (*op. cit.*) suggère de renforcer les recherches sur le système eau-sol-plante afin de procéder au maximum d'économie au niveau de la plante, de favoriser les plantes valorisatrices et économisatrices, et d'opter préférentiellement pour des cultures pluviales pour finalement abandonner, sur le long terme, les cultures estivales au profit des cultures hivernales, hormis l'arboriculture, compte tenu de son importance patrimoniale. Concernant la gestion de la demande sur les nappes, cet auteur préconise déjà, à cette époque, la mise en place de groupements d'usagers à l'échelle de la ressource souterraine, à l'image des associations traditionnelles qui gèrent l'eau dans les oasis.

2.1.3. Le cadre institutionnel de la gestion de l'eau

Le Code des Eaux de 1975, toujours en vigueur, proclame notamment :

- la constitution et l'étendue d'un **Domaine Public Hydraulique inaliénable** et imprescriptible (incluant les nappes d'eau souterraines de toutes sortes) ;
- la transformation du droit de propriété de l'eau en **droit d'usage**, lesquels en théorie devraient donner lieu à une concession de l'Etat, de manière à respecter les priorités d'attribution et les modalités d'évolution des droits anciens ;
- sur les nappes, la **notion de périmètre de sauvegarde** lorsque "les conditions d'exploitation des ressources existantes risquent de mettre en danger la conservation quantitative et qualitative des eaux", zone où tout travail de recherche ou d'exploitation, à l'exclusion des modifications apportées aux ouvrages déjà existants, doit être soumis à autorisation ;
- la **notion de périmètre d'interdiction** lorsque "la conservation ou la qualité des eaux sont mises en danger par le degré d'exploitation des ressources existantes", zone où l'Etat soumet à autorisation toute modification apportée sur les ouvrages existants et peut limiter leur débit, voire supprimer des prélèvements nuisibles à la conservation des ressources.

La responsabilité de l'application de la loi sur l'eau est confiée au Ministère de l'Agriculture, également chargé du suivi de la ressource en eau et de sa gestion. Cette mission est répartie entre Directions Générales Techniques spécialisées :

²⁸ Plan d'Ajustement Structurel Agricole

- la **Direction Générale des Ressources en Eau** chargée de l'évaluation et du suivi de la ressource (DGRE) ;
- la **Direction Générale des Grands Travaux Hydrauliques** pour étudier, concevoir et gérer les grands barrages (DGETH) ;
- la **Direction Générale du Génie Rural** pour construire et gérer les infrastructures d'irrigation et les captages pour l'eau potable rurale (DGGR).

A ce dispositif viennent s'ajouter :

- la **SONEDE** (Société Nationale d'Exploitation et de Distribution de l'Eau), entreprise d'Etat à caractère économique et commercial, chargée du prélèvement, du transfert et de la distribution de l'eau potable en milieu urbain. La SONEDE s'occupe des communes de plus de 500 habitants, les autres étant prises en charge par la DGGR ;
- Les **Commissariats Régionaux de Développement Agricole** (CRDA), fondés dans les années 80 pour remplacer les Offices de Mise en Valeur (OMV)²⁹, institutions régionales responsables de l'encadrement agricole des Périmètres Publics Irrigués (PPI) qui distribuaient l'eau à des agriculteurs propriétaires de leur exploitation. Le rôle des CRDA prend de l'ampleur avec la loi de 1989 sur la décentralisation. Le Commissariat a désormais rang de Direction Générale et son espace de compétence concorde avec les gouvernorats, structures administratives régionales : il y a donc vingt-trois CRDA en Tunisie, tandis qu'auparavant, onze offices agissaient dans un cadre très centralisé. Le rapprochement vers les usagers est permis par des structures plus locales qui dépendent du CRDA et concordent de la même façon avec les découpages administratifs du gouvernorat³⁰. Les CRDA sont composés d'arrondissements représentant la plupart des Directions Générales nationales qui dépendent administrativement du Commissaire mais "thématiquement" de leur Direction d'origine. Seuls la DGETH et la SONEDE échappent en partie à cette tutelle régionale³¹. L'arrondissement des Ressources en Eau du CRDA est chargé de veiller au respect des règlements. Une police des eaux dresse des procès verbaux en cas d'infraction, transmis au commissaire pour être traitées devant une juridiction civile ;

²⁹ A partir des années 80, la réduction du coût budgétaire de la politique hydraulique est une préoccupation constante des Pouvoirs Publics. Le relèvement des taux de recouvrement est l'objectif principal assigné aux Offices assurant la gestion des Périmètres Publics Irrigués. Les difficultés rencontrées à ce niveau sont à l'origine de la suppression pure et simple des Offices eux-mêmes (1986), qui sont remplacés par des institutions locales (AIC) et régionales (CRDA) dont les attributions sont fixées ou repensées par des compléments au Code des Eaux en 1987.

- L'**Agence de Réforme Agraire**, qui a pour mission d'organiser la structure foncière des PPI pour favoriser la rentabilité des exploitations agricoles ;
- Et d'autres organismes para-étatiques qui encadrent le monde agricole comme l'**Office des Terres Domaniales**, les coopératives de service (approvisionnement en intrants), l'**Agence de Promotion des Investissements Agricoles** et les **Projets de Développement Rural** interviennent en collaboration ou par l'intermédiaire du CRDA pour assister ou financer le développement ;
- Enfin, le Code des Eaux a défini une structure interministérielle, le **Comité National de l'Eau**, chargée de trancher les conflits sur la répartition, mais en réalité cette institution ne serait pas vraiment opérationnelle (Faysse, 1998b).

Les structures institutionnelles mentionnées organisent leurs actions autour de quatre Plans Directeurs d'Aménagements des Eaux élaborés pour les régions extrême nord, nord, centre et sud, avec le concours des bureaux d'études nationaux et internationaux. Ces plans Directeurs se consacrent notamment à la mise en place de grands barrages et au transfert des eaux du nord vers les grandes régions utilisatrices (Pérennes, 1988).

Avec le Plan d'Ajustement Structurel appliqué à l'agriculture en 1986, l'Etat cherche à assainir son budget, à décentraliser certaines tâches et à améliorer la gestion locale. Dans cette optique, l'Etat met en place le cadre juridique de fonctionnement d'associations locales, les AIC ou GIC³², qui doivent se charger au quotidien du fonctionnement et de la maintenance des équipements de captage et de distribution de l'eau potable ou d'irrigation. Les AIC sont créées à l'initiative des usagers ou de l'administration et validées par le Ministère de l'Agriculture. Elles fonctionnent de manière relativement autonome, avec toutefois un certain contrôle de l'administration.

En résumé, le contexte institutionnel de la gestion de l'eau en Tunisie demeure assez centralisé malgré les réformes engagées. La Tunisie s'engage dans le contrôle et la gestion de la demande au moyen d'outils technico-économiques encadrés et soutenus par des mesures réglementaires et institutionnelles :

- l'augmentation du prix de l'eau : le prix de l'eau agricole a doublé entre 1989 et 1996 (de 30 à 60 millimes³³), et celui de l'eau potable est désormais calculé par tranches de

³⁰ Les Cellules Technique de Vulgarisation Agricole, CTV, à l'échelle de la délégation (subdivision administrative du gouvernorat) et les Cellules de Rayonnement Agricole à l'échelle du secteur (subdivision administrative de la délégation).

³¹ Ce qui est peut-être partiellement à l'origine d'un manque de concordance concernant la gestion des barrages.

³² Associations d'Intérêt Collectif, transformées en GIC, Groupement d'Intérêt Collectif depuis 1999 pour des raisons de souplesse associative.

³³ 1 millime équivaut à 1 Dinar / 1000, et 1 Dinar, approximativement à 1 Dollar en 1997.

consommation, les hôtels étant systématiquement facturés sur le tarif le plus fort, sans pénaliser pour autant les petits consommateurs ;

- des lois et des décrets pour inciter les agriculteurs à économiser l'eau, soutenus par l'encadrement de l'Agence de Promotion des Investissements Agricoles ;
- le renforcement du rôle des AIC (ou GIC).

Pour reprendre l'image d'Allan et Karshena évoquée en introduction de cette thèse (Allan, 1996), sur le plan national la Tunisie peut être située dans une phase de développement dont la tangente conduirait à un état de surexploitation. L'Etat met actuellement en place plusieurs outils de gestion de la demande (mais également de l'offre, avec l'interconnexion des barrages), visant à infléchir cette trajectoire sans trop brusquer le secteur agricole, du fait de la faible "capacité d'adaptation" de la société au sens de Turton (1999) .

2.2. La plaine de Kairouan : une nappe et un contexte agraire

Située au centre de la Tunisie (fig. 1), en zone semi-aride (pluviométrie moyenne de 300 mm), la nappe de Kairouan qui occupe la plaine du même nom, recueille les eaux de 3 bassins versants (le Zeroud, le Merguellil et le Nebhana) drainant la dorsale centrale tunisienne. Une carte de la nappe peut être consultée en annexe 1.a.

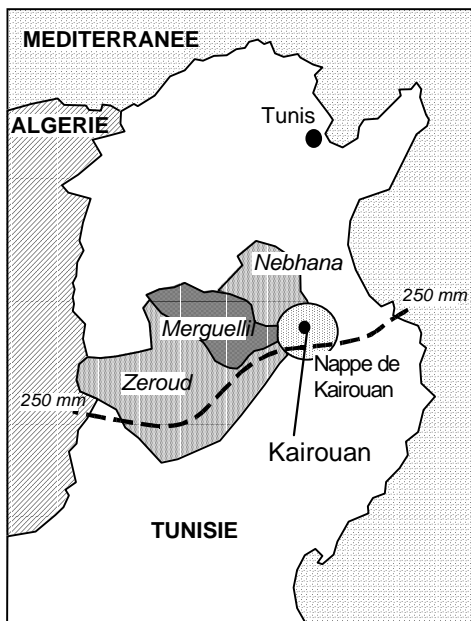


Fig. 1 : Situation de la nappe de Kairouan

Ce réservoir souterrain, un des plus importants du pays (Mansouri, 1996), connaît des rabattements continus depuis 20 ans environ (cf. annexe 1.e), ce qui n'empêche pas les usagers divers d'accroître leurs prélèvements. Alimentée principalement par deux barrages pour lesquels la recharge n'est pas l'objectif prioritaire, elle subit des prélèvements supérieurs aux apports naturels. Il s'agit surtout d'une multitude de puits privés, de forages alimentant des périmètres irrigués publics ou auto-gérés, et de forages d'eau potable. L'évolution des puits privés, plus gros usagers, est à la fois peu connue et non maîtrisée : l'eau n'est pas payante et la réglementation, unique moyen de contrôle, est largement dépassée.

Se pose donc la question des modes d'intervention susceptibles de pouvoir limiter la croissance des prélèvements sur la nappe de Kairouan.

Cette recherche porte sur un sous-système de la nappe de Kairouan, la zone alimentée par l'oued Merguellil, par ailleurs la plus exploitée. Une description de la nappe de Kairouan

dans son ensemble permet dans un premier temps de situer le système étudié dans son contexte.

2.2.1. La nappe de Kairouan

Les différentes institutions concernées par la nappe (en particulier la DGRE et le CRDA de Kairouan) ont accumulé depuis les années 1950 de nombreuses études de portées diverses sur la nappe, allant du projet de développement aux modèles, en passant par les cartes thématiques, sans compter les divers compte-rendus de forages. Mais la plupart reprennent la description structurelle de Castany (1947) complétée par Besbes en 1971, puis les conclusions du modèle de Besbes datant de 1975 en terme d'alimentation de la nappe. De plus, aucune synthèse de ces documents n'a été réellement effectuée depuis celles de Pantu (1973) et de Besbes et de Marsily (1976). Une analyse de ces divers documents a permis de confronter des informations sur les caractéristiques de la nappe.

2.2.1.1. Génèse et géométrie de la nappe de Kairouan

L'aquifère de Kairouan provient du comblement d'une cuvette d'effondrement d'environ 3000 km² par des sédiments détritiques du Plio-Quaternaire (Castany, *op. cit.*). L'alternance des dépôts de marnes et de sables plus ou moins grossiers sur une épaisseur de plus de 500 m, due à des écoulements souvent torrentiels et violents, a donné lieu à des structures lenticulaires, surtout en profondeur, l'aquifère superficiel étant plus continu (Besbes et de Marsily, *op. cit.*). Au niveau de Kairouan, 7 horizons productifs séparés par des couches semi-perméables ont été dénombrés sur un forage de 260 mètres de profondeur, témoignant de cette structure discontinue. S'il est délicat de distinguer deux niveaux aquifères séparés au débouché de l'oued Merguellil, l'analyse des coupes lithologiques et des corrélations électriques, ainsi que la piézométrie montrent en revanche une nette séparation à l'est et au nord de Kairouan entre un "niveau superficiel" et un "niveau profond", par une couche semi-perméable ponctuée de lentilles perméables³⁴ (Besbes, 1971). Cette séparation nette est également confirmée par la présence de forages artésiens au nord de Kairouan, qui témoignent de la mise en charge des niveaux profonds.

Au-delà du débat sur la représentation monocouche ou multicouche de la nappe qui partage certains chercheurs, la gestion de la nappe souffre d'une double imprécision terminologique :

- officiellement les puits sont censés ne capter que les horizons phréatiques, ne pas

³⁴ Dans la zone amont de la nappe (à l'ouest de kairouan), la différence de charge entre les deux niveaux est inférieure à 5 m ; par contre elle dépasse 10 m au nord de Kairouan (Besbes et de Marsily, 1976).

dépasser 50 mètres de profondeur, et se distinguer nettement des forages sur le plan technique. Ils sont en réalité prolongés par des forages manuels, atteignant parfois les 100 m de profondeur ;

- la différence entre nappe phréatique et nappe profonde n'est pas la même selon la définition de référence : en deçà ou au-delà de 50 m de profondeur selon la législation tunisienne, vers la surface ou en profondeur selon l'administration, et à surface libre ou en charge pour les scientifiques. D'ailleurs, une unique entité hydraulique peut couvrir ces différentes situations.

Du fait de son étendue, de son épaisseur et de sa porosité, la capacité de stockage du réservoir de Kairouan est très importante : 60 milliards de mètres cubes, si on suppose une épaisseur moyenne aquifère de 200 mètres, en tenant compte de l'épaisseur moyenne des lentilles, et une porosité moyenne de 10%.

2.2.1.2. Apports et sorties de la nappe

a. Apports et exutoires

La nappe de Kairouan est alimentée par plusieurs oueds à l'ouest et s'écoule vers l'est. Deux grands oueds débouchent sur la nappe, le Merguellil et le Zeroud, et accessoirement le Nebhana et quelques oueds mineurs comme le Cherichira. En dehors de crues exceptionnelles (telle que celle survenue en 1969), l'eau de ces oueds ne s'écoule pas jusqu'à la mer mais au niveau des *sebkhet*³⁵ Kelbia et Sidi El Hani, lacs salés constituant de vastes surfaces d'évaporation, situées en aval de la nappe (cf. annexe 1.a) : la plaine de Kairouan est un bassin endoréique. Les oueds s'infiltrent partiellement dans la nappe, surtout en son amont, par des couches affleurantes qui vont rapidement en profondeur et alimentent les couches superficielles par drainage ascendant. L'infiltration par les couches superficielles a lieu sur toute la surface de la nappe, sous réserve d'une bonne perméabilité du sol et d'une quantité d'eau suffisante. La nappe, subaffleurante en son aval, subit également une reprise directe par évaporation, et s'écoule également dans les *sebkhet*.

Besbes et de Marsily (1976) ont déterminé les apports à la nappe avant la mise en eau du barrage, à partir d'un modèle de simulation (brièvement décrit par la suite), calé sur l'état observé en janvier 1969. Les apports annuels de bases sont de 6 millions de mètres cube (Mm^3) par le Zeroud, de $6,6 Mm^3$ par le Merguellil, y compris l'apport souterrain de $3,6 Mm^3$ dû à une connexion avec la nappe d'Aïn Beidha, au niveau du bassin du Merguellil. Si les infiltrations directes de la pluie sont négligeables, du fait de l'épaisseur de la couche de sol à

³⁵ Les *sebkhet*, lacs salés, sont le pluriel de *sebkha*.

traverser, de sa faible perméabilité et de la forte reprise évaporative, les pluies de ruissellement aux piedmonts des reliefs, concentrées par une multitude de ravins, contribuent pour une part relativement importante à l'alimentation de la nappe (estimés à 10 Mm³/an par la même méthode que précédemment) (Besbes et de Marsily, *op. cit.*). De la même manière³⁶, les apports moyens des crues sont estimés à 22 Mm³/an pour le Zeroud, et à 12,2 Mm³/an pour le Merguellil.

La configuration des apports à la nappe a été bouleversée par les grands aménagements planifiés par le Plan Directeur des Eaux du Centre : le barrage Sidi Sâad a été fermé en 1982 pour retenir les eaux du Zeroud, et celui d'El Haouareb, en 1989, à l'embouchure de l'oued Merguellil. Ces barrages, construits en premier lieu pour emmagasiner des crues très importantes en vue de protéger la ville de Kairouan des inondations (Pantu, 1973), sont également censés améliorer l'infiltration des oueds dans la nappe (notamment grâce à l'utilisation de conduites pour l'oued Zeroud). En fait, aucun vrai lâcher n'a été effectué du barrage El Haouareb depuis sa mise en eau, et des lâchers n'ont lieu à Sidi Sâad que depuis 1988, du fait d'une longue période de sécheresse entre 1982 et 1988.

La vocation première d'El Haouareb est de protéger la ville de Kairouan et sa plaine contre les crues exceptionnelles ; il doit ensuite pouvoir alimenter directement le PPI d'El Haouareb ; puis il doit être utilisé pour la recharge de la nappe de Kairouan.

D'autre part, la construction de l'évacuateur de crue du barrage El Haouareb aurait facilité l'exurgence de la nappe d'Aïn Beidha, et provoqué sa vidange superficielle en aval du barrage, proportionnellement à la charge du barrage. Cette source d'eau est appelée "l'émergence". Son débit serait d'environ 400 l.s⁻¹³⁷. Cette émergence s'étend sur 6 kilomètres dans le lit de l'oued en aval du barrage, pour s'infiltrer peu à peu dans le sol. Cette émergence fait l'objet de captages privés, dont le contrôle est difficile.

³⁶ A prélèvements constants, la stationnarité du système modélisé est assurée par ces apports.

³⁷ Ce débit a été mesuré par le CRDA. Cependant, s'agit-il d'une moyenne ou d'un débit ponctuel ? Une moyenne de 400 l/s correspondrait à un volume annuel 12,6 millions de mètres cube, ce qui paraît peu cohérent si le sous-écoulement, également issu de la nappe d'Aïn beidha n'apporte que 4 millions de mètres cube par an

Ces captages "sauvages", dont le nombre était estimé à 70 environ en 1997, ont donné lieu à l'organisation spontanée de règles de gestion entre les usagers, du fait du déséquilibre ressource/usages, ce qui démontre la capacité des agriculteurs de Kairouan à gérer une ressource collectivement, dès lors qu'ils y trouvent un intérêt commun. L'histoire de la région comporte également des cas de gestion collective, avec l'existence, bien avant la mise en eau des barrages, de syndicats d'inondation utilisant les eaux des crues grâce à des ouvrages de déviation, surtout vers le centre de la plaine.

b. Qui sont les usagers de la nappe ?

A l'heure actuelle, on recense sur la nappe de Kairouan les usagers suivants :

- **les "producteurs" d'eau potable** avec la SONEDE, acteur prépondérant dont une partie de la production est destinée à alimenter les villes touristiques de la côte tunisienne³⁸ et les forages du Génie Rural qui approvisionnent en eau les villages non desservis par la SONEDE ;
- **les périmètres collectifs irrigués** gérés par le CRDA ou en GIC, qui sont alimentés par des forages collectifs prélevant dans les couches profondes ;
- **les irriguants privés**, qui prélèvent l'eau dans la nappe phréatique par des puits ;
- enfin, **les entreprises**, peu nombreuses et situées aux environs de Kairouan.

Le nombre de puits a connu une forte augmentation au cours des années 1960-70³⁹, grâce aux incitations de l'Etat⁴⁰ et à l'introduction des motopompes centrifuges qui viennent remplacer le dalou traditionnel ; cette tendance à l'augmentation s'est poursuivie jusqu'à aujourd'hui, comme le montre la figure 2a⁴¹. L'irrigation publique connaît également une extension notable dans les années 1960, avec la création de nombreux PPI sur forages, gérés d'abord par l'OMIVAK⁴², ensuite par le CRDA, puis en AIC de plus en plus. La figure 2b donne la part de l'irrigation dans les prélèvements par forage, surtout attribuée aux PPI. Forages et puits confondus, l'irrigation consommerait environ 80% des prélèvements de la nappe de Kairouan (plus de 40 Mm³ en 1996).

³⁸ Il est question actuellement d'approvisionner la côte tunisienne en eau potable à partir de l'eau de la Medjerdah

³⁹ Il est probable cependant que la crue dévastatrice de 1969 ait remblayé un grand nombre de puits...

⁴⁰ subventions à la construction des puits

⁴¹ Source : annuaires des nappes phréatiques, DGRE.

⁴² Office de Mise en Valeur de Kairouan.

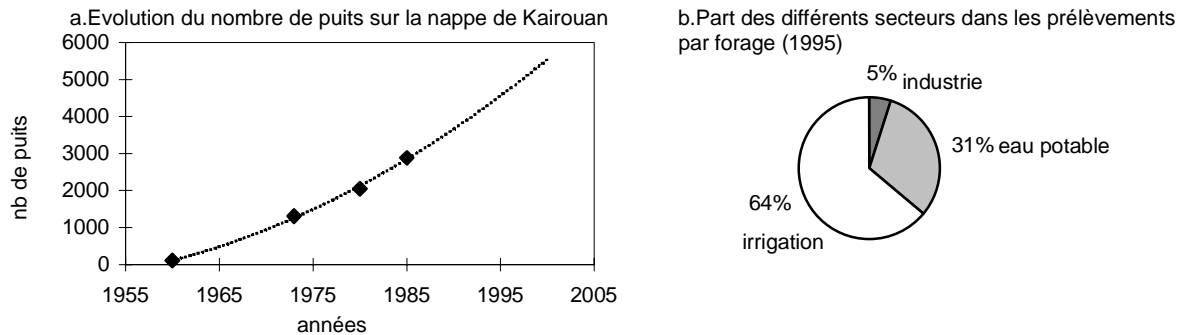


Fig. 2 : Les usagers de la nappe de Kairouan, en chiffres

Les forages sont bien identifiés contrairement aux puits de surface, dont le dernier inventaire exhaustif remonte à 1985. Depuis, les prélèvements privés sont estimés seulement sur la base des demandes de subvention⁴³, et d'un débit fictif continu par unité, pompé à partir de la "nappe phréatique" (simplification peu réaliste). D'après ces chiffres, les puits auraient prélevé 27,5 Mm³ en 1995, contre 25,8 Mm³ pour la totalité des forages⁴⁴.

La plaine de Kairouan comprend environ 20 000 hectares de Périmètres Publics, dont 9500 à partir de forages. La plupart des PPI sont assez anciens et les défaillances de l'infrastructure hydro-agricole entraînent une mauvaise efficacité de la distribution qui se traduit notamment par le mécontentement des agriculteurs - surtout lorsqu'ils sont situés en aval des réseaux - et la construction de puits à l'intérieur des PPI⁴⁵.

⁴³ Alors que plus aucune subvention n'est officiellement attribuée pour la construction des puits sur la plus grande partie de la nappe, depuis 1991...

⁴⁴ Annuaire d'exploitation de la DGRE.

⁴⁵ Cependant, l'Etat a entrepris un vaste programme de réhabilitation des périmètres publics les plus anciens avant de les transformer en GIC, avec le soutien des bailleurs de fonds internationaux.

2.2.1.3. Un bilan discuté

Finalement, les divers bilans effectués sur la nappe de Kairouan donnent des résultats très différents. La figure 3 montre ainsi plusieurs bilans donnés par la littérature, 1995 : le rapport de Mansouri (1996) donne deux bilans différents estimés par la SONEDE (2) et (3) et rapporte le bilan de la DGRE (1).

Ces bilans ont été comparés à deux autres estimations : l'une calée sur les prélèvements donnés par la DGRE et sur les apports estimés par Nazoumou d'après le modèle de nappe⁴⁶ (4), et l'autre basée sur les mêmes apports, les prélèvements étant augmentés à hauteur du décalage constaté entre les données estimées dans cette étude et celles de Nazoumou (5).

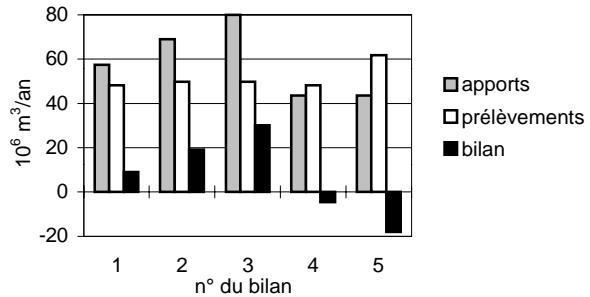


Fig. 3 : Comparaison de plusieurs bilans volumétriques réalisés sur la nappe de Kairouan pour l'année 1995

Les écarts constatés proviennent de différentes estimations :

- **des apports** : le deuxième bilan de la SONEDE est fondé sur des apports supérieurs de 30% à ceux estimés par Nazoumou ; cet écart vaut pour tous les termes de l'apport, la SONEDE défendant également l'hypothèse d'un apport souterrain non reconnu par les autres études⁴⁷ ;
- **des prélèvements privés** : tous les bilans sauf celui fondés sur mes enquêtes, reposent sur les estimations de la DGRE.

De plus, dans certains cas, les termes de ce bilan reposent à la fois sur les données d'une année précise (les prélèvements des forages en 1995, par exemple), sur des données moyennes ou estimées (les prélèvements des puits, les écoulements souterrains moyens), et parfois sur des données projetées (c'est le cas des bilans de la SONEDE, pour les apports des oueds *via* les barrages). Enfin, ces divers bilans ne tiennent pas compte des pertes à l'exutoire, comme si celles-ci disparaissaient avec l'augmentation des prélèvements, ou pouvaient être intégralement récupérées par des prélèvements supplémentaires (Hamza, 1988). En réalité les *sebkhet* continuent d'être en eau malgré le rabattement de la nappe, car leur niveau continue de marquer une différence de charge avec la nappe. Sur la base de son modèle de la nappe, Besbes a évalué ces écoulements à environ 16,5 Mm³/an dans les années 1970.

Les écarts entre bilans annoncés sont gênants dans la mesure où ils conduisent dans certains cas à une vision excédentaire du bilan pouvant amener les gestionnaires à vouloir intensifier encore les prélèvements, et dans d'autres cas à une vision au contraire déficitaire, qui justifierait une politique de restriction des prélèvements. L'application du principe de précaution, dans ce climat d'incertitude, conduirait à ne pas se baser sur les bilans les plus optimistes, d'autant plus que l'abaissement continu de la nappe confirme une surexploitation globale.

2.2.1.4. L'eau de la nappe est-elle de bonne qualité ?

Les données au sujet de la salinité de la nappe de Kairouan ont été tirées de l'étude de Besbes et de Marsily (1976)⁴⁸. La zone du Merguellil est caractérisée par une eau relativement douce (résidu sec $< 1,5 \text{ g.l}^{-1}$; contre $1,5$ à 3 g.l^{-1} dans la zone du Zeroud) en surface et en profondeur, qui va se salinisant vers l'aval. Le gradient de salinité est plus accentué en surface qu'en profondeur (1 à plus de 7 g.l^{-1} contre $1,5$ à 3 g.l^{-1}), ce qui corroborerait pour certains l'hypothèse de deux aquifères séparés et peu communicants à l'aval (gradient vertical de salinité élevé induit par une séparation très peu perméable). On trouve une "poche de salinité" de 3 à 4 g.l^{-1} au pied du Drâa Affane, qui serait due à l'infiltration de l'eau de ruissellement des piedmonts gypseux. Les captages de la SONEDE constituent également un indicateur de faible salinité, du moins pour les niveaux qu'ils captent.

2.2.1.5. Le suivi de la nappe

Un réseau de 36 piézomètres de profondeurs différentes⁴⁹ (cf. annexe 1.a) et de 20 puits de mesure (dont 14 sont seulement des puits de surveillance exceptionnelle de recharge) a été progressivement mis en place⁵⁰, surtout le long des oueds Merguellil et Zeroud (Béboulé, 1996). Certains sont relevés mensuellement alors que d'autres sont équipés de limnigraphes. Une multitude de cartes isopièzes ou de cartes d'abaissement témoignent de l'important suivi quantitatif dont la nappe de Kairouan fait l'objet.

Le suivi qualitatif de la nappe n'est pas aussi assidu, malgré une mise en garde ancienne

⁴⁶ Source : communication personnelle, juin 2000

⁴⁷ Celui de la nappe de Sebkhet El Behira (Mansouri, 1996).

⁴⁸ Il existe plusieurs cartes d'isosalinité de la nappe, de dates différentes, pour la plupart issues d'études du CRDA, mais elles n'indiquent pas les points ni les conditions des mesures effectuées.

⁴⁹ Un piézomètre est un puits ou un forage installé pour mesurer le niveau piézométrique, c'est-à-dire la charge statique d'une nappe en un point donné. L'eau s'élève dans le piézomètre jusqu'à équilibrer la pression atmosphérique. Le CRDA dénombre 22 pour "la nappe profonde" et 14 pour "la nappe phréatique".

⁵⁰ En dehors de cet équipement en fonctionnement actuellement, 39 piézomètres et 19 puits de surface sont devenus hors service.

sur les risques de salinisation par inversion des flux près des *sebkhet* (Besbes, 1975) :

- les inventaires des puits de 1973 et 1984 donnent une mesure par puits du résidu sec (le dernier en date est donc de 1984) ;
- chaque ouverture de forage donne lieu à une mesure de résidu sec, et certains forages donnent lieu à des mesures irrégulières dont les résultats ne font pas l'objet d'analyses comparatives ;
- la SONEDE surveille régulièrement la qualité de son eau mais ces données ne sont pas intégrées à celles du CRDA et se limitent à quelques points et niveaux de profondeur ;
- il existe des cartes ponctuelles, parfois sur des zones restreintes, mais à part celles de la SONEDE, elles se contentent d'afficher les courbes d'iso-salinité établies sans préciser les données aux points de mesure, ce qui ne permet pas de juger de leur fiabilité ; de plus ces cartes ne sont pas établies régulièrement, se contredisent parfois sur l'évolution de la salinité, et n'ont donné lieu à aucune synthèse.

Finalement si les diverses études sur la nappe laissent penser à une salinisation des eaux, les données actuelles ne permettent pas de conclure sur ce point⁵¹.

2.2.1.6. Les modèles de fonctionnement de la nappe

La première tentative de modélisation correspond à la construction d'un modèle analogique (réseau RC) sur une partie de la nappe de Kairouan, pour étudier l'influence réciproque des captages et l'alimentation artificielle de la nappe (Billib, 1971).

Mais c'est le modèle de Besbes (1975) qui fait référence sur la nappe de Kairouan. Son programme de calcul repose sur une représentation discrétisée de la totalité de la nappe (2165 mailles de 1 à 4 km², dont 1779 mailles de calcul), constituée de deux couches ("nappe phréatique" et "nappe profonde") communiquant entre elles. Les débits aux limites sont nuls et les potentiels aux limites sont fixés, et une couche fictive permet de représenter le lit des oueds et les *sebkhet*. Ce modèle est calé en régime permanent, en référence à l'état observé en janvier 1969 : une fois définies les conditions aux limites, le calage s'effectue par ajustements successifs des transmissivités et des flux, de manière à restituer par le calcul la piézométrie de référence. Un calage en régime transitoire a ensuite été effectué en référence à la perturbation de la nappe consécutive aux crues exceptionnelles

⁵¹ Chaieb (1988), qui tente de faire un bilan de la dégradation qualitative des eaux de la nappe en comparant plusieurs cartes de salinité établies à des époques différentes, note que les points d'observation pris en considération pour tracer les cartes ne sont pas tout à fait les mêmes, ce qui induit un biais dans la comparaison.

de l'automne 1969. Ce modèle, de pas de temps mensuel, est utilisé pour estimer l'alimentation de la nappe par les crues, pour simuler des scénarios d'évolution tels qu'une exploitation constamment excédentaire ou la gestion des barrages pour l'alimentation des nappes. Le modèle de Besbes été réactualisé par Chaieb (1988). Par ailleurs la modélisation des apports a été étudiée par Nazoumou (1996), qui actuellement réunit les modèles d'apport et de fonctionnement de la nappe au sein d'un unique modèle.

2.2.1.7. *Un historique des prélèvements... Et des profondeurs*

Dès les années 1970, un développement important des captages est constaté (notamment l'apparition d'un grand nombre de puits entre 1960 et 1970), faisant craindre une surexploitation. A l'époque, Billib (1971) estime déjà qu'en moyenne les volumes pompés dépassent les apports. Pourtant, à la même époque, le projet tuniso-canadien recommande une augmentation de l'exploitation, et conseille même aux usagers de forer leur puits pour atteindre des couches plus profondes (Pantu, 1973). Les premiers "puits forés" par des "sondages manuels" (ou "forages à bras") sont signalés et décrits sur le plan technique à la fin des années 1970 (Hamza, 1977).

L'opération du "forage à bras" commence par un faux-puits, approfondi par un enfoncement ("au mouton" à la masse ou au marteau pneumatique), des éléments de tube plein étant rajoutés au fur et à mesure sur la crépine, en introduisant de l'eau dans le tube et autour pour faciliter l'avancement (Hamza, *op. cit.*).

Le constat de la "prolifération alarmante" des puits et d'une surexploitation de la nappe date du début des années 1980 (Bahi *et al.*, 1981). Le développement important des puits est attribué dans les différents rapports au processus d'héritage⁵², aux incitations financières de l'Etat, ou à l'électrification des puits qui entraîne un pompage trop brusque... L'inventaire de 1984 évoque "*l'extravagante multiplication des puits de surface dans la quasi-totalité des imadas*⁵³". La prolifération des puits se poursuit et la surexploitation de la nappe est accentuée à la fin des années 1980 par la fermeture des barrages, d'après Kallali (1989), qui note un "*décrochement des niveaux piézométriques depuis 1977 même lors des années humides*". Le CRDA rapporte l'assèchement de nombreux puits (dont la plupart continuent d'être exploités grâce à la technique du "forage à bras"), et constate une légère dégradation de la qualité de l'eau (sans précision quantitative ni spatiale).

⁵²En effet les héritiers reçoivent chacun une part de chaque parcelle afin de distribuer les chances équitablement, ce qui entraîne le morcellement des parcelles.

⁵³ *L'imada* est le terme arabe pour secteur, et désigne le plus petit découpage administratif en Tunisie.

La simulation de scénarios de gestion des deux grands barrages avec le modèle de Besbes conduit la DGRE à préciser la manière dont doivent être effectués les lâchers du barrage El Haouareb tout en déclarant que ces lâchers n'empêcheraient pas la baisse continue des niveaux piézométriques, du fait de la forte exploitation (Chaieb, 1990).

Ces constats aboutissent finalement à la mise en place d'un périmètre de sauvegarde, proposé à plusieurs reprises (Kallali et Gharbi, 1986 ; Kallali, 1989), puis déclaré en 1991 (décret n° 91-1167). Cette mesure soumet en principe tout travail sur les captages existants, et tout projet de construction d'un captage, à une demande d'autorisation sous peine d'amende, et ne permet pas les demandes d'indemnité. Mais ce périmètre ne couvre pas la totalité de la nappe. De plus, les chiffres officiels, confirmés par les données de terrain, montrent que ce décret n'a pas empêché la prolifération des captages : si, d'après les chiffres annoncés, le rythme d'apparition des puits a diminué de deux tiers sur la période 1990-95 par rapport à la période 1985-90, il reste conséquent, et dans le même temps, celui des forages a doublé. Officiellement, aucune subvention n'est plus accordée sur la construction des puits, ce qui a peut-être contribué au ralentissement des constructions.

Malgré les recommandations de la DGRE (Chaieb, 1990), un seul lâcher - expérimental - a été effectué à partir du barrage El Haouareb, en 1993, pour effectuer une campagne de mesure (il semble que les gestionnaires du barrage soient réticents à vider le barrage, pour ne pas risquer une pénurie d'alimentation du PPI El Haouareb).

Parallèlement à la réduction des apports du Merguellil, l'exploitation de la nappe continue de progresser, comme le montre la figure 4.

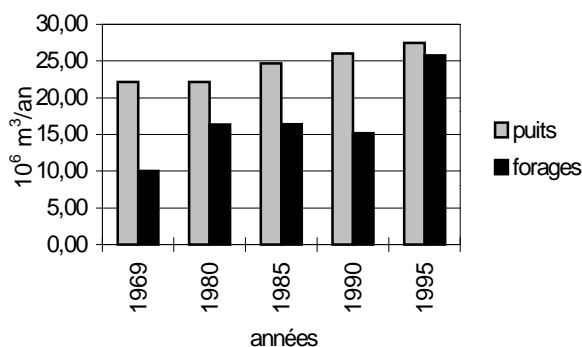


Fig. 4 : Evolution de l'exploitation de la nappe de Kairouan. Source : DGRE.

Selon ce diagramme, les ressources renouvelables de la nappe phréatique, évaluées à 26 Mm³ par an, seraient déjà complètement exploitées par les prélèvements des puits de 1995. Or les enquêtes menées dans ce travail conduisent à penser que l'effectif officiel des puits est sous-estimé (jusqu'à 30% par rapport à la réalité).

Quoi qu'il en soit un constat s'impose : les niveaux piézométriques relevés depuis plusieurs années et calculés sur des pas de temps pluriannuels (moyennes mobiles de 5 ans) s'abaissent régulièrement, avant et après la construction des barrages. Localisées au début, généralisées depuis les années 1980, ces baisses varient entre 0,5 et 3 mètres par an.

Ces chiffres sont peu alarmants dans l'absolu au vu de la capacité de la nappe, mais ils ont

déjà entraîné l'assèchement de la quasi-totalité des puits et leur approfondissement systématique par des forages à bras, provoquant un surcoût économique pour l'exploitant. Cet abaissement entraîne également un problème de viabilité des divers aménagements de captage et de distribution, ainsi qu'un risque de dégradation de la qualité de l'eau. S'ils constatent également un abaissement (0,3 m/an sur l'ensemble des secteurs El Grine et El Gountass) et une légère dégradation de la qualité de l'eau (gradient interannuel de salinité de 10 mg.l⁻¹) au niveau des forages qu'ils exploitent, les ingénieurs de la SONEDE estiment que cette dégradation "*n'est pas significative*" et que la nappe "*peut supporter une augmentation de prélèvement sans que son régime en soit perturbé*" (Mansouri, 1995).

2.2.1.8. Les perspectives d'évolution de la nappe

Besbes prévoyait avec son modèle qu'une exploitation de la nappe profonde de 23,5 Mm³/an produirait un rabattement d'environ 5 m dans la zone du Merguellil au bout de 20 ans. Vingt ans après, malgré le fait que l'exploitation des nappes profondes a à peine dépassé les 20 Mm³ depuis les années 1990, le rabattement provoqué a été de plus de 10 m dans la zone du Merguellil, c'est à dire deux fois plus que prévu... Depuis la mise à jour du modèle par Chaïeb, la DGRE a simulé plusieurs scénarios combinant la fermeture des deux grands barrages. Dans le cas de figure le plus optimiste pour la nappe (lâchers normaux des deux barrages), la zone en aval du Merguellil continue de s'abaisser, alors que pour tous les scénarios, l'exploitation de la nappe est maintenue constante et égale à celle de 1985, ce qui indique qu'une gestion par l'offre est insuffisante pour enrayer l'abaissement de la nappe : "*Malgré une recharge intensive, la surexploitation et le déficit d'alimentation par le lit de Merguellil, sont à l'origine d'abaissements prévisionnels relativement forts soulignés par le modèle*" (Chaïeb, 1990). Cependant, la comparaison des abaissements calculés et des observations données par le réseau piézométrique indique que le modèle est fiable dans certaines conditions seulement⁵⁴. La gestion du système ne peut donc reposer sur l'espoir d'un futur lâcher du barrage El Haouareb, d'autant que de multiples aménagements de conservation des eaux et du sol (banquettes, tabias), des lacs et des barrages collinaires ont été mis en place entre 1960 et 1990 sur le bassin du Merguellil en amont du barrage, réduisant sans doute beaucoup le coefficient de ruissellement total du bassin.

⁵⁴ Cette comparaison est effectuée dans le cas de la fermeture de l'oued Sidi Saâd, l'oued Merguellil continuant de s'écouler ; la relative fiabilité des résultats (écarts moyens de 1 à 1,2 m entre les calculs et les mesures) ne permet pas de juger de la fiabilité du modèle dans d'autres scénarios...

Sur le plan qualitatif, Besbes prévoit une contamination des nappes profondes par l'aval, et signale la faible tolérance d'accroissement du résidu sec (Besbes, 1975). Ce risque de salinisation peut amplifier un risque de dégradation des sols *via* l'irrigation : la texture fine des sols de certaines zones (par exemple au niveau des périmètres irrigués de la zone du Merguellil), combinée à une irrigation par une eau saumâtre, peut entraîner des phénomènes de gonflement-retrait conduisant à une perte de perméabilité, une réduction de la porosité, une asphyxie des sols... (Bahri, 1982). Dès le début des années 80, Bahri met déjà la salinité des sols de la région de Bled Abida sur le compte d'une irrigation avec l'eau d'une nappe contaminée par des eaux plus concentrées, et évoque la possibilité d'une salinisation des sols de la plaine. Malgré ces risques, le suivi de la qualité, insuffisant, ne permet pas de conclure. D'autre part, diverses sources de pollution pourraient induire une contamination de la nappe (puits motorisés, rejets de la ville de Kairouan, stations essence mal isolées) mais ce sujet n'a pas encore été étudié, malgré le fait que la nappe est une source d'eau potable (non traitée dans le cas de l'alimentation des communes rurales). Par contre, la pollution diffuse est sans doute peu importante à l'heure actuelle, étant donné le faible niveau d'utilisation des engrais par les agriculteurs.

Le rabattement général de la nappe induit un autre risque d'impact, complètement négligé, sur le riche écosystème des *sebkhet*. En effet, dans la *sebkha* Kelbia, l'eau douce provenant des apports de la nappe et des pluies favorise le développement d'une végétation aquatique et riveraine, ainsi que l'installation d'oiseaux nicheurs⁵⁵. Poissons, batraciens et tortues, issus des trois oueds alimentant le plan d'eau, le fréquentent également. Leur existence serait cependant menacée par l'assèchement possible des *sebkhet*, suite à l'abaissement du niveau piézométrique de la nappe.

2.2.2. Principales caractéristiques du système agraire kairouanais

La plaine de Kairouan constitue un espace relativement homogène sur les plans physique et humain, et un milieu historiquement constitué, ce qui permet de parler de "système agraire", selon les diverses définitions rapportées par Campagne (1994). La bibliographie au sujet des caractéristiques de ce système agraire est plutôt rare, mais a néanmoins permis d'en retirer les grands traits suivants.

⁵⁵ La *sebkha* Kelbia constituerait en particulier le principal lieu d'hivernage des grues cendrées en Tunisie (Guide Gallimard de Tunisie, 1995).

2.2.2.1. Un contexte physique difficile

Le climat de cette plaine est particulièrement rude : Kairouan est l'une des stations météorologiques les plus chaudes de Tunisie en été. Le Sirocco, vent chaud et sec du Sud et Sud Ouest, y souffle en moyenne 20 jours par an et fait monter la température à plus de 40°C. Les vents prédominants durant l'année proviennent du Nord et du Nord Ouest, mais arrivent déchargés de leur humidité et soufflent avec violence, provoquant une érosion éolienne importante. L'humidité relative est faible, entraînant une évapotranspiration excessive, de 4 à 5 fois le total pluviométrique.

Mais l'agriculture du Kairouanais dépend surtout des caprices de la pluie. Très faibles dans l'ensemble (inférieures à 300 mm), les précipitations sont irrégulières (variabilité extrême tant interannuelle qu'intersaisonnière), et peuvent arriver sous la forme d'averses diluviennes, provoquant alors des crues dévastatrices, susceptibles d'emporter troupeaux et semences sur leur passage et d'obliger à une interruption de la circulation terrestre pendant plusieurs jours (comme ce fut le cas en 1969). A l'opposé, les années sèches réduisent à néant les emblavures non irriguées et peuvent provoquer des hécatombes dans les troupeaux (limitées par le recours à des réserves fourragères mises en place par l'Etat en cas de sécheresse). D'une année à l'autre, les écarts des précipitation peuvent aller de 150 à 1000 mm, et toute saison peut être soit très pluvieuse soit totalement sèche. Un régime de précipitations suffisantes (400 à 450 mm) et bien réparties entre les trois saisons cruciales, arrive tous les 5 ou 7 ans et peut être considéré comme exceptionnel.

Liés à l'hydrographie, les sols étaient susceptibles de changer après une grosse crue. Dans l'ensemble, les dépôts sont grossiers à l'embouchure des oueds, favorables à l'arboriculture, plus lourds vers le centre (argileux), adaptés alors aux cultures de céréales. Les sols sont peu évolués et non salés dans la zone amont de la plaine (à texture limono-sableuse), faiblement salés en surface dans les zones médianes (à texture limono-sableuse ou limono-argileuse, à argileuse), et de plus en plus salés vers l'aval de la plaine, à l'approche des *sebkhet* (texture limono-argileuse à argileuse) (Bahri, *op. cit.*). La salinité des sols de la zone intermédiaire et des zones aval s'explique selon les cas par :

- la présence de reliefs constituant des sources de sel (le gypse du Draâ Affane par exemple) ;
- la présence d'une croûte calcaire en profondeur qui s'oppose au drainage vertical ;
- la nappe subaffleurante à l'aval de la plaine ;
- l'irrigation avec des eaux saumâtres.

2.2.2.2. Quelques mots sur l'histoire du système

Avant l'arrivée de l'irrigation dans les années 1950, la plaine était une vaste steppe pastorale habitée par les tribus Zlass, pasteurs nomades et semi-nomades. Les immensités steppiques de la plaine étaient parcourues d'ovins, de caprins et de dromadaires, et très partiellement emblavées en blé dur. L'eau des oueds était peu utilisée du fait de la violence des crues ; toutefois des ouvrages de déviation étaient construits manuellement pour diriger les inondations vers des champs de céréales ou d'arbustes, surtout au centre de la plaine.

La sédentarisation des bédouins a donné lieu à un habitat dispersé, en petits hameaux familiaux, les *douars*, ressemblant plus à des campements en dur qu'à des villages (pas d'organisation communale...), avec comme unique vraie ville Kairouan. Plus récemment sont apparues des petites villes ou villages comme Chébika et Sidi Ali Ben Salem.

L'irrigation est apparue dès l'indépendance avec des aménagements de l'Etat (les périmètres publics irrigués) et à la construction de puits, encouragée par des subventions publiques et par l'usage des motopompes.

Pendant le protectorat et après l'indépendance, les quelques terres collectives de la zone ont été privatisées ou confiées à la gestion de l'administration, cependant la plupart des agriculteurs ne disposent pas encore de titres fonciers.

Dans les années 1970, l'Etat tunisien a tenté de mettre en place des coopératives de production agricole pour rassembler les faibles moyens de production des petits exploitants, mais cette tentative, très mal acceptée par le monde rural, a vite avorté.

Avant la mise en eau des barrages, le climat capricieux et violent de la région n'encourageait pas à l'investissement et était à l'origine d'un exode rural non négligeable (également motivé par la période de collectivisation en 1969) (Trabelsi, 1976); en 1980, on parle de "sous-développement" à propos de la plaine de Kairouan, du fait de la pauvreté des infrastructures, de l'analphabétisme, du niveau de vie : la steppe traverse une "crise" liée à l'exode rurale, que l'extension du secteur irrigué par puisage vient freiner, par l'amélioration des conditions de vie... Mais la question de la viabilité de ce recours massif à la nappe est déjà posé (El Amami, 1987). A cette époque l'agriculture des steppes est encore majoritairement une agriculture de subsistance produisant surtout des céréales, des fèves, du piment et des olives.

Les infrastructures et les systèmes de cultures ont été bouleversés dans les années 1970-80 avec des programmes d'aide (Programmes de Développement Régional), qui ont permis la construction de routes, l'électrification de villages, et l'introduction massive de l'arboriculture (Trabelsi, 1979). Le développement du secteur irrigué est considéré comme le

fait le plus saillant de l'économie agricole de la région de Kairouan dans les années 80, et cette évolution s'est surtout manifestée par l'évolution de la surface consacrée au maraîchage, mais ce sont des cultures peu intensives (l'usage des engrais était négligeable à la fin des années 80) (SOTINFOR-SERAH, 1988).

Les conditions rudes et aléatoires expliquent le très fort attrait exercé par l'irrigation sur les paysans. Leur tendance à minimiser les risques de mauvaises récoltes plutôt qu'à maximiser leurs revenus les conduisent à préférer très rationnellement un système de polyculture-élevage, assorti d'une symbiose exploitation-famille basée sur une diversification des revenus familiaux, à une spécialisation céréalière ou maraîchère.

2.2.2.3. Caractéristiques actuelles du système agraire

La population serait analphabète en majorité, d'après l'Arrondissement Statistiques du CRDA de Kairouan (à raison d'un taux de 70% en 1990).

L'indivision (le fait que les fils mariés restent dans le foyer du père), de coutume jusqu'à une période récente, n'est plus toujours systématique (Kassab, 1983), ce qui favorise le morcellement des terres. L'apparition de comportements plus individualistes est sans doute encouragée par la sécurisation et par l'insertion progressive des exploitations dans le marché, grâce à l'irrigation. On trouve néanmoins encore beaucoup d'exploitations vivrières, et l'économie familiale repose largement sur la diversification des revenus.

Les exploitations sont pour la majorité constituées de petites parcelles dispersées, du fait des processus d'héritage et de la disparition progressive de l'indivision (Kassab, *op. cit.*). Quelques grandes exploitations (de plusieurs centaines d'hectares) coexistent avec ces petites structures, souvent gérées par des propriétaires kairouanais absentéistes, et surtout basées sur l'arboriculture et la céréaliculture.

Le système de culture le plus pratiqué en système irrigué (public ou privé) est la polyculture-élevage dont les composantes sont le plus souvent :

- l'arboriculture : selon les zones, oléiculture et arboriculture fruitière largement dominée par l'amandier et l'abricotier ;
- les céréales : blé dur et orge ;
- le maraîchage : en été majoritairement des tomates et du piment, secondairement des pastèques et du melon, en hiver surtout de la fève ;
- l'élevage en majorité ovin⁵⁶.

Les PPI de la plaine de Kairouan sont encore gérés par l'Etat pour la plupart. Leur

⁵⁶ les ovins représentent 89% du cheptel de la délégation de Chébika, les caprins, 7% et les bovins, 4% (source : fiche CTV Chébika, 1994).

infrastructure ancienne, l'état des routes, les chutes de débit de certaines stations de pompage, des difficultés de gestion de l'eau entraînent des problèmes d'absentéisme et de concentration des moyens de production sur les parcelles hors PPI, à l'origine des chutes de rendement [Unité régionale de suivi et d'évaluation des périmètres irrigués, 1998 #159]. D'après les superficies cultivées répertoriées par le CRDA, les taux d'intensification de ces PPI varient entre 74 et 188% en comptant la surface plantée, majoritairement en oliviers, et entre 51 et 125% sans compter les arbres. Certains PPI sont totalement plantés en oliviers (3 sur les 15 mentionnés). Le prix de l'eau en 1997 était de 61 mil/m³ ; il augmente depuis 1990 d'environ 15% par an, dans le cadre du PASA. En 1999, le prix de l'eau dans les périmètres sur forage était de 70 mil/m³ et de 55 mil/m³ dans les périmètres sur barrage⁵⁷ (Kefi, 1999).

Les agriculteurs pratiquent largement les cultures intercalaires entre les oliviers. L'irrigation est le plus souvent effectuée à la raie, ou à la planche pour l'arboriculture, et l'eau est souvent transportée par des tuyaux en plastique entre le captage et le champ, ou dans des canaux revêtus à ciel ouvert dans les périmètres publics irrigués. Cependant, sous l'impulsion des incitations publiques et de la vulgarisation technique, l'irrigation localisée au goutte à goutte, utilisée depuis quelques temps dans quelques grandes exploitations, commence juste à faire son apparition dans les petites exploitations.

Une grande partie des exploitations demeure sans accès à l'eau. Leur système de culture est fondé sur l'arboriculture des oliviers-amandiers⁵⁸, les céréales en sec et l'élevage.

Le faire-valoir direct (FVD) est dominant : il concerne 85% des superficies cultivées de la plaine de Kairouan dans les années 1980 (Kassab, 1983). Par ailleurs, on trouve beaucoup d'exploitations en faire-valoir mixte, pour des raisons d'organisation du travail, de proximité des sources d'irrigation, ou encore de trésorerie. Les agriculteurs donnent certaines parcelles en faire-valoir indirect (FVI) et parfois en prennent d'autres, tout en conservant des parcelles en FVD. Le métayage, qui permet de partager le risque d'une mauvaise récolte, et les coûts de production, est préféré à la location ; les contrats de métayages sont généralement établis verbalement, pour une durée déterminée et renouvelable. Le mode de FVI dominant est le *khemassa*⁵⁹, encore appelé "association au 1/5", où en principe le propriétaire de la terre fournit tous les moyens de production et récupère 4/5 de la récolte et le travailleur, 1/5. Les termes de ce contrat sont modifiés sur une parcelle irriguée dont l'accès à l'eau est fourni par le métayer comme on le verra en deuxième partie. On trouve

⁵⁷ Le prix de l'eau pour l'irrigation des céréales a été réduit de 50% selon un décret présidentiel de 1999

⁵⁸ sans doute permise au départ par un climat favorable, la présence d'une source, des arrangements avec des voisins, ou l'utilisation d'un accès d'eau potable.

⁵⁹ On lit pourtant que le *khemassa* a disparu, sauf dans les régions les plus archaïques (Kassab, 1983)

aussi la *mgharsa*, contrat de mise en valeur des terres par plantation : le travailleur plante la terre du propriétaire et peut cultiver en intercalaire jusqu'à la mise en production des arbres, après quoi le travailleur conserve la moitié de la terre plantée pour lui. Un contrat de type *dhehara* engage le métayer à apporter les forces motrices et humaines, et la moitié des intrants, la récolte étant partagée par moitié entre les deux partenaires. Enfin, deux personnes peuvent s'associer par un contrat de mise en valeur comme le contrat de *mouzaraâ*, par lequel le propriétaire d'une terre en sec la confie à un agriculteur, qui aménage un accès à l'eau et doit au propriétaire le $\frac{1}{4}$ de sa production de maraîchage. Au terme d'une durée de cinq ans environ, le propriétaire reprend sa terre, et selon le type de contrat peut rémunérer son associé. Ces formes d'association peuvent permettre aux agriculteurs de dépasser leurs limites économiques ou parcellaires pour construire un puits, par exemple. La diversité des modes de FVI est également observée sur les parcelles des propriétaires non résidents. Les exploitations en sec profitent de ces rapports de faire-valoir indirect pour caser leur main d'œuvre familiale, enrichir leur trésorerie, et apprendre les techniques d'irrigation, parfois dans l'espoir d'y accéder un jour.

Les statistiques réalisées sur la délégation de Chébika par le CRDA renforcent l'image d'une exploitation familiale partiellement intégrée au marché : moins de 10% des agriculteurs ont recours au crédit officiel, moins de 50% des agriculteurs utilisent des engrais, les céréales et les produits de l'arboriculture sont surtout auto-consommés, sinon majoritairement destinés au marché de gros de Kairouan ; l'élevage bovin reste marginal malgré les incitations des pouvoirs publics (Arrondissement Statistiques, 1990).

2.2.3. La gestion de la demande sur la nappe de Kairouan

Sur le plan administratif, la nappe de Kairouan appartient au gouvernorat de Kairouan. Le développement agricole de la plaine est encadré par le CRDA de Kairouan. La nappe de Kairouan est gérée de manière centralisée, aucune règle n'étant définie localement par les usagers : il s'agit donc bien d'une ressource collective et non d'une ressource commune. Malgré la règle en vigueur, imposée par l'Etat, dans la zone de sauvegarde, les agriculteurs ne demandent pas d'autorisation pour construire leur puits, qu'ils prolongent au contraire par des "forages manuels" les amenant souvent au-delà des 50 m de profondeur, limite officielle pour les puits sans autorisation. La nappe de Kairouan est donc en libre accès dans les faits : la réglementation officielle n'est pas respectée et aucune règle ou norme établie localement n'en régleme l'usage.

Il est délicat pour la police des eaux d'intervenir car les puits sont nombreux, et l'accès des sondages à bras, situés au fond des puits, est difficile. Ces techniques profitent d'un vide juridique, la loi n'ayant pas prévu leur existence. Les agents de la police des eaux

n'interviennent donc qu'en cas de conflit entre usagers donnant lieu à plainte ; dans ce cas, il peut y avoir procès verbal. Ces plaintes sont assez rares, en tous les cas dans la zone d'étude, les conditions de densité et de perméabilité susceptibles de créer des interférences n'étant pas réunies⁶⁰, les usagers peuvent pomper simultanément sans problème, ce qui les rend d'autant moins réceptifs aux mesures de sauvegarde. Malgré un risque de crise si l'exploitation continue de progresser ainsi, l'administration se trouve freinée par sa double fonction : d'une part, promouvoir le développement régional fortement défendu par les représentants locaux du Ministère de l'Intérieur, seuls relais avec la population rurale, d'autre part, veiller à l'application des règles en vigueur.

En d'autres termes, non seulement les procès verbaux ne sont pas distribués, mais la prolifération des puits est indirectement favorisée : l'électrification des puits de certaines zones est favorisée, des campagnes exceptionnelles de développement local subventionnent la mise en place de puits, le gasoil est en partie subventionné aux agriculteurs par l'UTAP⁶¹... Même les subventions destinées à augmenter l'efficacité de l'irrigation sont sans effet à l'échelle de la ressource: la pompe étant installée, le volume économisé permettra à l'agriculteur d'irriguer une nouvelle parcelle en location par exemple.

L'administration a également tenté d'enrayer le phénomène d'approfondissement des puits par une réglementation des entreprises de construction des puits et forages (décret n° 97-2082). Mais, faute de moyens peut-être, agilité des entrepreneurs sans doute, les entreprises déclarées illégales n'ont pas cessé leurs activités pour autant.

Face aux institutions de gestion, les agriculteurs de la plaine de Kairouan comprennent mal les mesures de sauvegarde d'autant plus que peu d'années auparavant, ces mêmes institutions incitaient à l'irrigation, aidaient à l'investissement dans les puits, subventionnaient les puits ; cette rupture dans la politique est mal comprise et risque d'attiser un sentiment d'iniquité pour les nouveaux arrivants.

Les usagers privés de la nappe sont mal connus, tant du point de vue de leur nombre et de leurs prélèvements, que de leur comportement. Le peu de données disponibles, provenant essentiellement des premiers travaux de l'équipe MERGUSIE (Feuillette *et al.*, 1998), donnent les indications suivantes sur la manière dont est vécue cette évolution par les usagers :

- dans la partie nord-ouest de la nappe, les puits sont à sec et ne peuvent plus être approfondis avec les techniques actuelles de forage à bras, comme si une épaisse couche imperméable avait été atteinte,

⁶⁰ Le calcul des marges brutes en FVI est présenté en annexe 3.h.

⁶¹ Union Tunisienne de l'Agriculture et de la Pêche

- dans la partie ouest (zone du Merguellil), les usagers continuent d'approfondir et de creuser des puits malgré l'abaissement de la nappe et leurs assolements ne varient pas avec l'augmentation du coût du pompage ;
- d'une manière générale, les usagers ne sont pas affectés localement par les pompages voisins ; de fait, les cas de plainte pour gênes locales rapportés par l'administration locale sont peu nombreux ;
- enfin, les usagers ne ressentent pas encore de dégradation de la qualité de l'eau ; la SONEDE a signalé une légère salinisation n'affectant pas son usage, malgré ses exigences de qualité.

En conclusion, malgré les désaccords sur le caractère déficitaire du bilan de la nappe de Kairouan, malgré la taille importante du réservoir et malgré la faiblesse apparente des impacts de l'abaissement sur les usagers, on peut affirmer :

- que **la nappe de Kairouan est surexploitée** du fait de la continuité du rabattement ;
- que **cette surexploitation induit des risques sur la viabilité du système**, en terme de qualité de l'eau, et d'impact social de l'abaissement et de la dégradation de la qualité ;
- que **cette nappe est une ressource collective en accès libre**, malgré la gestion dont elle fait l'objet.

Ces affirmations justifient la recherche d'un autre mode de gestion de la demande, pour limiter la surexploitation.

2.2.4. Le système d'étude : sous-système de la nappe de Kairouan

Il était délicat d'envisager une étude approfondie et une modélisation des dynamiques ressource -usages de la totalité du système de Kairouan, du fait de sa taille (3000 km² environ), et du nombre d'usagers concernés. Un système d'étude a donc été délimité, en cohérence avec la problématique de ce travail, et en accord avec les activités de recherche de l'équipe MERGUSIE.

2.2.4.1. Délimitation du système d'étude

La zone d'infiltration du Merguellil, étendue sur environ 25 km en aval du barrage El Haouareb, a paru particulièrement intéressante pour l'étude de l'articulation ressource/usages, pour les raisons suivantes :

- elle **concentre la majorité des usages privés⁶² et des périmètres irrigués** de la nappe de Kairouan depuis plus d'une décennie ; à part les prélèvements de la SONEDE, tous les usages sont locaux ;
- elle **constitue un système agraire** du fait de son homogénéité physique, de l'histoire commune vécue par ses habitants liée notamment aux inondations et au climat rude, de son relatif isolement par les massifs montagneux qui l'entourent en partie ;
- **la nappe est relativement bien circonscrite** dans cette zone : délimitée sur le plan géologique au nord par les montagnes de Chérichira, à l'ouest par celles de El Haouareb et au sud par la colline Drâa Affane, elle semble relativement bien isolée de l'influence du Zeroud⁶³ ;
- c'est **dans cette zone que sont observés les rabattements les plus importants**, ce qui permet de présager des interactions usages-ressources plus importantes qu'ailleurs et met l'accent sur le caractère urgent d'une gestion de la demande ;
- la quasi-absence de lâchers du barrage El Haouareb pendant au moins une décennie permet d'isoler le système de la gestion du barrage ;
- enfin, elle est **comprise dans le bassin du Merguellil**, objet d'étude de l'équipe Mergusie (et bénéficie donc des études de l'équipe).

Ces diverses considérations ont permis de délimiter précisément une zone de 20 000 hectares environ, comme on le verra plus en détail dans la deuxième partie.

⁶² Le sous-système étudié concentrerait 70 % des puits de la nappe (selon les chiffres de mes enquêtes et les chiffres de la DGRE ; cependant les chiffres de la DGRE semblent sous-estimés sur la zone d'étude).

⁶³ Les limites de l'influence du Zeroud par rapport à la zone du Merguellil étudiée font l'objet de controverses :

2.2.4.2. Point de vue préliminaire sur le système étudié

a. La nappe dans le système d'étude

Le barrage El Haouareb qui verrouille l'oued Merguellil obéit à la règle de gestion suivante :

- ses priorités sont dans l'ordre la protection de la ville de Kairouan, l'alimentation des périmètres irrigués et la recharge de la nappe, puis l'alimentation en eau potable ;
- dès qu'une crue de période de retour de 50 ans remplit le barrage, lâcher de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour se limiter à la zone d'infiltration. Depuis la construction du barrage aucune crue de ce type n'est survenue et aucun lâcher, sauf de type expérimental, n'a été effectué.

Dans la zone d'étude, la nappe est caractérisée par une profondeur d'accès variant entre 70 m et 25 m avec un gradient décroissant d'ouest en est. Sa transmissivité varie entre 1 et $20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en surface et entre 1 et $30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en profondeur. La porosité de l'aquifère saturé varie entre 0,08 et 0,12. La qualité de l'eau est assez bonne (en moyenne $1,5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, parfois $3 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ de RS), sauf au pied du Draâ Affane (ou le résidu sec approche plutôt $4 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$)⁶⁴. Il est difficile de distinguer deux grandes couches aquifères distinctes, la différence de charge étant négligeable, et la qualité ainsi que l'évolution piézométrique entre les niveaux profonds et superficiels étant relativement homogènes. On suppose donc que les lentilles aquifères sont connectées sur le plan hydraulique, formant un ensemble aquifère unique.

Avant la mise en eau du barrage, cette zone était essentiellement alimentée par l'oued Merguellil. Depuis la fermeture du barrage, elle bénéficie exclusivement des apports du sous-écoulement et des infiltrations aux piémonts.

b. Les usagers du système d'étude

Aucun forage industriel n'est présent dans la zone, et la SONEDE y possède une dizaine de captages. Environ 80% des prélèvements sont attribués à l'agriculture⁶⁵.

La majorité des exploitations sont de petite taille ; elles occupent également la plus grande partie de la surface agricole. La plupart des agriculteurs demeurent en sec, et les puits sont concentrés à l'est de la zone, où les niveaux sont peu profonds. L'extension des puits gagne du terrain progressivement vers l'ouest. La quasi-totalité des puits sont prolongés par des forages à bras .

⁶⁴ Les différentes cartes de salinité disponibles se contredisent souvent sur ce point. Les données mentionnées ici se réfèrent à la carte de salinité établie sur la "nappe phréatique" par le CRDA, d'après l'inventaire sur les puits réalisé en 1983-84.

⁶⁵ Les données sur les prélèvements des puits provenant des enquêtes réalisées dans ce travail. D'après les chiffres de la DGRE, l'agriculture prélèverait environ 60% du volume extrait.

La zone compte 16 périmètres collectifs de 30 à 2000 ha (cf. annexe 1.c), en cours de rétrocession aux agriculteurs sous forme de GIC.

Les cultures les plus pratiquées dans cette zone sont le blé dur, l'olivier, et le maraîchage (essentiellement du piment, de la tomate et de la pastèque). Pratiquement tous les agriculteurs ont un petit troupeau. De nombreux agriculteurs ont des revenus extérieurs. Quelques grosses exploitations de plusieurs centaines d'hectares captent à partir de forages privés, déclarés au CRDA. Il s'agit soit de gros propriétaires kairouanais absentéistes, soit d'immigrants venus du Cap Bon, et marginalement d'agriculteurs locaux.

c. Les interactions entre ressource et usagers et au sein des usagers

La première interaction entre ressource et usages, qui semble évidente, est l'abaissement de la nappe provoqué par l'exploitation des usagers. Les systèmes de culture semblent en retour peu affectés par le rabattement. Les agriculteurs entretiennent par ailleurs plusieurs types d'interactions les uns avec les autres : échanges fonciers par le mode de faire-valoir indirect (FVI), association pour la construction de puits, renseignements sur l'accessibilité de la nappe et sur la rentabilité potentielle d'un puits par la recherche de puits dans le voisinage proche. Il s'agit justement de savoir si ces interactions entre usagers ont un impact sur la nappe.

2.2.4.3. Un regard global sur le système étudié

L'approche globale du système permet d'appréhender les différents éléments le composent et le font évoluer par leurs interactions (fig. 5). La description préliminaire du système qui a été présentée au long de ce chapitre et qui est ici schématisée, permet de porter un diagnostic sur la gestion actuelle du système, et quelques éléments de réflexion par rapport aux projets d'intervention de gestion préconisés en Tunisie.

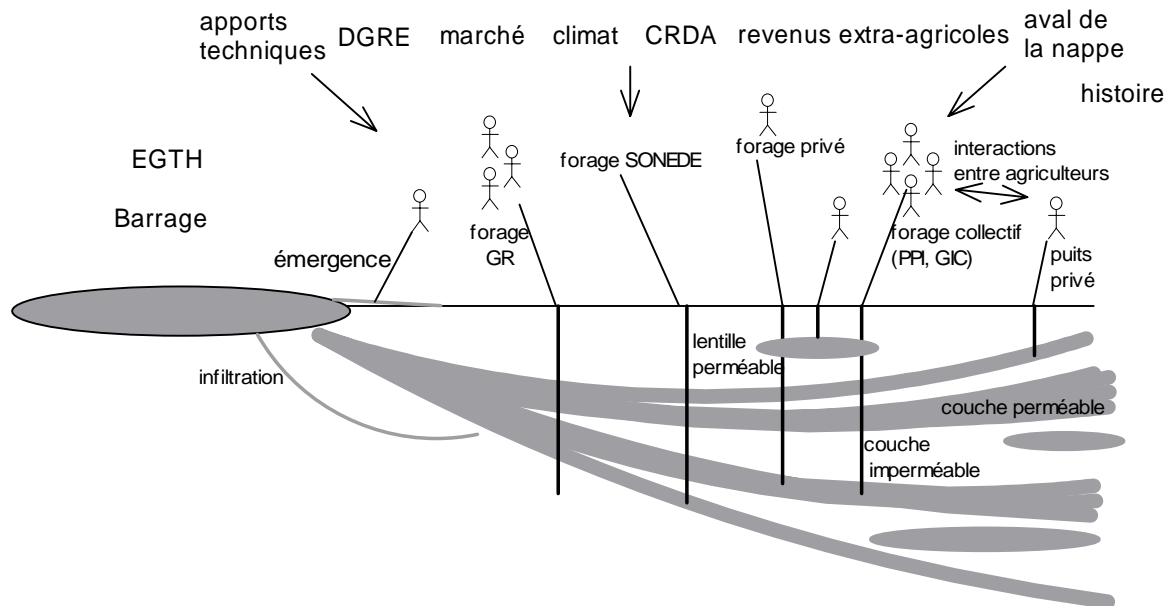


Fig. 5 : Schéma préliminaire du système d'étude. Les institutions, paramètres et objets physiques situés en périphérie du système représentent son environnement (dont le barrage fait partie).

Dans le système d'étude, la nappe, ressource collective, est gérée de manière centralisée. Mais on l'a déjà vu, son accès est libre *de facto*. De fait, pour limiter la surexploitation, les autorités ont instauré une zone de sauvegarde, mais cet outil réglementaire a peu d'effet : les exploitants ne semblent pas avoir conscience de la dimension collective de la nappe, la baisse actuelle n'est pas perçue comme problématique (ce qui s'explique par des calculs économiques comme on le verra en troisième partie), et le contrôle d'usages nombreux et dispersés s'avère difficile.

Par ailleurs, les mesures de tarification, qui ne concernent actuellement que les périmètres collectifs, où l'eau est payée, si elles peuvent sembler efficaces à première vue⁶⁶, peuvent également être contournées. Peythieu (1998) a confirmé que certains exploitants ont creusé leurs puits individuels à l'intérieur du périmètre, qu'ils utilisent de préférence à l'eau publique en raison du prix élevé de cette dernière. De plus, se pose la question de l'efficacité d'une tarification au niveau des puits, l'élasticité de la demande étant probablement faible.

A l'échelle nationale, la SONEDE utilise également la tarification pour encourager l'économie d'eau, à travers un tarif par tranches progressives⁶⁷ ; cependant les touristes ne sont pas forcément sensibles au prix de l'eau : ils consomment environ 560 l/jour/lit occupé, le secteur touristique occupant la 4^{ème} place en terme de consommation d'eau potable derrière les

⁶⁶ corrélation apparente entre l'augmentation du prix de l'eau et diminution de la demande dans le PPI de Chebika-Est (Peythieu, 1998).

⁶⁷ 5 tranches, avec un prix allant de 121 millimes/m³ pour une consommation inférieure ou égale à 20m³ par trimestre, à 700 millimes/m³ au delà de 150 m³ par trimestre.

ménages, les administrations, le commerce et l'industrie⁶⁸.

Quels outils de gestion appliquer au système étudié pour enrayer la dynamique actuelle ?

L'Etat tunisien a supervisé plusieurs études sur la comparaison des ressources et des besoins en eau du pays, et sur les stratégies de gestion possibles (Khanfir *et al.*, 1998).

L'étude "Economie de l'Eau 2000" (1990-1995) sous la direction de la DGETH devait faire un bilan spatialisé des ressources et des demandes à l'échelle du pays et définir des mesures permettant de combler ou de réduire les déficits identifiés. L'étude sur "la stratégie des Ressources Naturelles" (1997), réalisée par le Ministère de l'Agriculture devait identifier quatre scénarios d'évolution des ressources naturelles à l'horizon 2025, jouant sur les poids accordés à la production à court terme, au développement des générations futures et aux valeurs environnementales. L'étude "du Secteur de l'Eau" (1997-2000), supervisée par la DGRE, devait offrir des options techniques, économiques, institutionnelles et législatives pour répondre aux problèmes de la gestion des ressources en eau. Enfin l'étude "Eau 21" (1998), supervisée par le Ministère de l'Agriculture, devait présenter les enjeux du secteur de l'eau et réfléchir à une gestion des ressources hydrauliques répondant aux besoins en eau dans le cadre d'une stratégie à long terme (2030).

Plusieurs propositions d'outils de gestion de la demande ressortent de ces études, notamment :

- **l'usage d'outils techniques** : le développement de cultures moins exigeantes en eau et de nouvelles techniques pour minimiser les pertes à la distribution ;
- **l'usage d'outils économiques** : une tarification binôme couvrant les coûts marginaux de mobilisation des nouvelles ressources, la mise en place de marchés de l'eau à l'intérieur d'un même périmètre public ou d'un même GIC, voire entre ces structures, l'instauration d'une taxe de rareté à inclure dans une tarification déjà existante, une incitation à l'économie *via* le prix de l'énergie est également envisagée ;
- **l'usage d'outils institutionnels** : la mise en place d'institutions de gestion participative à l'échelle de la nappe, à l'image des GIC existant actuellement au niveau des périmètres irrigués, pour gérer un volume alloué à l'ensemble des puits privés ;
- **l'information et la sensibilisation.**

La mise en place de groupements de gestion de nappe est une alternative récurrente dans les propositions. Par rapport au cas de la nappe de Kairouan, une gestion commune ou même concertée paraît pourtant peu réaliste, compte tenu des conditions nécessaires à sa mise en place (Ostrom, 1990 ; Montginoul *et al.*, 1998) : l'étendue de la nappe est trop importante, ses contours ne sont pas connus par les usagers, qui semblent d'ailleurs ne pas

⁶⁸ Ces données sont issues de la plaquette de communication "Les économies d'eau " publiée par la SONEDE en 1996.

percevoir sa dimension collective⁶⁹, ni être véritablement affectés dans leurs activités par l'abaissement de la nappe... Les modes d'appropriation de la ressource observés sur le terrain conduisent à penser que les marchés de l'eau à Kairouan ne sont pas non plus adaptés au contexte local, en particulier car les agriculteurs ne semblent pas prêts à considérer l'eau de la nappe comme un bien marchand⁷⁰. D'autre part les conséquences sociales de ce type de gestion demandent mûre réflexion : disparition des agriculteurs les moins efficaces, accentuation de l'exode rural, disparition des cultures peu valorisatrices mais pourtant consommées. L'efficacité d'une mesure de tarification pose également question étant donnée la faible élasticité des prix de l'eau dans la région centre-est (-0,14 en PPI d'après Bechtel International et Scet-Tunisie, 1999). Enfin, l'efficacité à l'échelle de la ressource de techniques de distribution de l'eau plus efficaces au niveau des parcelles et/ou des périmètres irrigués, reste à démontrer dans ce contexte.

Finalement, la description préliminaire du système laisse présager une complexité qui permet difficilement de prévoir l'impact de telle ou telle intervention sur la demande. Par exemple, la gestion conjointe, dans une même exploitation, de parcelles de tailles, d'accès à l'eau, de statuts différents induit certainement des comportements différenciés par parcelle en termes de demande en eau dont l'impact en terme de réaction au prix de l'eau n'est peut-être pas neutre.

L'évaluation de l'efficacité de ces différentes interventions sur un système nappe/usages donné requiert donc une meilleure connaissance des caractéristiques de la ressource et des usages. Au-delà d'une simple analyse verbale, insuffisante pour se figurer la complexité du système, la modélisation peut constituer un outil puissant d'exploration des liens entre éléments physiques et humains. La simulation de scénarios d'intervention peut en outre constituer un support intéressant pour la réflexion et la discussion entre acteurs concernés.

⁶⁹ D'après mes enquêtes, ils pensent capter dans un "oued souterrain" différent de celui du voisin.

⁷⁰ L'argument clef des économistes en faveur des marchés de l'eau dans un but de sauvegarde de la ressource repose sur la nécessité de droits de propriétés clairement définis qu'ils impliquent, qui permettraient "d'internaliser les externalités". Or l'histoire de la nappe de Kairouan montre que la propriété privée de la nappe phréatique (jusqu'à 50 m) par les propriétaires des terres n'a pas empêché sa surexploitation.

3. Choix de modélisation du système étudié

L'objet d'étude étant défini, la question de sa gestion peut être étudiée à travers plusieurs types de modèles essentiellement différenciés par l'objet de la modélisation, qui peut constituer une partie ou l'ensemble du système, et la technique de formalisation utilisée.

En terme d'objets de modélisation, l'étude des systèmes ressources/usages peut être étudiée par des modèles disciplinaires, ou par des modèles intégrés, comme nous allons le voir.

Les questions de représentation de processus humains et environnementaux en interaction sont largement étudiées, notamment par la littérature écologique. Le choix de la modélisation dépend de l'instrument de gestion étudié, du contexte de l'étude, des données disponibles et de l'objectif du modélisateur (modèle de gestion, d'optimisation, modèle heuristique). Après avoir brièvement défini le type d'objectif assigné à l'opération de modélisation dans ce travail, les caractéristiques de plusieurs types de modèles disciplinaires et mixtes, et leurs limites par rapport aux objectifs sont présentées ci-dessous, pour déboucher sur l'intérêt présenté par les modèles multi-agents.

Auparavant, décrivons brièvement l'approche systémique qui a guidé la première phase de formalisation de l'objet d'étude.

3.1. Une approche systémique de l'objet d'étude

L'approche systémique s'intéresse à l'étude des entités formées par "un ensemble d'éléments en interaction dynamique en fonction d'un but", c'est-à-dire un système, selon la définition proposée par de Rosnay (1975). Plutôt que d'étudier ces systèmes au moyen des sciences classiques, par morceaux, en posant des hypothèses trop contraignantes et limitatives (de réversibilité, d'anisotropie du milieu, de linéarité...), l'approche systémique cherche à les aborder dans leur globalité. En effet un système est un tout non réductible à ses parties, dégageant des qualités que chaque partie ne possède pas, comme l'a montré Von Bertalanfy.

L'approche systémique peut conduire à représenter un système comme un réseau borné de boîtes noires en interaction entre elles et avec leur environnement, chacune transformant des intrants (de matière, d'énergie, d'information), en extrants (Belouze, 1996).

Sans aller si loin dans l'analogie entre systèmes et réseaux, l'approche systémique utilisée ici se contente d'aborder le système dans sa globalité, pour révéler et commenter les interdépendances existant dans l'utilisation des ressources naturelles.

La représentation systémique se justifie dans le cas d'un périmètre irrigué basé sur un

réseau hydraulique, "contrainte forte et partagée" qui induit un mode d'organisation sociale et des règles de gestion de la terre et de l'eau (Molle et Ruf, 1994). Néanmoins, les éléments pour une approche systémique des périmètres irrigués proposés par ces auteurs semblent convenir à l'étude d'un système générique "nappe-usages agricoles" (cf. fig. 6). Cette approche repose sur le principe selon lequel comprendre les comportements des usagers dans un système irrigué implique de prendre en compte des interactions entre périmètre physique, groupe d'humains l'exploitant, lignées techniques, et environnement physique et humain. Dans cette logique, le système nappe/usages agricoles peut également être considéré comme le produit d'une évolution historique et d'un contexte culturel et social composé de trois composantes principales en interaction : les exploitants agricoles, la société (qui provient en fait des interactions sociales entre agriculteurs et autres individus, compte tenu des histoires, traditions...), et la nappe.

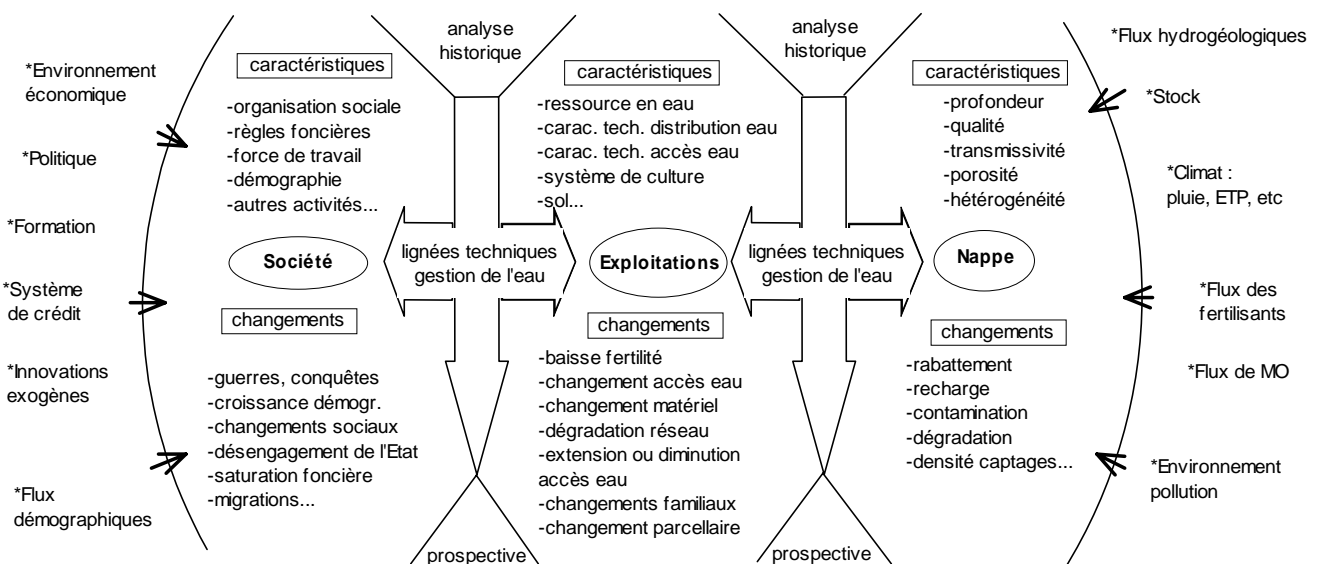


Fig. 6 : Approche systémique d'un système "nappe-usages agricoles". La lecture de ce schéma peut débiter par les 3 éléments centraux. L'environnement du système, constitué par des événements humains (à gauche) et physiques (à droite) agit sur les exploitations, la société et la nappe.

Cette vision systémique appliquée au terrain d'étude permet d'approcher le système dans sa complexité, étude préliminaire qui peut déboucher sur la définition de facteurs importants dont l'étude est à approfondir. L'étape ultérieure de la modélisation doit permettre de formaliser les interactions importantes du système.

3.2. Quel modèle pour étudier la gestion de la demande sur une nappe ?

3.2.1. Un modèle destiné à l'exploration du système

Les objectifs assignés à un modèle évoluent en fonction d'un processus itératif dépendant des données disponibles et de la demande. Malgré cette souplesse d'évolution, le choix du modèle à construire doit reposer sur un cahier des charges initial. En effet, comme le soulignent Costanza *et al.* (1995), un modèle peut difficilement satisfaire simultanément les objectifs de réalisme (représenter les comportements du système fidèlement sur le plan qualitatif), de précision (c'est-à-dire réaliste sur le plan quantitatif) et de généralité (représenter des processus généraux, aux dépens de la précision et du réalisme par rapport au cas étudié).

Il a donc été nécessaire de préciser la marge de manoeuvre avant de parcourir les différents types de modèles utilisables pour étudier le problème :

- dans cette étude le modèle doit guider la recherche des principaux facteurs influençant la demande en eau ;
- il doit permettre de simuler des interventions sur les déterminants de la demande repérés en première étape, ceci dans une perspective de comparaison de différentes alternatives et de réflexion, et non dans le but de fournir un modèle "clef en main" au gestionnaire ;
- il ne s'agit ni d'un modèle de gestion opérationnelle (résultats quantitatifs à la question "que se passe-t-il si" utilisés directement comme base d'action du gestionnaire) ni d'un modèle d'optimisation (de la même manière avec "comment faire pour") ou encore de prédiction ("que va-t-il se passer"), mais d'un modèle d'exploration (analyse de sensibilité à différents paramètres) et si possible prospectif (comparaison qualitative de plusieurs scénarios de projection).

Ce modèle exploratoire doit être capable de représenter la diversité des comportements et des processus décisionnels des usagers tout en tenant compte de la réaction de la nappe. Il ne s'agit donc pas d'ajuster un modèle "entrées-sorties" réaliste sur le plan quantitatif, à partir d'un modèle numérique de nappe couplé à des fonctions statistiques d'estimation de la demande ignorant les mécanismes de décisions des acteurs et leurs interactions.

Parcourons les différents modèles susceptibles d'être utilisés pour l'étude d'un système nappe/usages, pour voir repérer ceux qui répondent à ce cahier des charges.

3.2.2. Les modèles réductionnistes

Jusque là, les études sur la gestion durable des nappes ont surtout donné lieu à des modèles disciplinaires (ou réductionnistes), centrés sur l'offre ou sur la demande, considérant son complémentaire comme un facteur exogène dont le fonctionnement interne est ignoré.

3.2.2.1. Des modèles hydrogéologiques pour contraindre la demande à l'offre

Cette démarche consiste à étudier précisément la structure et le fonctionnement d'une nappe grâce à un modèle numérique, dans le but de connaître l'offre disponible dans le présent et dans le futur, afin par la suite de contraindre la demande à l'offre par des moyens juridiques ou concertatifs (cf. Akhy *et al.*, 1997 ; Besbes, 1975). Dans ce cas, la demande n'est modélisée que sous la forme d'un facteur exogène auquel on peut attribuer différentes valeurs (augmentation linéaire, stabilité, augmentation probable etc.). Ainsi, Laurent (1993), tout en revendiquant une approche systémique, construit un modèle numérique de nappe et évalue l'évolution de la demande spatialisée et par type d'usage, sur la base d'enquêtes auprès des acteurs. Trois scénarios d'évolution sont alors simulés, dont les résultats servent de base à la négociation entre acteurs, dans le cadre d'un contrat de nappe passé entre l'Etat et les usagers. Ce modèle ne tient pas compte des déterminants de la demande, qui peuvent se trouver en interaction avec la ressource elle-même, ou être influencés par différentes mesures incitatives dont on veut justement évaluer la pertinence. D'une manière générale, les modèles numériques de nappe ne suffisent pas pour rendre compte des dynamiques de fonctionnement de la demande.

3.2.2.2. Des modèles pour décrire la demande en eau et tester certains outils de gestion

La littérature fournit également des exemples de modèles concentrés sur la représentation fonctionnelle de la demande ; on cherche alors comment diminuer la demande pour atteindre un niveau d'offre donné.

Des **modèles agronomiques** peuvent représenter les besoins en eau intégrés au niveau de l'assolement de la région, en estimant les pertes en eau ; dans ce type de modèle, les déterminants de la demande sont réduits aux caractéristiques des plantes, au climat, à l'assolement et à l'efficacité de la distribution. Le comportement des acteurs est négligé.

Les **modèles agro-économiques** d'estimation de la demande en eau agricole s'appuient sur la théorie micro-économique : *"la demande en eau par type d'exploitation est calculée à partir des besoins en eau des cultures ajustés à un objectif de production, le modèle d'exploitation étant calé pour expliquer le choix d'assolement des exploitations, en fonction des disponibilités en terre, en main d'œuvre permanente, en eau, en droits de*

plantation...pour obtenir le revenu d'exploitation maximum, sous l'hypothèse de rationalité des choix des agriculteurs" Citeau et al. (1993) in Lamacq (1997). Face au problème d'hétérogénéité des exploitations qui entraîne une diversité des comportements, plusieurs types d'exploitations sont distingués et des processus d'agrégation permettent d'appliquer les modèles à l'échelle d'une nappe (cf. Rieu et Gleyses, 1993 ; Palacio et al., 1995). Ces modèles peuvent intégrer les risques, la diversité des pratiques d'irrigation, ou l'espace (cf. Piet, 1998 ; Benblidia et Garadi, 1994 ; Belhaj Hassine, 1997), mais ils ne rendent pas compte des échanges non-marchands, ni des interactions locales comme l'impact mutuel de deux agriculteurs voisins exploitant la même nappe, ou encore des relations d'échange d'équipement ou de parcelles. Ces modèles supposent en outre que les exploitants ont un comportement économique "rationnel" (maximisation du revenu), et qu'ils disposent d'une information complète sur la ressource et les prix. Cette hypothèse paraît peu réaliste tant sur le fonctionnement de la nappe que sur la maîtrise des filières en Tunisie.

Des **modèles économiques** permettent de traiter la question de l'exploitation des nappes et de l'impact de divers outils de gestion de la demande. Ainsi, pour comparer plusieurs modes de gestion de la demande sur une nappe (quotas échangeables ou non), Eheart et Barclay, (1990) proposent un modèle calculant la valeur marginale de l'irrigation, dont les sorties sont utilisées pour déterminer la stratégie d'utilisation de l'eau par les usagers sur la base d'une recherche de maximisation de la valeur de l'irrigation. Provencher et Burt (1994) comparent l'impact sur le bien-être social de l'appropriation privée d'une nappe et d'une gestion centralisée, sur la base d'un modèle purement économique. La nappe n'y est représentée que comme un réservoir dont le niveau s'abaisse proportionnellement aux prélèvements. De même, Xepapadeas (1996) modélise la pollution qui parvient à une nappe sous l'effet des usages agricoles de l'eau. Là encore, le fonctionnement de la demande est représenté par des équations mathématique fondées sur des hypothèses économiques. La nappe n'est pas représentée explicitement. Ces modèles ne tiennent pas compte des interactions directes entre acteurs, hormis celles qui sont liées au marché. Les modèles de théorie des jeux permettent au contraire de modéliser des interactions directes comme la négociation (Gleyses et al., 1998 ; dans le cas des nappes voir Heikkila, 2000) et indirectes (Romagny, 1996). Utilisés pour simuler l'évolution du milieu en fonction des choix faits par les différents acteurs ou types d'acteurs, ces modèles permettent d'expliquer une situation concrète ou d'atteindre une solution de compromis entre les acteurs par marchandage ou arbitrage.

Les **modèles d'action** (Sebillotte et Soler, 1998) permettent de formaliser les tactiques à l'origine de la demande en eau sur une exploitation (à un pas de temps fin), en représentant les processus de décision, d'affectation du matériel, de manoeuvre entre les parcelles, d'organisation du travail de l'agriculteur. Le modèle d'action s'organise autour : (i) des objectifs généraux de l'agriculteur (ex. : irriguer telle culture), (ii) de ses objectifs intermédiaires (ex. : durée du tour d'eau), (iii) d'indicateurs (ex. : observation des parcelles), (iv) et de règles de rechange (ex. : diminution de la dose apportée). S'ils sont bien adaptés à l'aide au pilotage de l'irrigation au niveau individuel (Lamacq, 1997), ils ne peuvent rendre compte ni des interactions entre usagers ni des évolutions interannuelles de capacité d'irrigation.

Ces divers modèles paraissent insuffisants pour représenter et simuler la dynamique d'un système nappe/usages, essentiellement pour trois raisons :

1. l'évolution des usages est fortement liée à celle de la ressource, et différenciée sur le plan spatial (Faisal *et al.*, 1997, Grimble *et al.*, 1996) ; par exemple Eheart et Barclay (*op. cit.*) constatent que leur modèle ne permet pas de représenter les rabattements locaux, qui peuvent être induits par la solution des quotas échangeables. La représentation des interactions ressource/usages implique une modélisation de type systémique ;
2. ces modèles sont également inadaptés à des analyses du moyen et long terme qui imposent de considérer des changements structurels relevant de décisions d'investissement. En effet ces modèles fonctionnent sur la base d'une population d'usagers fixée, dont les principaux paramètres de structure d'exploitation de la ressource, notamment le matériel d'irrigation et les capacités de pompage, sont bloqués. L'évolution des puits en nombre et en caractéristiques ne peut donc être appréhendée de la sorte ;
3. enfin, les modèles économiques classiques basés sur la "rationalité économique" des individus (au sens où ils cherchent à maximiser une fonction d'utilité) paraissent inaptes à formaliser des comportements réalistes (Janssen et Jager, 2000) ; ces considérations sont développées plus en détails en deuxième partie (§ 1.2.2.1).

Une modélisation portant à la fois sur les fonctionnements de la nappe et des usages, en interaction, permet déjà de dépasser la première limite évoquée ci-dessus. Voyons les différents types de modèles mixtes qui peuvent être sollicités pour étudier un système nappe/usages.

3.2.3. Les modèles intégrés

Les modèles intégrés, ou mixtes, représentent à la fois l'offre et la demande, en détaillant plus ou moins les entités ou les flux du système. Le choix de ce type de modèles implique nécessairement l'approche systémique présentée auparavant, ce qui n'est pas le cas des modèles disciplinaires. Ces modèles se distinguent par une approche globale ou au contraire détaillée des objets d'étude, et par leur technique de modélisation (mathématique, informatique...). Donnons-en quelques exemples.

Les modèles classiques des économistes représentent la nappe comme une baignoire et simulent les interactions globales entre baisse du niveau et comportement rationnel des usagers par un langage mathématique unique et sans tenir compte de la composante spatiale (cf. Gisser, 1983).

Le modèle nappe/usages de Reynaud (2000) intègre la représentation mathématique en deux dimensions spatiales d'un aquifère soumis à intrusion saline, selon les lois d'écoulement en milieu poreux, et une représentation économétrique de la demande. Cette approche permet de définir les contraintes sur les niveaux de prélèvement en chaque point de l'aquifère pour que l'exploitation soit durable. Elle permet aussi de déterminer les externalités en terme d'intrusion saline, causées sur l'usage optimal de la ressource par la relation entre volumes prélevés et positionnement des points de prélèvements. La demande repose ici sur l'hypothèse de la rationalité économique, et les interactions entre usagers ne sont pas prises en compte.

Différents modèles représentant l'offre et la demande peuvent être couplés : Belouze (1996) a construit un modèle intégré simplifié du fonctionnement d'un périmètre irrigué à partir de trois modèles disciplinaires (hydraulique, économique et hydro-pédologique). Ce modèle est approfondi par Strosser et Kuper pour analyser les impacts d'une intervention sur un système irrigué : la mise en place de marchés de l'eau (Strosser, 1997) et un changement de règle de gestion du canal principal (Kuper, 1997). Ces modèles ne représentent pas les rétroactions entre les éléments du système, de plus ils sont très lourds à mettre en œuvre, chaque sous-modèle représentant un phénomène de manière précise.

Dans son modèle de coordination offre-demande sur un système irrigué, Lamacq (1997) représente des boucles d'échange entre la ressource en eau et les usagers d'un périmètre irrigué, à l'échelle d'un latéral, et à un pas de temps fin (la journée), grâce au couplage d'un modèle d'action par individu et d'un modèle hydraulique, mais ne tient pas compte des interactions entre acteurs.

D'autre part, plusieurs modèles couplent une représentation maillée de nappe avec un

modèle de demande :

- Mañas *et al.* (1999) couplent un modèle numérique de nappe à un SIG comportant une base de données sur les volumes prélevés, estimés par télédétection. Dans ce cas le fonctionnement de la demande n'est pas représenté ;
- Cunha *et al.* (1993) connectent un modèle maillé de nappe avec un modèle d'optimisation économique,
- Faisal *et al.* (1997) modélisent sur une nappe spatialisée, le choix des irriguants situés dans le temps et dans l'espace en termes de cultures, de technologie, d'apports en eau, dans deux contextes de comportement différents : les agriculteurs cherchent à optimiser le revenu de la collectivité sur une certaine durée, ou au contraire chacun cherche simplement à maximiser son propre revenu à court terme;
- Verbeek *et al.* (1996) intègrent un modèle hydrogéologique, un modèle agricole qui calcule les effets des changements de niveau sur les rendements et un modèle d'estimation du risque de pollution domestique, et un modèle écologique qui estime l'effet des conditions hydrologiques sur les végétaux, dans le cadre d'un même SIG ; ce "système d'aide à la décision intégrée" permet de tester les effets de plusieurs politiques d'allocation de l'eau aux différents secteurs (agriculture, eau potable, loisirs, nature), et de les comparer sur la base d'un classement multicritère. Le fonctionnement de la demande n'est pas détaillé dans ce cas et on ne peut donc tester que l'allocation, et non l'application d'outils de gestion de la demande.

Si ces différents types de modèles représentent plus ou moins finement les interactions entre le système physique et les usagers (en tenant compte ou non des dimensions spatiales de la ressource, de sa complexité, des rétroactions sur le milieu et sur les usages...), ils négligent les interactions directes entre usagers, hormis celles qui sont liées au marché. De plus, ils réduisent souvent le comportement des usagers à la maximisation d'un profit ou d'une utilité. Ferber (1995) reproche en outre aux modèles mathématiques de situer tous les paramètres au même niveau d'analyse. En d'autres termes, ces techniques ne permettent pas de représenter de lien entre les niveaux "micro" et "macro", utilisent des paramètres peu réalistes, trop nombreux et toujours quantitatifs. Mais surtout, ils ne peuvent prendre en compte les interactions des individus dans leur environnement local.

Les systèmes multi-agents (SMA) permettent de faire interagir entre eux des agents informatiques autonomes, c'est-à-dire susceptibles de réagir à leur environnement et dotés de règles d'action qui leur sont propres, tout en respectant le caractère distribué du système. Pour ces raisons, les SMA ont paru plus adaptés à la modélisation d'un système

nappe/usages que les modèles présentés auparavant, compte tenu des objectifs d'exploration et de prospection qui ont été fixés.

3.2.4. Intérêts des systèmes multi-agents

Après un exposé rapide des principes de base des SMA, leurs intérêts par rapport aux objectifs fixés et à l'objet d'étude seront illustrés par des exemples, et quelques critiques seront soulevées.

3.2.4.1. Principes de base des SMA

Le courant de pensée "multi-agents" considère l'action et l'interaction comme les éléments moteurs et structurants de la société. Il s'inspire du courant systémique représenté par Morin, Varela ou Atlan "qui consiste à comprendre les systèmes comme des entités auto-organisatrices, dont le fonctionnement et l'évolution sont le produit du comportement d'un ensemble d'entités en interactions" (Ferber, 1994). Au contraire de ce courant qui met l'accent sur les flux d'interconnexion et sur la modélisation des boucles de rétroaction, l'approche "multi-agents" est fondée sur l'analyse des comportements d'agents interagissant, prenant ainsi le parti de l'émergence : l'auto-organisation du système est le produit des actions transformatrices de ses entités (Ferber, *op. cit.*).

Cette approche procède par construction de systèmes multi-agents (SMA). Comme le montre la figure 7, un SMA est un système composé d'un espace, d'un ensemble d'agents, entités actives du système, et d'un ensemble d'objets situés et passifs, susceptibles d'être créés, détruits ou modifiés par les agents. Des relations unissent les objets entre eux et des opérations permettent aux agents de percevoir, de produire, de consommer, de transformer et de manipuler les objets.

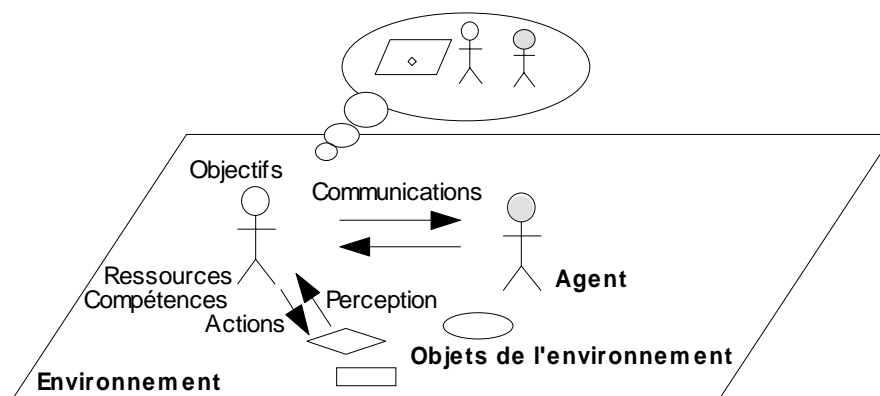


Fig. 7 : Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents (d'après Ferber, 1995)

Dans les SMA informatiques, un agent est une entité informatique capable d'agir dans un environnement qu'elle perçoit de manière limitée et se représente éventuellement de manière partielle et de communiquer directement avec d'autres agents par l'envoi de messages, selon des modes parfois complexes de coopération, de conflit et de concurrence. Cette entité, qui possède ses ressources et ses compétences propres, est mue par un ensemble de tendances. Son comportement tend à satisfaire ses objectifs, compte tenu de ses ressources et de ses compétences, et en fonction de sa perception, de sa représentation, et des communications reçues. Les interactions entre agents peuvent également être indirectes, *via* les transformations que leurs actions induisent sur l'environnement.

Par ailleurs, les agents peuvent être plutôt "réactifs", c'est-à-dire que leurs actions se limitent à une série de réaction aux stimuli de leur environnement, sans objectif explicite ni planification, ou plutôt "cognitifs", disposant d'une base de connaissance, de buts explicites et de plans leur permettant d'atteindre leurs buts. Les agents cognitifs peuvent garder des événements en mémoire et leurs représentations, connaissances, et compétences peuvent être évolutives.

La simulation multi-agents permet donc de représenter des processus d'interaction entre plusieurs agents autonomes, qui peuvent représenter selon les cas un acteur, un agent économique, un groupe d'agents... et des ressources dynamiques, qui peuvent être elles-mêmes des entités informatiques, ceci en tenant compte d'un certain nombre de contraintes (par exemple des contraintes sociales, économiques, environnementales...). Tandis que les approches écologiques ou économiques s'appuient sur des hypothèses d'équilibre ou d'optimisation pour formaliser les situations de concurrence ou d'interaction, les SMA permettent de représenter les interactions sociales dans leur dynamique.

Des principes de base des SMA qui viennent d'être présentés découlent plusieurs propriétés dont certaines intéressent directement ce travail.

3.2.4.2. Des modèles adaptés à la représentation des dynamiques ressources/usages

Plusieurs études portant sur la question de la gestion de ressources naturelles, ou sur les interactions hommes/ressources se sont basées sur les SMA. Ces expériences ont montré l'intérêt de tels outils pour mener des recherches sur les interactions ressources/usages.

Ainsi, à partir de la représentation des relations sociales sur un système irrigué virtuel, issu d'observations effectuées dans la vallée du Sénégal, Barreteau et Bousquet (2000) ont montré que la viabilité des systèmes irrigués dépend de la structuration des réseaux sociaux.

L'aptitude des SMA à constituer de puissants outils de dialogue interdisciplinaire a été utilisée par Bousquet (1994), qui à partir de l'étude des pêches dans le Delta Central du Niger, a mis en avant l'intérêt de la *modélisation des représentations* pour l'étude des relations entre hommes et ressource. Rouchier *et al.* (2001) ont modélisé les transactions pour la gestion des terres de parcours, observées entre transhumants et sédentaires dans le Nord du Cameroun. La simulation comparée de plusieurs types de comportement - plutôt fondés sur une rationalité économique, ou plutôt fondée sur une confiance établie au sein d'un réseau - leur a permis de montrer que la gestion des terres de parcours est plus efficace dans le second cas.

Par ailleurs, Bousquet *et al.* (sous presse) ont montré, sur la base d'une modélisation conjointe de la dynamique de la faune et des stratégies de chasse des habitants d'un village de l'est camerounais, que ces dernières peuvent conduire à la préservation de l'écosystème, contrairement à ce que prétendent les défenseurs d'une réserve naturelle pour la gestion locale des terres.

La possibilité offerte par les SMA de réitérer des simulations sur un monde artificiel, construit à partir d'observations de terrain, ou d'hypothèses permet d'explorer des systèmes existants sans que les expériences menées n'induisent d'externalités négatives sur le système (Barreteau, *op. cit.*), mais aussi de travailler sur des sociétés qui n'existent plus comme le montrent les travaux de Kohler *et al.* (2000), et ceux de Dean *et al.*, (2000) en archéologie. Ces aspects intéressent ce travail : l'étude des dynamiques entre nappe et usages de l'eau devrait idéalement être fondée sur un outil permettant d'intégrer les sphères physiques et humaines, et de réitérer des expériences de simulations.

De plus, les SMA permettent de respecter la complexité des objets d'étude. En effet, constituant une branche de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD), les SMA permettent de représenter les systèmes distribués, que ce soit sur le plan spatial, temporel, ou fonctionnel (Ferber, 1995 ; Lièvre et Traoré, 1998). Or comme on l'a vu en auparavant, les nappes sont caractérisées par leur caractère distribué sur le plan spatial. Et tenir compte à la fois de stratégies de prélèvements et d'investissements, supposées importantes dans la dynamique du système étudié, implique de représenter différentes échelles de temps. Quant à la distribution fonctionnelle, elle permet de modéliser différentes tâches menées simultanément par différents agents, ce qui peut être utile dans le cas étudié. Plusieurs objets spatiaux peuvent être superposés, et recoupés selon différents niveaux d'agrégation, et même constituer des objets actifs, automates cellulaires autonomes capables de percevoir leur environnement, ce qui peut permettre de représenter par exemple une dynamique d'embroussaillage (Lardon *et al.*, 1998). Or dans le cas étudié la superposition des

périmètres publics d'irrigation, des parcelles individuelles - agrégées en exploitations, et de zones de profondeurs différentes sur la nappe permet de croiser l'information de ces différentes couches de données, pour localiser la mise en place d'un nouveau puits par exemple.

Concernant la modélisation de la sphère humaine, les SMA peuvent permettre de modéliser des agents d'objectifs, de compétences, de connaissances et de ressources différentes, en d'autres termes cette société peut être hétérogène. Les agents irriguants du modèle de Barreteau (1998) par exemple se distinguent par leur rang social, leur intérêt pour l'irrigation, leurs obligations, leur appartenance à un groupe.... Dans le cas étudié ici, il paraît important également de différencier les individus. De plus, les SMA permettent de ne pas réduire les actions des agents et leurs interactions sociales au marché : les agents peuvent s'imiter, échanger des services, des informations, leurs actions peuvent dépendre de leur représentation du monde, laquelle peut évoluer... Ainsi, dans le même modèle que précédemment, les actions des agents irriguants sont non seulement basées sur leurs objectifs, leur perception du monde, leur condition sociale, mais aussi sur des échanges d'informations, de services et d'adresses *via* des réseaux sociaux. Cette possibilité de prendre en compte des paramètres qualitatifs et de formaliser les comportements des agents sous forme de règles d'action est mise en exergue par plusieurs auteurs : la rationalité d'un agent économique peut ainsi être limitée par une perception limitée de l'information (Antona *et al.*, 1999) ou par les externalités de voisinage (Lifran *et al.*, 1998 ; Balmann, 1997). Jager *et al.* (2000) et Gintis (2000) montrent sur la base d'expérimentations différentes comparant un comportement purement "rationnel" économiquement des individus à un comportement simple basé sur une description sociale ou psychologique des individus, combien les hypothèses portant sur le comportement des agents ont un impact important sur la dynamique du système. Finalement, permettant à la fois de modéliser les interactions entre dynamiques de fonctionnement de la ressource et dynamiques sociales, et les particularités des règles d'accès des acteurs à la ressource compte tenu de leurs interactions mutuelles, les SMA s'avèrent particulièrement bien adaptés à la simulation des formes de coordination observés sur les ressources communes. Par rapport au cas d'étude, la possibilité de modéliser plusieurs types d'interactions, comme l'imitation, et les échanges fonciers, paraissent particulièrement intéressants étant donné mes hypothèses sur l'importance de ces interactions locales.

3.2.4.3. Des modèles pour appuyer des choix de gestion

Cette prise en compte de la complexité des systèmes et des formes de modèles utilisés par les acteurs du monde réel permettent d'utiliser les SMA comme des "substrats actifs" pour la négociation dans l'aide à la décision (Ferrand et Deffuant, 1998 ; Lièvre et Traoré, 1998). Dans le même registre, Bousquet *et al.*, 1999 montrent que l'intérêt des modèles multi-agents dans les décisions portant sur le très long terme réside dans la possibilité de modéliser la représentation commune que se font les différents acteurs d'un système, et de simuler des scénarios compatibles avec leur objectifs. Au lieu de prescrire la meilleure politique possible, les SMA explorent les conséquences de différentes alternatives, dont les hypothèses et les résultats de simulation peuvent donner lieu à débats entre acteurs. Cette fonction des SMA correspond à l'objectif principal assigné au modèle, à savoir constituer un support pertinent pour l'étude de la gestion de la demande, tenant compte des interactions en jeu et capable d'aider à la formulation d'intervention de gestion et à la discussion de leurs effets sur le système.

Pour finir, l'approche ascendante⁷¹ permise par les SMA est particulièrement adaptée aux problèmes de gestion de l'environnement, notamment en situation d'incertitude, d'hétérogénéité, de "non obéissance". En effet, dans ce contexte les individus ont une connaissance partielle de leur environnement, des motivations particulières et une représentation subjective du monde (Weisbuch, 2000). Cette approche "bottom-up" paraît intéressante pour la présente étude : elle pourrait permettre, à partir d'une représentation des comportements individuels, de retrouver les phénomènes d'apparition des puits et d'abaissement de la nappe observés à l'échelle globale, puis dans un deuxième temps d'étudier l'impact d'interventions sur le système, *via* la simulation, en tenant compte de la réaction des agents individuels aux outils de gestion testés.

Cependant, malgré les aspects intéressants des SMA pour cette étude, il faut tenir compte du fait que ce type de modèles fait l'objet de plusieurs types de critiques. Tout d'abord certains leur reprochent de ne donner en sortie de simulation que "ce qu'on a entré dans le modèle" : "*Les modèles globaux complexes ne permettent souvent que de retrouver les grandes causalités et tendances du modèle (c'est-à-dire celles qu'on a entrées dans le modèle) et ne sont pas toujours assez consistants pour apporter une vision quantitative complémentaire qui soit fiable*" (Molle et Valette, 1994). Cette critique est démentie par le fait que l'auto-organisation du système par les interactions ne permettent pas, au contraire, de

⁷¹ C'est-à-dire partir des individus pour retrouver le phénomène global.

prévoir ses configurations futures analytiquement. En effet, les SMA obéissent aux phénomènes chaotiques : une modification, même mineure, peut être amplifiée par les interactions entre les agents (Ferber, 1995). Les SMA peuvent également se faire attaquer sur leur "prétention" à modéliser des comportements humains. Il est vrai que la représentation des objectifs et des règles d'action (plutôt réactives, ou fondées sur un raisonnement) relève parfois de la psychologie et ne peut évidemment pas saisir la complexité de comportements humains réels. Il en résulte que ces modèles doivent être utilisés avec précaution, et peuvent difficilement prétendre à des résultats quantitatifs précis, ni être validés selon les procédures classiques. Cette "limite" n'est pas incompatible avec les objectifs de l'étude, puisqu'il s'agit de construire un modèle exploratoire, permettant notamment aux acteurs et aux gestionnaires du système d'accorder leur représentation du système et de réfléchir aux conséquences de scénarios d'évolution. Cependant cette "prudence" sur l'utilisation des modèles mixtes est critiquée par Molle et Valette (*op. cit.*) : *"Le fait que, en dernière instance, l'on se serve de ces résultats - car sinon à quoi bon avoir fait un modèle - pour orienter une réflexion, tester un changement ou prendre une décision, bref pour l'action, ne revient-il pas à accorder de facto une valeur prédictive au modèle ? Ne limite-t-on pas ainsi la portée de l'humilité que l'on entend concéder au statut épistémologique de la connaissance ainsi produite ?"*. L'enjeu de ce travail consiste justement à montrer que le modèle construit peut apporter plus que les modèles classiques utilisés pour l'étude de la gestion des nappes, ou qu'un modèle seulement "littéraire", sans pour autant constituer un modèle prédictif. En effet, l'objectif du modèle n'est pas de fournir des estimations précises de ce que sera le système à l'avenir dans un contexte d'intervention donné, mais d'explorer les interactions entre éléments du système, de déterminer les facteurs clefs de sa dynamique, et de comparer les futurs possibles du système, dans plusieurs cas de figure.

Finalement, les SMA semblent correspondre au type d'outil recherché, tout en se révélant compatibles avec les objectifs assignés au modèle. De plus, si *"L'approche orientée objets s'adapte remarquablement bien aux modèles nécessitant la prise en compte de l'espace et des comportements individuels, [...] elle facilite la lisibilité, la réutilisabilité, la maintenance, et elle oblige l'expert à un recensement exhaustif et hiérarchisé des facteurs à prendre en compte"* (Coquillard et Hill, 1997). L'étape de la modélisation peut donc en soit constituer une aide à la recherche de données.

4. Vers la modélisation...

La figure 8 résume la recherche menée sur le type d'outil à élaborer.

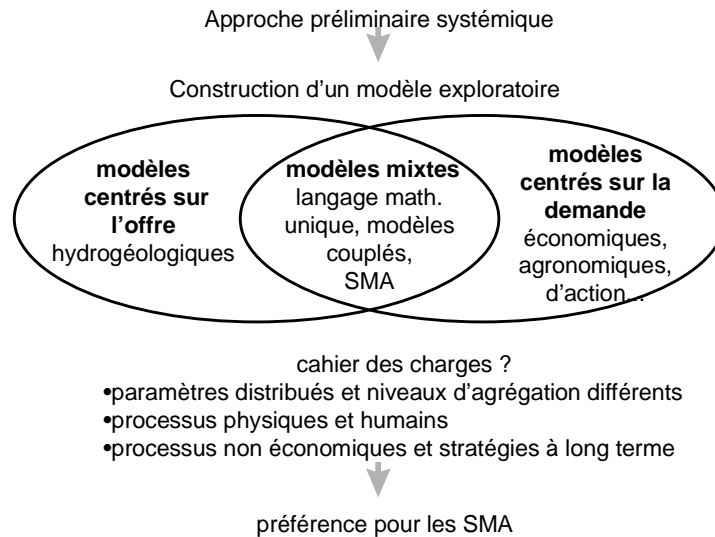


Fig. 8 : Quel type de modèle pour l'étude d'un système nappe-usages ?

La plupart des modèles donnés par la bibliographie permettant de tester des interventions sur un système entre ressource et usages présentent à mon sens les limites suivantes :

- ils ne représentent que les interactions entre usagers et ressource (pas à l'intérieur de la sphère des usagers) ;
- ils ne représentent pas les interactions de type non marchand et réduisent souvent les comportements des usagers à une fonction de maximisation des profits, tout en tenant compte d'une certaine aversion au risque ;
- ils ne prennent pas en compte les déterminants de l'apparition de nouveaux captages, qui semblent un aspect important dans la dynamique de prélèvements de la nappe de Kairouan.

J'ai opté plus précisément pour une modélisation par les systèmes multi-agents, car ils permettent de représenter différentes entités autonomes interagissant dans un environnement, et sont particulièrement adaptés pour aborder l'interaction de dynamiques écologiques et de dynamiques sociales (Bousquet *et al.*, 1996), sans pour autant réduire la réalité de manière outrancière. De plus, ils permettent de représenter le caractère distribué du système. Enfin, ils constituent un outil de dialogue et d'intégration interdisciplinaire, dans

ce cas l'hydrogéologie, l'agronomie, l'économie et la sociologie⁷².

L'étude menée se borne au secteur agricole, qui représente la majorité des prélèvements et constitue le moins bien connu des groupes d'usagers. Les déterminants de la demande en eau des agriculteurs seront recherchés en essayant de comprendre les processus de décision des agriculteurs à travers leurs déclarations, leurs actions, leur outil de production et leur environnement socio-économique. Il s'agira alors de formaliser comment chacun agit sur la nappe, et par conséquent la transforme pour les autres. Seuls les aspects quantitatifs seront pris en compte, les problèmes de salinisation étant encore mal connus. On étudiera donc le problème de la dynamique du système par la simulation des comportements des usagers, leurs échanges d'information, de services, de contrats, si ces situations sont observées.

Si les interactions entre ressource et usages sont représentées dans ce modèle, l'étude menée se concentre davantage sur la représentation des usages que sur celle de la ressource, dont un modèle hydrogéologique est actuellement à l'étude. Des recherches ultérieures pourraient s'attacher à représenter plus finement la nappe dans le modèle. Cependant, insistons sur le fait que ce type de modèle n'étant pas destiné à fournir des résultats quantitatifs dans l'absolu, il n'est pas nécessaire de pousser trop loin le détail de la représentation.

Le choix du modèle étant fait, il s'agit de démontrer sa pertinence pour améliorer la connaissance du système et enrichir les débats en cours sur les modes de gestion de la demande sur une nappe en accès libre du type de celle étudiée. Le modèle doit constituer un laboratoire virtuel d'expérimentation (Treuil et Mullon, 1996) intéressant sur le thème de la gestion de la nappe.

Voyons maintenant comment l'approche systémique a été appliquée à la zone d'étude, selon quelle démarche les données nécessaires à la recherche ont été collectées et à quel modèle ce travail a abouti.

⁷² L'intérêt d'une modélisation par les système multi-agents est présenté de manière synthétique dans une communication en cours de publication dans les cahiers de l'Unesco (Feuillette *et al.*, 2000a).

DEUXIÈME PARTIE

DU TERRAIN AU MODÈLE



Photographie n° 2 : Trois femmes paysannes de la plaine de Kairouan (Cliché S. Feuillette, 1997).

Cette partie présente la collecte des données sur le terrain, et le modèle construit à partir de ces données¹. Le modèle, « ...abstraction qui simplifie le système étudié en ignorant de nombreuses caractéristiques du système réel étudié, pour se focaliser sur les aspects qui intéressent le modélisateur et qui définissent la problématique du modèle » (Coquillard et Hill, 1997), doit représenter dans ce cas les processus locaux à l'origine de la dynamique globale du système étudié.

La démarche adoptée procède par allers-retours entre formalisation des processus et recherche de terrain d'une part, et entre construction du modèle et traitement des données d'autre part. Elle ne constitue pas pour autant la « modélisation d'accompagnement », décrite par Bousquet *et al.* (1996) comme une symbiose entre construction du modèle et recherche de terrain. En effet, la recherche de terrain et la modélisation ont constitué deux phases distinctes de ce travail.

Le premier chapitre décrit le protocole de collecte des données. L'analyse du fonctionnement de la demande, issue de ces données, est présentée dans un deuxième chapitre qui débouche sur une vue d'ensemble des dynamiques du système. Le modèle SINUSE, construit à partir de ces données, est décrit en terme de structure et de fonctionnement dans le troisième chapitre.

¹ L'ensemble de cette démarche est résumé dans une communication en cours de publication (Feuillette *et al.*, 2000b).

1. Une collecte de données essentiellement basée sur des enquêtes

Ce chapitre présente l'ensemble de l'approche méthodologique puis décrit chaque phase de la collecte des données.

1.1. Vue d'ensemble de la démarche

La démarche procède en deux temps (fig. 9). La reconnaissance du terrain a d'abord permis de formuler une série d'hypothèses sur les déterminants de l'abaissement de la nappe. Une étude approfondie des entités du système, *via* des allers-retours entre hypothèses et terrain, a alors conduit à détailler ou au contraire simplifier la représentation des processus en jeu. De retour en France, la construction d'un modèle à partir des connaissances cumulées a soulevé de nouvelles questions sur le détail des processus, auxquelles l'analyse des données a tenté de répondre. Une fois le modèle informatique jugé fonctionnel et conforme au modèle conceptuel (vérification), des procédures de validation ont permis de lui accorder une certaine confiance, afin de pouvoir l'utiliser pour des simulations de scénarios d'intervention (cf. troisième partie).

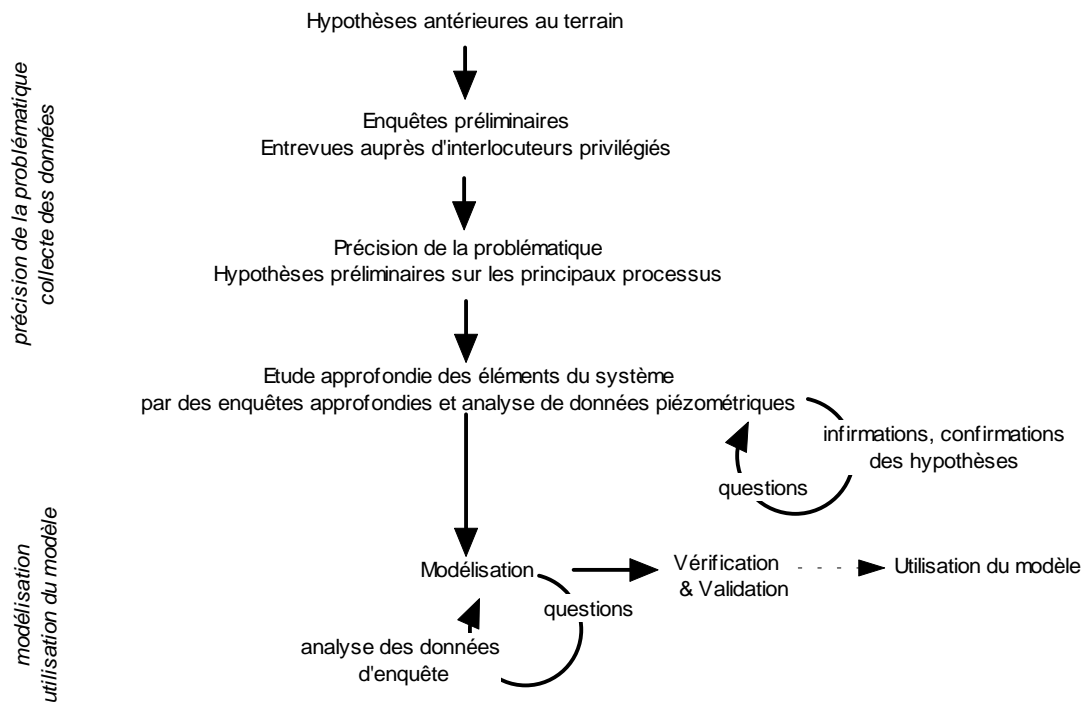


Fig. 9 : Vue d'ensemble de la démarche

Les phases exploratoires et l'étude approfondie du système ont reposé en grande partie sur plusieurs séries d'enquêtes menées auprès des agriculteurs de la zone, tandis que la structure et le fonctionnement de la ressource étaient appréhendés *via* les études déjà existantes, les cartes et les données piézométriques.

Les outils et théories mobilisés ont évolué au cours de ce travail. Plusieurs pistes de collecte et de traitement des données, mais aussi de modélisation, ont été envisagées puis abandonnées face aux caractéristiques du terrain. Citons par exemple :

- un projet d'analyse de l'évolution du système sur la base de bibliographie, d'enquêtes, de chroniques de données, et d'un travail de photo interprétation², mobilisant des outils de modélisation cartographique comme les chorèmes (Brunet, 1986). Faute de données suffisantes et face aux limites de la photo interprétation, une simple mise en perspective historique a remplacé l'analyse diachronique envisagée ;
- Des entretiens ouverts sur la base d'une carte de la zone auprès de plusieurs techniciens, ingénieurs et agriculteurs ont été effectués dans le but de réaliser un « zonage à dire d'acteur »³, tel qu'expérimenté et décrit par Caron, (1995). En fait, cette démarche s'est avérée fastidieuse et infructueuse, faute de critères discriminants pour les personnes interrogées, et peut-être d'interlocuteurs habitués à raisonner sur base cartographique ;
- les théories de l'Ecole des ressources communes étudiées lors de la recherche bibliographique mais ont été abandonnées face à l'absence apparente de gestion communautaire et d'appropriation collective de la ressource par les usagers⁴. De même, les considérations institutionnelles abordées lors de l'étude bibliographique n'ont pas été mobilisées car la décentralisation n'en était qu'à ses prémices et les interactions observées entre institutions et usagers paraissaient négligeables comparées à celles qu'entretiennent les usagers entre eux.

Avant d'aborder le détail de la démarche de terrain, insistons sur son objectif : *il s'agit de discerner les processus responsables de la dynamique globale du système dans une perspective de modélisation exploratoire, en respectant les ordres de grandeur observés, et non d'établir une monographie exhaustive et précise du système, ce qui relativise les incertitudes liées aux modes de collecte et de traitement des données.*

² Ce travail de photo interprétation, effectué sur la base de 4 séries de photos aériennes (1948, 1963, 1973 et 1990) devait notamment permettre d'analyser l'extension des surfaces irriguées et de l'arboriculture dans la zone (l'échelle des photos ne permettait pas de percevoir les puits) ; mais il s'est avéré délicat de distinguer les cultures irriguées des cultures en sec et de la jachère travaillée. De plus, les photos n'étaient pas prises à la même période de l'année et leur couverture était parfois incomplète.

³ Ce zonage repose sur des enquêtes avec des acteurs locaux (producteurs, techniciens...) ayant inconsciemment réalisé le travail d'intégration nécessaire au chercheur sur la zone qu'ils connaissent.

⁴ Les propriétaires de puits interrogés pensent capter sur des oueds indépendants les uns des autres et ne perçoivent pas le caractère collectif de la nappe.

1.2. Une approche systémique à plusieurs échelles

Cette approche se veut systémique dans le sens où elle a l'ambition d'embrasser le fonctionnement des différents éléments du système et les échanges qu'ils entretiennent entre eux et avec le milieu.

1.2.1. Une approche globale du système

La mise en œuvre de cette **approche globale, phase exploratoire de la démarche**, repose sur la compréhension de la vision du système, des problèmes et des enjeux par les différents acteurs concernés (responsables du CRDA, de la SONEDE, des CTV, de la DGRE, de l'EGTH, agriculteurs). La rencontre de ces acteurs, *via* des entretiens informels ou des "enquêtes préliminaires", a été menée de concert avec une recherche bibliographique fouillée.

1.2.1.1. Quelles données collecter pour la construction du modèle ?

En vertu de l'approche systémique présentée en première partie, les études préliminaires menées sur le terrain visaient à délimiter le système, à définir ses composants, son environnement, et les processus en jeu. Chacune de ces étapes a soulevé des questions particulières à résoudre, que le tableau 2 synthétise :

Tab. 2 : Les questions soulevées par chaque étape de l'approche systémique

étapes de l'approche systémique	Connaissances a priori	Questions
définir les limites du système	Limite de la nappe en amont (ouest) et au sud ouest.	Quelles limites choisir en aval, au nord et au sud est ?
déterminer les entités du système	Une nappe et ses usagers.	Ces éléments sont-ils homogènes ? Y a-t-il d'autres ressources ? Y a-t-il des usagers potentiels ? Faut-il considérer d'autres éléments ?
analyser leur fonctionnement	Les apports du Merguellil ont diminué. La nappe s'abaisse globalement. Les agriculteurs irriguent avec l'eau de la nappe.	L'abaissement est-il dû à une diminution des apports ou à l'augmentation des prélèvements ? Combien les agriculteurs prélèvent-ils ? Quels sont les déterminants de leur demande ?
déterminer les interactions qu'ils entretiennent mutuellement	Les prélèvements font baisser le niveau de la nappe. La baisse de la nappe entraîne une augmentation du coût d'accès.	Y a-t-il une compétition locale sur la ressource (rabattements ponctuels) ? Y a-t-il une influence du voisinage ? La baisse de la nappe entraîne-t-elle un changement des stratégies ? Y a-t-il des échanges d'eau entre usagers ?
décrire le contexte historique, économique, politique, social, technique...	La baisse a commencé dans les années 1970, en coïncidence avec l'apparition de nombreux puits.	Comment la dynamique d'apparition des puits et d'exploitation a-t-elle évolué ? Comment évoluent les techniques d'accès à la nappe et d'irrigation ?

En vue de la modélisation multi-agents, la recherche de terrain s'est en particulier focalisée sur les points suivants :

- **les interactions entre nappe et usages** ;
- **les interactions entre acteurs** susceptibles d'influencer la dynamique d'abaissement, la perception qu'ont les acteurs de la nappe et leur réaction face à l'abaissement ;
- **les déterminants de la demande** en eau des acteurs aux échelles de temps et d'espace pertinentes par rapport aux deux premiers points.

Un important défrichage de terrain⁵ a dû précéder la collecte des données, le programme MERGUSIE en étant à ses prémices⁶, et aucune synthèse sur cette zone n'ayant été réalisée auparavant.

1.2.1.2. *Limites, entités et échelles d'étude du système*

a. Délimitation du système étudié

Cette étude porte sur une partie seulement de la nappe de Kairouan. Si cette zone est clairement circonscrite à l'ouest, au nord-ouest et au sud par les limites de la nappe, il a fallu déterminer ses limites à l'est⁷. Cette délimitation a dû tenir compte :

- **des interactions avec le reste de la nappe et le sens d'écoulement de la nappe** (variable) pour tracer des limites approximatives, dans la mesure du possible perpendiculaires aux lignes de flux afin de délimiter le système et de pouvoir évaluer ses échanges avec l'extérieur ;
- **des limites administratives** pour faciliter l'accès aux données existantes ;
- **de la visibilité des limites** sur le terrain pour faciliter le repérage.

L'étude des cartes isopièzes (cf. annexe 1.a) a montré que l'écoulement s'effectue d'ouest en est, et a permis de délimiter approximativement la zone d'influence de l'oued Zeroud, au sud. Finalement, la zone d'étude est délimitée par des frontières administratives à l'est de la

⁵ Repérages de la zone d'étude, premiers contacts avec les institutions et agriculteurs, inventaire des données existantes et collecte des données de base sur la population, l'agriculture, la ressource, le cadre institutionnel et économique, recherche des cartes topographiques, des photographies aériennes, etc.

⁶ Le démarrage officiel du programme a eu lieu en décembre 1998, alors que ce travail de terrain s'est déroulé entre septembre 1997 et novembre 1998.

⁷ Le fonctionnement de la nappe devait se référer à des données de terrain précises en termes d'apports et de volumes extraits et le fonctionnement de la demande en eau devait reposer sur des enquêtes, en partie statistiques, donc à partir d'une population mère clairement définie.

zone, repérables sur le terrain. Les limites au nord-est et au sud-est correspondent aux limites d'influence de l'oued Zeroud au sud et à la perpendiculaire au sens de l'écoulement et sont matérialisées par des routes et des lits d'oueds.

b. Principaux éléments du système étudié

Par rapport au schéma descriptif du système issu de l'étude préliminaire (première partie, § 2.2.4.3), les éléments retenus sont les exploitants, les parcelles, les puits, les PPI et la nappe. Cette sélection repose sur les considérations suivantes :

- l'étude des usages porte uniquement sur **les agriculteurs**⁸ qui sont les plus gros consommateurs d'eau et les moins bien connus ; ils constituent la demande que les autorités cherchent à gérer ; les non irriguants sont pris en compte en tant qu'usagers potentiels ;
- **les périmètres collectifs irrigués** ou PPI⁹ représentent un type d'accès à l'eau et un contexte particulier de distribution ;
- **les puits** (et les forages privés), points d'accès privé à la nappe, matérialisent les interactions entre usagers et nappe ; leur évolution en nombre et en caractéristique joue un rôle important dans la dynamique du système ;
- **les parcelles** n'ont pas été agrégées en exploitations car elles jouent un rôle déterminant dans la décision de construction d'un puits en fonction de leur taille, localisation et voisinage ; en outre, le parcellaire des exploitations est morcelé et dispersé, ce qui accentue cette importance ;
- enfin il était indispensable d'étudier **la nappe** en termes de structure et de fonctionnement, puisqu'elle est hétérogène et évolue au fur et à mesure des prélèvements et apports, induisant en retour des changements dans les paramètres d'accès.

Le barrage et son « émergence », les apports aux piémonts, le sous-écoulement, les institutions, les prélèvements en eau potable, le marché sont considérés comme des paramètres exogènes au système, définissant son environnement extérieur. En effet, leurs interactions dynamiques avec les autres éléments du système sont considérées faibles au moment de l'étude, par rapport aux interactions entre les entités retenues. Ils ont néanmoins

⁸ les propriétaires non-résidents ont été inventoriés mais ils n'ont pas été retenus comme éléments du système, leur nombre et rôle étant minoritaires. Une enquête a été effectuée auprès de l'un d'eux.

⁹ L'acronyme PPI désigne les périmètres publics irrigués ; par facilité, il sera employé ici pour désigner tous les périmètres collectifs irrigués, sachant que certains d'entre eux deviennent actuellement des GIC (Groupement d'Intérêt Collectif) gérés par les usagers.

donné lieu à une étude, moins approfondie.

D'après les chefs de secteurs administratifs, sur la zone 5% de la totalité des irriguants sont ont des motopompes sur l'émergence. Les ressources de surface sont peu nombreuses, de faible débit, et confinées, elles interfèrent donc très peu avec les prélèvements effectués sur la nappe. Enfin, l'émergence et les sources des piémonts s'infiltrent s'ils ne sont pas utilisés, mais leur petit débit, la profondeur de la nappe et la forte demande évaporative font qu'ils peuvent difficilement être compris dans les sources d'alimentation de la nappe.

c. Echelles de temps et d'espace

Initialement, cette étude devait tenir compte de la compétition locale entre puits et des interactions induites sur l'usage des puits voisins. En effet, théoriquement, au-delà d'une certaine densité de captages, les usagers d'une même nappe se trouvent confrontés à des problèmes d'interaction de voisinage *via* la nappe. Tout prélèvement induit un cône de rabattement dont l'effet peut être ressenti dans un rayon autour du point d'extraction, qui dépend de son débit, de la transmissivité de l'aquifère et de la durée du pompage. Des entrevues auprès des responsables de la direction technique des ressources en eau du CRDA et des techniciens des cellules de vulgarisation agricole, et des enquêtes auprès des exploitants, ont montré que les propriétaires des puits de la nappe de Kairouan sont rarement affectés par les pompages voisins, du moins dans la zone d'étude. Cette faible interférence de voisinage a été confirmée par les calculs effectués à partir de la formule de Jacob, qui donne la hauteur du rabattement en mètres en fonction des paramètres de la nappe et des caractéristiques du pompage : $\Delta = 0,183 \cdot \frac{Q}{T} \cdot \log\left(\frac{2,25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot s}\right)$ où Q est le débit du pompage ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), T la transmissivité de la nappe ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), t la durée du pompage (s), r la distance au point de pompage (m), et s le coefficient d'emmagasinement (ou la porosité pour une nappe à surface libre).

D'après les différentes études réalisées sur la nappe de Kairouan, T est compris dans la zone entre 5 et $15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et s entre 8 et 20%. Les enquêtes effectuées dans ce travail indiquent que le débit moyen des puits est d'environ $5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, et nos observation de terrain, que la distance entre deux puits est toujours supérieure à 15 m. Le rabattement calculé dans des conditions moyennes, soit avec $T=10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $s=14\%$, $r=15 \text{ m}$ et pour un débit de $5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ durant 10 heures d'affilée, est de 0,13 mètre, ce qui semble négligeable dans l'absolu. Dans des conditions extrêmes ($T=5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $s=8\%$, $r=10 \text{ m}$, $t=20 \text{ h}$, $Q=7 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$), le rabattement est de 0,51 mètre, ce qui paraît négligeable par rapport au rabattement provoqué dans son propre puits, d'autant plus si la profondeur de la lentille captée fait

plusieurs mètres¹⁰. D'ailleurs les exploitants perçoivent d'autant moins ces interférences de voisinage qu'ils se représentent la nappe comme une multitude d'« oueds souterrains » indépendamment les uns des autres, s'écoulent d'ouest en est, image qui provient sans doute de la structure lenticulaire de l'aquifère.

L'effet de ces cônes de rabattement a donc été négligé et l'étude s'est focalisée sur les stratégies individuelles aux échelles de temps saisonnière, annuelle et interannuelle, en relation avec le rabattement global de la nappe.

Ce qui suit présente justement l'approche qui a guidé cette étude des stratégies.

1.2.2. Une approche systémique des exploitations

La zone d'étude peut être perçue comme un système agraire, du fait de son homogénéité sur les plans spatial, paysager, historique et naturel. Or au sein d'un système agraire, les représentations, les styles d'adaptation, et les pratiques peuvent être considérés comme les produits homogènes d'une même identité micro-locale (Campagne, 1994). Cette hypothèse, et le pas de temps retenu pour l'étude des processus physiques, ont conduit, compte tenu, en outre, d'une certaine homogénéité apparente des pratiques dans la zone d'étude, à focaliser l'étude sur les stratégies des exploitants.

Ce choix effectué, il reste à savoir comment étudier les processus de décision stratégique de l'exploitation susceptible d'avoir un impact sur sa demande en eau. Plusieurs modèles de comportement individuel en exploitation agricole sont donnés par la littérature (partiellement évoqués en première partie, § 3.2.2.2), comme nous allons le voir maintenant.

1.2.2.1. Comment étudier le comportement des agriculteurs ?

Le comportement des agriculteurs en terme de choix d'assolement est souvent expliqué et modélisé par la maximisation sous contrainte d'une fonction d'utilité, qui peut correspondre au profit, mais également à d'autres objectifs plus réalistes tenant compte par exemple de l'aversion au risque ou de la sécurisation par un stockage de denrées (Boussard, 1989). Ce type de modèle reposant sur l'hypothèse de la « rationalité économique » de l'individu qui cherche à optimiser ses décisions dans un contexte d'information parfaite et sans influences extérieures, est jugé peu réaliste par de nombreux chercheurs. Il est invalidé selon Jager *et al.* (2000) par des recherches expérimentales menées en économie et en psychologie. Gintis (2000) reproche à l'*homo economicus* de fonder ses choix sur des préférences

¹⁰ Dans le cas contraire, c'est à dire lorsque la couche perméable captée fait un mètre ou moins, elle a tôt fait d'être épuisée et le puits est alors approfondi pour capter une couche plus profonde.

exogènes et déterminées, d'être individualiste et orienté vers son revenu, tandis que Bossel (2000) soutient que ce type de modèle ne permet pas de comprendre les motivations des hommes et leurs impacts en termes de décisions et d'action, la maximisation de l'utilité constituant une petite partie seulement du large spectre des préoccupations humaines (environnementales, culturelles, sociales, politiques, techniques...).

Plusieurs types d'approches plus réalistes ont été conçus pour l'étude des pratiques des exploitants. On peut citer par exemple le modèle de Petit (1981) fondé sur la théorie du comportement adaptatif : les exploitants agissent en fonction de contraintes (par exemple des moyens mobilisables), pour atteindre des objectifs fixés en fonction de la situation (le milieu, le marché, la famille...). Ces derniers peuvent être révisés face à un problème, sans remise en cause pour autant des valeurs sociales. Citons également le « modèle général » (Sebillotte et Soler, 1998), rebaptisé « modèle d'action ». Dans ce modèle, les décisions de l'agriculteur convergent vers un ou plusieurs objectifs généraux, dont le principe est décrit en première partie, § 3.2.2.2.

Mais ces modèles couvrent le domaine des décisions tactiques telles que la conduite des cultures, alors que ce travail s'intéresse au comportement stratégique des agriculteurs à moyen et long termes, tel qu'Aubry *et al.* (1988) le définissent : « [...] *chaque individu cherche, au cours du temps, à saisir des opportunités en fonction d'objectifs et d'une représentation qu'il a du monde qui l'entoure. Ce faisant il construit sa propre rationalité. L'analyse de la stratégie, c'est alors la mise en évidence de cette rationalité, qui limite nécessairement le champ des possibles auquel l'individu a accès* ». Attonaty et Soler (1992) montrent que la projection dans le futur des exploitants, étant données leurs incertitudes, ne consiste pas à la définition *ex ante* d'une trajectoire optimale, mais à la définition de « tableaux de bord » et d'indicateurs informant régulièrement l'exploitant sur l'état de son exploitation et de l'environnement, et à la définition de règles de décisions fixant des lignes de conduite en cas d'événement non prévu.

Selon ces auteurs, "[...] *l'agriculteur ne traite pas aux mêmes moments, aux mêmes périodes, tous ces niveaux de décision : la gestion de l'entreprise agricole doit être perçue comme organisée autour de "cycles de décision"* (Attonaty et Soler, *op. cit.*). De la même manière, Sebillotte et Soler (1990) représentent un processus décisionnel de l'agriculteur organisé selon plusieurs pas de temps, et posent les hypothèses suivantes :

- étant donné la complexité du système à gérer, l'agriculteur est amené à isoler des « champs de décisions » traités de manière indépendante, comportant leurs propres objectifs, règles et programmes, et pourtant reliés les uns aux autres ;
- le comportement stratégique varie selon que les décisions sont à caractère cyclique (gestion des stocks, par exemple) ou au contraire, non répétitif (investissements). Pour ces dernières, le programme est plus flou et les décisions sont structurées par « une situation vers laquelle on veut tendre ».

L'analyse des stratégies agricoles menée ici a reposé sur ces considérations. Par ailleurs, il a fallu tenir compte des particularités du contexte rural tunisien : des exploitations familiales, une culture et des traditions particulières...

1.2.2.2. ...Sur l'approche « système exploitation-famille »...

Cette étude des stratégies agricoles a porté sur l'ensemble des facteurs des exploitations, y compris les relations sociales qu'elles entretiennent entre elles, pouvant avoir un impact sur la demande en eau à moyen et long terme. Le concept de « Système-Famille-Exploitation » (Brossier *et al.*, 1990), qui considère que les facteurs fournis à l'exploitation (travail, capital, argent) sont gérés au niveau de la famille, a paru pertinent dans le contexte rural tunisien pour étudier le cadre dans lequel les agriculteurs prennent leurs décisions stratégiques. L'approche systémique des exploitations menée dans ce travail s'est en particulier inspirée des considérations de Chayanov¹¹ sur l'exploitation agricole familiale, encore d'actualité comme l'indiquent Paul *et al.* (1994) ou Brossier *et al.* (1990). Pour Chayanov, l'exploitation familiale s'organise en fonction des besoins de la famille, et grâce à la quantité de travail qu'elle fournit. Son temps est partagé entre le travail dans l'exploitation agricole et le travail extra-agricole, comme le montre la figure 10.

¹¹ Chayanov, économiste russe du début du siècle, a écrit un ouvrage intitulé "L'organisation de l'économie paysanne" réédité en 1990 ("Librairie du regard") (Paul *et al.*, 1994).

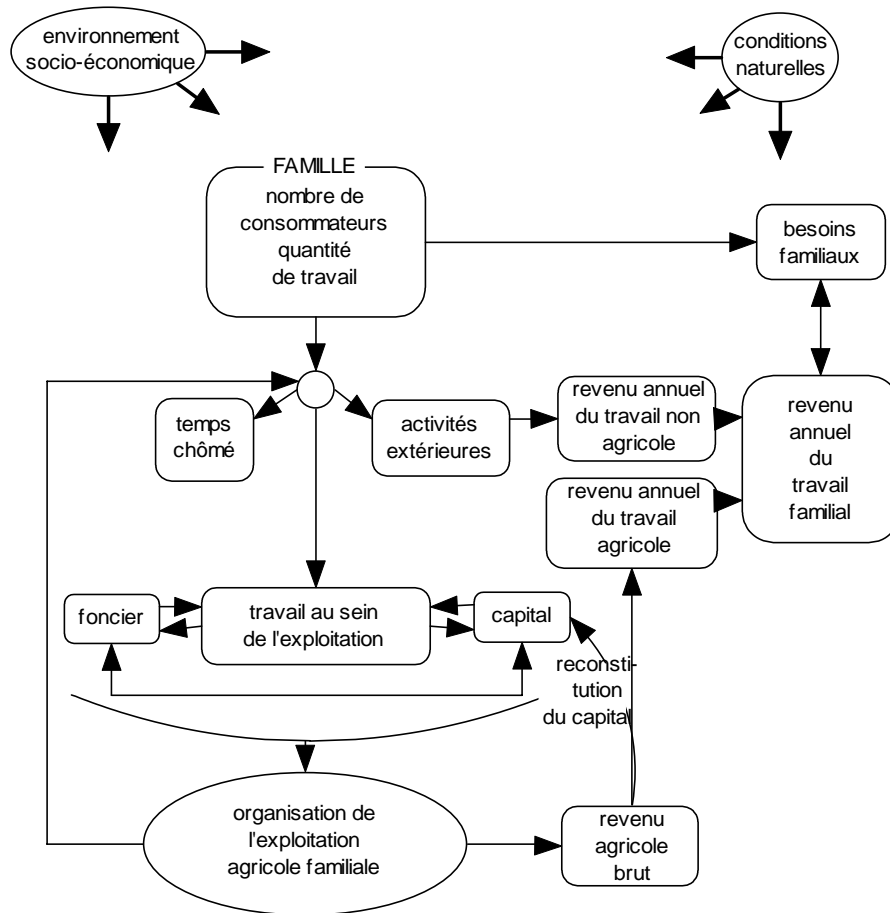


Fig. 10 : Le système Famille-Exploitation, vu par Chayanov in Paul *et al.* (1994)

Le revenu agricole est réparti entre production, consommation et épargne familiale, et il y a souvent fusion des budgets de l'entreprise et du ménage. Dans ce sens, Petit (1981) avance que les agriculteurs agissent en fonction du revenu, utilisable par le système famille-exploitation, plus qu'en fonction d'une notion de profit, trop abstraite.

1.2.2.3. ...Et sur le contexte rural Maghrébin

Cette approche des exploitations tunisiennes a également été enrichie par les considérations de Pérennes (1993) sur les stratégies paysannes au Maghreb, dont ont été retenus en particulier les points suivants, confirmés *a posteriori* par mes observations de terrain :

- le fellah du semi-aride maghrébin est un « *homme de l'aléa et de l'aubaine* » : il s'adapte aux aléas en recherchant la sécurité plutôt que la prise de risque, la satisfaction des besoins fondamentaux plutôt que les revenus monétaires, et utilise ses surplus pour renforcer la sécurité de son système, en partie fondée sur l'assise sociale de la famille ; Aubry *et al.* (1988) font le même constat au terme d'une étude sur les transformations de l'agriculture en zone semi-aride tunisienne ;

- pour s'adapter à l'aléa climatique, le fellah diversifie ses activités agricoles, pratique l'arboriculture, et capitalise volontiers ses gains dans l'élevage ovin qui permet d'utiliser ses chaumes, de constituer une réserve monnayable et de célébrer les fêtes ;
- au lieu de rechercher des cultures à haut rendement (comme le blé), il privilégie des cultures couvrant ses besoins de base et dont l'itinéraire technique est adaptable aux conditions changeantes (comme l'orge) ;
- la famille est patrilinéaire et le chef de famille constitue une forte référence symbolique ;
- l'indivision familiale¹² permet de conjurer le morcellement des terres, de minimiser les dépenses, de faire des choix symboliques importants, de diversifier les activités.

D'autres études, portant plus précisément sur le centre de la Tunisie, ou même sur la plaine de Kairouan, insistent sur la très grande valeur symbolique de la terre, qui est donc difficilement cédée à la vente, et sur l'inertie du système économique de cette région (SOTINFOR-SERAH, 1988 ; Ben Salem, 1993). La recherche bibliographique menée sur le monde agricole et en particulier sur l'irrigation en Tunisie a montré qu'il existe de nombreux travaux sur ces sujets, mais relativement peu sont consacrées au Centre de la Tunisie, par rapport à la vallée de la Medjerdah dans le Nord et aux oasis du Sud du pays.

La caractérisation des exploitations réalisée dans ce travail repose sur la terminologie utilisée par Abdesselem (1991), sur le ménage, le chef d'exploitation, la parcelle, l'indivision....

Enfin, la perception qu'ont les agriculteurs maghrébins de l'eau est très certainement influencée par le Coran, livre sacré pour les Musulmans.

N'est-ce pas lui qui a créé les cieux et la terre et qui, pour vous, a fait descendre du ciel une eau grâce à laquelle nous faisons croître des jardins remplis de beauté dont vous ne sauriez faire pousser des arbres ? - Ou bien existe-t-il une divinité à côté de Dieu ?- (VI I , 57).

N'est-ce pas lui qui a établi la terre comme un lieu de séjour ; qui a fait jaillir les rivières, qui a placé les montagnes sur la terre et une barrière entre les deux mers ? - Ou bien existe-t-il une divinité à côté de Dieu ?- (XXVII I , 60-61).

Les incrédules n'ont-ils pas vu que les cieux et la terre formaient une masse compacte ? Nous les avons ensuite séparés et nous avons créé, à partir de l'eau, toute chose vivante. Ne croient-ils pas ? (XXI , 30)¹³.

¹² Il y a indivision lorsque le fils marié reste chez ses parents avec sa femme.

¹³ Le Coran, Traductions et notes par D. Masson, Gallimard, 1967.

Fort de ces différentes considérations, l'étude de terrain visait à décrire les comportements stratégiques des acteurs en termes d'assolement, d'irrigation, de construction de puits et les interactions entre acteurs susceptibles de modifier leur demande en eau à moyen ou long terme.

1.3. Des enquêtes pour formaliser le comportement des acteurs

L'étude des exploitations, composante de l'« étude approfondie des entités du système » (fig.9), est jalonnée par différentes étapes (fig. 11), et se focalise sur les déterminants stratégiques de la demande en eau. Une série d'enquêtes préliminaires a débouché sur une typologie raisonnée d'accès à l'eau, à partir de laquelle des exploitations types ont été sélectionnées pour y effectuer les enquêtes approfondies. Les résultats ont indiqué différentes trajectoires possibles d'évolution des exploitations en terme d'accès à l'eau, et conduit à une première formalisation des règles d'action stratégiques des exploitants. Enfin, un sondage a permis de confirmer l'importance des processus à l'échelle de la population, de formaliser leur déroulement et de caractériser la zone, afin de construire un modèle respectant la distribution des paramètres et leur ordre de grandeur.

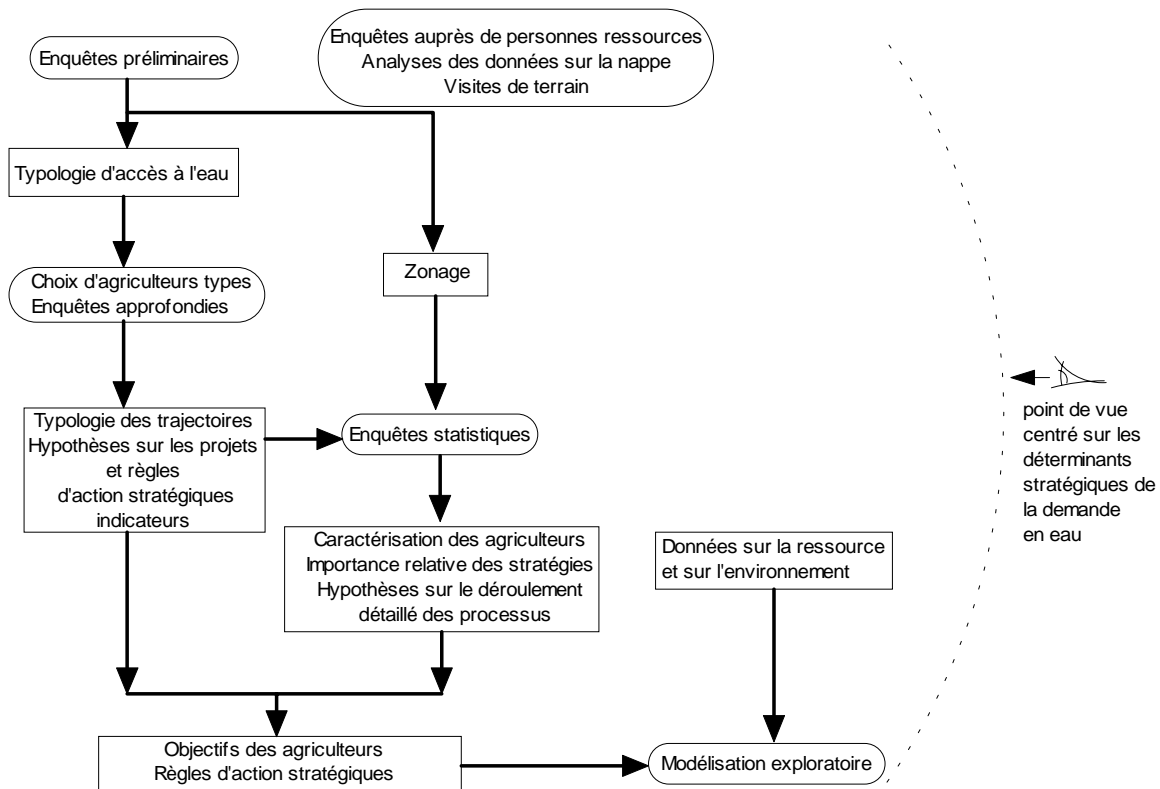


Fig. 11 : Les différentes étapes de l'étude des exploitations agricoles de la zone d'étude

Reprenons chaque étape une à une pour décrire leur protocole et les avancées sur les hypothèses permises par ces allers-retours entre questions et terrain. Mais avant tout, précisons que les nombreuses entrevues menées auprès d'interlocuteurs privilégiés (les omdas¹⁴, les techniciens de la vulgarisation technique, les responsables des différentes directions techniques du CRDA, des responsables de la DGRE et de la SONEDE, les fournisseurs de matériel, les entreprises de creusement de puits, etc.) ont constitué une source indispensable de compléments et de recoupements de l'information. En dehors de la connaissance générale qu'elles apportent, les informations particulières qui en ont été extraites sont utilisées pour justifier les processus exposés par la suite.

1.3.1. Les enquêtes préliminaires : un premier aperçu des stratégies

Les enquêtes préliminaires devaient permettre de préciser la problématique en jeu, de définir les caractéristiques générales de la région, les acteurs en présence, leur perception du problème, et d'établir une typologie préliminaire des exploitants afin de mener une enquête approfondie auprès d'agriculteurs types.

Ces enquêtes ont consisté en entretiens semi-ouverts, conduits sur la base d'un formulaire portant sur les points donnés par le tableau 3 (le détail de ce guide d'enquête peut être trouvé en annexe 2.a) :

Tab. 3 : Points abordés lors des enquêtes préliminaires

Thème	Points abordés
caractéristiques générales de l'exploitant	âge, formation, perception de la ressource, activités extra-agricoles
caractéristiques de son exploitation et de sa famille	main d'œuvre familiale et employée, activités agricoles et extra-agricoles, histoire, tenue d'une comptabilité, utilisation des bénéfices, accès au crédit, débouchés des récoltes
caractéristiques des points d'eau	profondeur, présence de sondages, type de pompe, consommation en énergie, coût de construction, interférences avec le voisinage, rapport au voisinage, perception de l'évolution, réaction
parcellaire	surface, composition, assolement, intrants, destination des produits, titres de propriété, parcelles en location

Ces enquêtes ont été menées auprès de 40 agriculteurs choisis en coordination avec la cellule de vulgarisation technique de manière à respecter la diversité des situations. Leur traitement a conduit à une typologie "empirique explicative" focalisée sur l'accès à l'eau.

¹⁴ Représentants du Ministère de l'Intérieur au niveau de l'unité administrative la plus petite : le secteur, ou imada.

"Les types empiriques [...] dérivent de données concrètes d'observation et sont fondées sur les tendances moyennes et les caractères communs qui apparaissent dans les associations des divers attributs choisis pour décrire les objets observés. La liste de ces attributs est elle-même arrêtée de manière empirique : on en relève les caractéristiques les plus apparentes, les plus accessibles à l'observateur, celles dont la variabilité est la plus évidente. La volonté d'aboutir à des types explicatifs, et non plus seulement descriptifs, conduit à accorder plus d'attention au choix des attributs observés, voire directement au choix a priori des dimensions des attributs. Ce sont ces choix qui conditionnent l'expression des phénomènes que l'on souhaite étudier. On peut en effet, selon la manière dont on observe, poser des questions très différentes à la réalité."(Perrot et Landais, 1993).

Le critère de taille, souvent utilisé en classification, n'a pas paru discriminant : de nombreuses exploitations sont de taille moyenne et la forme du parcellaire ainsi que l'accès à l'eau semblent au moins aussi importants que le facteur taille dans le fonctionnement de l'exploitation.

Une exploitation composée de 4 parcelles dispersées de 2 hectares est moins propice à la construction d'un puits qu'une exploitation d'une seule parcelle de 4 hectares. De même, une exploitation de 10 hectares conduite en sec en raison d'une localisation peu favorable sur la nappe (zone profonde, non "colonisée" par les puits) ne pratique pas les mêmes assolements et a moins de chance de s'enrichir qu'une exploitation de 4 hectares, dotée d'un puits.

Cette étape a également permis de repérer certaines difficultés d'enquêtes : les agriculteurs sont réticents à répondre aux questions touchant aux flux monétaires. L'analyse économique des exploitations n'est pas facilitée par l'absence quasi systématique de comptabilité (d'après leur déclaration). Par ailleurs les questions portant sur le futur recueillent difficilement des réponses, à moins de proposer un ensemble de réponses possibles à l'interlocuteur. Ces difficultés sont exacerbées par des problèmes de traduction : il arrive que l'agriculteur se lance dans une très longue explication dont la traduction amenée se résume par deux mots... Il a fallu tenir compte de ces limites pour élaborer les formulaires et mener les enquêtes suivantes : certaines informations seront obtenues de manière détournée.

Ce travail préliminaire a conduit à repérer des classes d'accès à l'eau et à poser des hypothèses quant aux déterminants de la demande en eau, laquelle semble dépendre en partie du type d'accès à la ressource. Se posent alors les questions sur la manière dont les exploitants peuvent passer d'une classe à une autre, des déterminants de cette transition, et des stratégies de prélèvement des exploitants pour un type d'accès donné.

1.3.2. Les enquêtes approfondies : trajectoires d'évolution et précisions sur les déterminants de la demande en eau

Les enquêtes approfondies ont eu pour objectif de préciser les principales stratégies influençant la demande en eau, à travers un regard global sur le système famille-exploitation, et sa trajectoire d'évolution en terme d'accès à l'eau.

A partir de la typologie d'accès à l'eau, onze agriculteurs ont été choisis parmi les 40 agriculteurs enquêtés lors de la phase préliminaire, sur les critères suivants : l'accord de l'agriculteur et la qualité du premier entretien ; son type d'accès à l'eau et sa localisation par rapport au zonage effectué.

Les enquêtes approfondies ont été effectuées en plusieurs allers-retours répartis sur une année afin d'établir un lien de confiance avec l'agriculteur, d'observer une évolution au minimum sur le moyen terme et éventuellement la prise de décisions d'investissement ; chaque nouvelle entrevue avec l'agriculteur devait permettre en outre de répondre aux questions suscitées par l'analyse des autres enquêtes. Les entretiens ont été ouverts et sans prise de note directe la plupart du temps, afin de mettre l'interlocuteur à l'aise. Les questions ont été posées parfois directement, le plus souvent avec un interprète. Selon les cas, une visite des différentes parcelles a été menée et des mesures aux puits ont été réalisées.

Globalement ces enquêtes ont permis d'explorer plus en profondeur certains points de l'enquête préliminaire ; le tableau 4 récapitule les points abordés en particulier :

Tab. 4 : Points abordés lors de l'enquête approfondie

Thèmes approfondis	Questions
Histoire de l'exploitation	événements familiaux, changements de production, grands investissements, déterminants...
Origine des fonds	revenus agricoles, extra-agricoles, ponctuels, recours à l'emprunt
Voisinage	interactions entretenues avec le voisinage
Assolement	choix d'assolement par rapport aux possibilités d'écoulement, au voisinage, au parcellaire, à l'accès à l'eau, à l'économie de l'exploitation
Pratiques	pratiques foncières actuelles et passées, dates des semis et récoltes des différentes cultures, doses-fréquences pour l'irrigation des principales cultures, marges brutes réalisées sur les principales cultures

La synthèse des événements clefs de l'histoire de l'exploitation devait permettre de comprendre la situation actuelle des agriculteurs, de discerner leurs objectifs à travers leur propre perception de leur histoire, de leur situation et de leurs projets (Deffontaines et Petit, 1985), et de repérer les principaux déterminants de leurs décisions d'investissement.

1.3.3. Les enquêtes statistiques : stratégies dominantes, diversité, caractérisation de la zone

Les deux types d'enquête présentées auparavant ont induit des hypothèses sur les objectifs, les stratégies et les trajectoires des exploitants. Le sondage devait permettre de vérifier la pertinence de ces hypothèses à une échelle plus globale, de repérer éventuellement d'autres types de stratégies, à travers des indicateurs de l'historique des exploitations, et de caractériser la zone sur le plan statistique.

Par exemple, le faire-valoir indirect a semblé tenir un rôle moteur dans les enquêtes précédentes ; est-ce encore le cas à l'échelle de la zone d'étude ? N'a-t-on pas interrogé des cas marginaux ? Ou quelles sont les tailles minimale, moyenne, maximale des parcelles où sont construits les puits ?

En effet les ordres de grandeur sur le nombre de puits, leur répartition actuelle, la taille des parcelles devait permettre de construire un modèle réaliste.

L'échantillonnage des exploitations a été stratifié dans le but d'améliorer la précision des estimations pour l'ensemble de la population, et d'assurer une précision suffisante pour les estimations relatives à certains sous-ensembles de la population étudiés isolément. Le critère taille est souvent choisi pour stratifier un échantillon, s'avérant généralement efficace pour l'estimation des variables quantitatives (Desabie, 1966). Mais les enquêtes préliminaires ont révélé que la correspondance entre les surfaces données par l'administration et la réalité est faible. De plus, un certain nombre de variables quantitatives importantes ne dépendent que secondairement de la taille totale (par exemple le cheptel, révélateur de l'épargne est corrélé à l'accès à l'eau plutôt qu'à la taille). Malgré leur diversité apparente, les types de sol ne se sont pas avérés discriminants pour les choix d'assolement et la demande en eau (ou alors de manière très localisée), comme le montrent d'ailleurs les cartes de l'étude de faisabilité du barrage El Haouareb (Pantu, 1973). Les agriculteurs pratiquant en majorité la polyculture-élevage à partir d'arboriculture et de céréales, avec une composante maraîchère en irrigué, le critère de l'assolement n'était pas non plus intéressant. Le zonage a finalement débouché sur la définition de 4 strates essentiellement différenciées par leur accès à l'eau actuel et historique : profondeur de la nappe, présence d'autres ressources en eau, accès privé récent ou ancien, présence de périmètres irrigués (cf. tab. 5). Chaque douar¹⁵ peut être rattaché à une strate. Initialement, cette stratification devait prendre en compte des paramètres pouvant s'avérer limitants pour les usagers de la nappe, comme la transmissivité et la salinité de la nappe. Mais malgré leur variabilité au sein

¹⁵ Un douar est un village ou un hameau, parfois (et originellement) il correspond au regroupement d'une famille, ce qui peut induire des ressemblances entre exploitations, du fait des règles d'héritage équitables.

de la zone d'étude (T varie de 5 à $20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en surface et de 15 à $30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en profondeur; la salinité varie entre 1,5 et $3 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$), ces critères ne semblent pas discriminants pour les usagers. Les zones concernées par les valeurs extrêmes sont en fait marginales et les comportements des agriculteurs ne semblent pas affectés dans ces zones. Cependant, le petit nombre de puits dans le quart sud-ouest ne permet pas de conclure sur la sensibilité des usagers à la faible transmissivité, même si ce n'est pas l'argument avancé par les usagers potentiels pour ne pas construire de puits. De plus, lors de l'exercice du zonage "à dire d'acteurs", les techniciens de l'arrondissement des ressources en eau n'ont pas évoqué la transmissivité comme facteur discriminant pour décrire la zone.

L'échantillonnage a été effectué sur la base des 2106 chefs d'exploitation agricoles résidents de la zone d'étude, inventoriés par une liste exhaustive établie par les omdas de chaque secteur concerné. Cette liste a donné lieu à un échantillonnage à deux degrés, par tirages aléatoires :

- d'un échantillon de douars au sein de chaque strate,
- d'un échantillon d'agriculteurs au sein des douars sélectionnés de manière à respecter un taux de sondage fixé au niveau de la strate¹⁶.

Le fait de concentrer l'échantillon de chaque strate sur un nombre limité de douars devait permettre de faciliter la circulation des enquêteurs et de comparer des situations divergentes au sein d'un même douar. Le choix des douars dans une strate repose sur un compromis entre leur nombre total, leur taille, et leur répartition dans la strate, afin d'avoir une bonne couverture spatiale.

Comme le montre le tableau 5, le taux de douars échantillonné est délibérément élevé dans les strates S_2 et S_3 , où ils sont assez dispersés, afin d'essayer de couvrir la diversité des situations. De même, le taux d'enquête est plus fort dans la strate S_3 , zone d'apparition récente des puits, où se posait la question de l'origine des financements des puits. Il a donc fallu redresser ce biais d'échantillonnage par un coefficient de pondération $C_i = \frac{n \cdot N_i}{n_i \cdot N}$ où n est

le nombre d'enquêtes au total ; N_i le nombre d'exploitations dans la strate S_i ; n_i le nombre d'enquêtes effectuées dans la strate S_i ; et N le nombre d'exploitations au total.

¹⁶ sur la base de 30 enquêtes au moins par strate pour respecter la loi des grands nombres et d'un taux au moins égal à 10% de la population mère afin d'avoir un échantillon représentatif par strate.

Tab 5 : Plan de sondage

Strate S_i	caractéristiques de la strate	nb exploitants N_i	nb enquêtes n_i	taux enquête	coefficient pondération C_i	nb douars	nb douars choisis	taux douars choisis
S_1	profondeur > 60 m ; peu de puits ; PPI	1116	147	0,13	0,98	35	11	0,3
S_2	profondeur [30-40] ; puits ; PPI	483	49	0,1	1,27	6	4	0,7
S_3	profondeur [40-50] ; puits récents ; pas de PPI	208	43	0,21	0,62	10	8	0,8
S_4	profondeur < 30 m ; puits anciens ; pas de PPI	299	33	0,11	1,17	9	4	0,4
<i>Total</i>		2106	272	0,13		60	27	

Le formulaire d'enquête (cf. annexe 2.b) a été conçu à partir de plusieurs formulaires déjà éprouvés en milieu rural tunisien (équipe Dypen¹⁷ ; Selmi, 1996 ; enquêtes sur les structures des exploitations agricoles du Ministère de l'Agriculture Tunisien, les enquêtes approfondies), puis testé sur le terrain, et modifié à plusieurs reprises¹⁸.

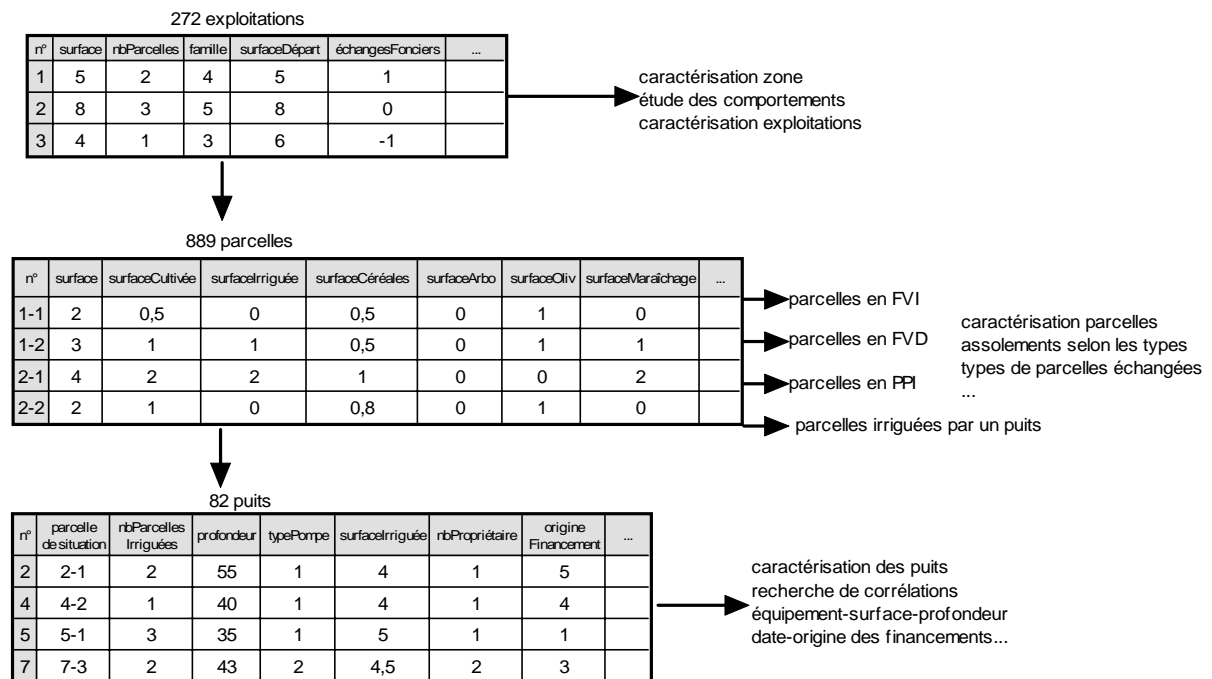


Fig. 12 : Saisie des données du sondage selon trois niveaux d'agrégation différents.

¹⁷ L'unité de recherche "Dynamique des populations et de l'environnement" de l'IRD base essentiellement son travail sur des enquêtes statistiques auprès de la population.

¹⁸ Les enquêtes ont ensuite été effectuées par une équipe de 5 enquêteurs tunisiens expérimentés, encadrés au quotidien.

Comme le montre la figure 12, les données issues du sondage ont été traitées selon trois niveaux d'agrégation différents pour répondre aux questions posées sur les exploitations, les parcelles et les points d'eau.

Préalablement à l'analyse des données issue de ce sondage, une étude de cohérence a été menée sur plusieurs variables : la surface exploitée, la répartition des agriculteurs en terme d'accès à l'eau et le nombre d'agriculteurs pratiquant une culture donnée, extrapolés à partir des enquêtes, ont été comparés aux chiffres issus de la liste des omdas ou de la photo interprétation. Ces tests (cf. annexe 2.c) montrent que le sondage peut être considéré représentatif. Les prélèvements annuels des 82 puits relevés par le sondage, estimés à partir des cultures qu'ils irriguent, ont également donné lieu à une analyse de cohérence : hormis un cas de prélèvement aberrant¹⁹, les prélèvements annuels sont en moyenne de 36 000 m³/an environ, et vont de 6000 à 87 000 m³/an²⁰. L'analyse détaillée des assolements déclarés dans les enquêtes a permis de repérer les demandes de pointe, compte tenu des demandes en eau des cultures et des surfaces occupées. Ces données sont cohérentes avec les débits moyens donnés par les mesures effectuées dans le cadre de ce travail.

La masse d'informations constituées par ces données auraient justifié leur analyse par une méthode de typologie automatique. J'ai pourtant préféré les aborder de manière raisonnée, à partir des connaissances de terrain et des hypothèses préliminaires, tout en guidant cette exploration par la construction du modèle SINUSE (cf. fig. 13). Au départ extrêmement simple, essentiellement fondé sur les hypothèses issues des enquêtes approfondies, le modèle a provoqué des questions induisant la recherche de liens explicatifs entre variables. Ceci a conduit à poser de nouvelles hypothèses plus précises, que la modélisation et la simulation ont permis de tester sur la base d'une recherche de cohérence avec les dynamiques observées sur le terrain.

¹⁹ supérieur à 100 000 m³/an, ce qui correspondrait au mieux à un débit de 10 l.s⁻¹, (débit maximal rencontré dans la zone d'après les techniciens du CRDA) 10 heures par jour pendant 275 jours.

²⁰ Sur l'année la surface irriguée est en moyenne de 7 hectares, et va de 5 à 15 hectares (ce dernier chiffre correspondant à un puits en association).

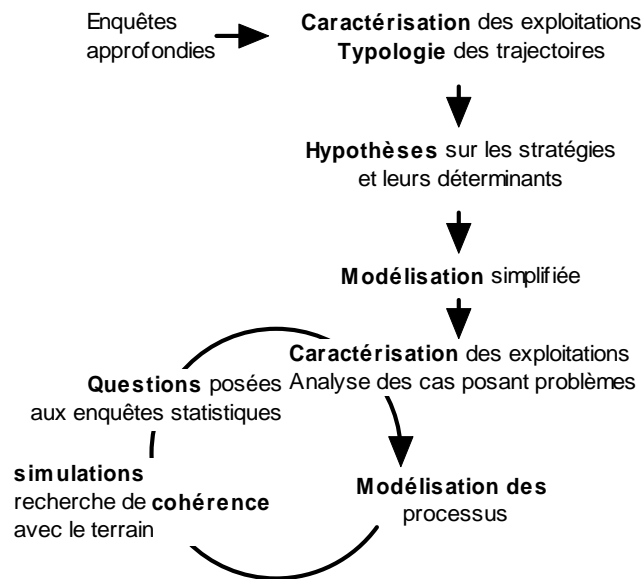


Fig. 13 : L'analyse des données guidée par la construction du modèle.

L'étape d'analyse "des cas posant problèmes" évoquée par cette figure a porté par exemple sur les exploitations équipées d'un puits non utilisé, ou endettées malgré un accès privé à l'eau, ou toute situation extrême ou incohérente par rapport aux hypothèses posées. La « caractérisation des exploitations » a été effectuée en fonction d'indicateurs structurels, fonctionnels, de trajectoire, d'accès à l'eau et d'échanges fonciers. L'hypothèse de rationalité des exploitants sur laquelle s'est fondée l'interprétation des enquêtes, s'accompagne d'une vision déterministe de leurs stratégies : dans un objectif donné, leurs décisions sont gouvernées par la situation de l'exploitation (la famille, l'économie, le parcellaire...), et par les conditions locales (l'état du voisinage, les échanges, le niveau de la nappe...). Des stratégies particulières sont toutefois prises en compte de manière implicite à travers les conditions initiales fixées pour chaque exploitant telles que le nombre total d'actifs familiaux et le parcellaire, révélateurs d'une stratégie d'indivision, et la proportion d'actifs familiaux ayant un emploi extra-agricole fixe.

La démarche mise en œuvre pour collecter les données nécessaires à la représentation des agents exploitants et de leur parcellaire vient d'être décrite. Parallèlement à cette démarche, la ressource et les points d'accès à l'eau ont également fait l'objet d'une étude en vue de la modélisation.

1.4. Source des données sur la ressource et les points de prélèvement

Un modèle maillé de la nappe de Kairouan est actuellement en cours d'étude, construit par Besbes (1975), repris par Chaieb (1988) puis par Nazoumou et Besbes (sous presse). Contrairement à cette modélisation, qui n'a pas reposé sur des enquêtes de terrain mais sur les chiffres de prélèvements estimés par la DGRE et ajustés par simulation, le travail réalisé ici est fondé sur des enquêtes jugées représentatives. Or les estimations de la DGRE donnent des chiffres presque deux fois plus faibles que ceux donnés par les enquêtes²¹. L'étude de la ressource qui va être décrite n'a donc pas pu se reposer exclusivement sur les données de ce modèle de nappe. Les recherches bibliographiques exposées en première partie fournissent un foisonnement de données, parfois incohérentes entre elles. La représentation de la nappe dans le modèle devait pourtant s'appuyer sur les données existantes. La vision retenue est surtout fondée sur les études de Besbes (*op. cit.*), et de Nazoumou (comm. pers.). Un zonage de la nappe a été réalisé à partir des séries temporelles piézométriques de la zone, qui ont également induit une réflexion sur la cohérence des données collectées.

1.4.1. Comment représenter la nappe ?

Plusieurs possibilités ont été envisagées pour représenter la nappe. Un couplage du modèle d'agents avec un modèle de nappe maillé, ou encore la représentation par les SMA d'une nappe finement discrétisée ont semblé constituer des méthodes trop coûteuses en temps par rapport aux objectifs fixés au modèle SINUSE. A l'inverse, une nappe homogène réagissant en un seul bloc ne permettait pas de représenter l'hétérogénéité de la nappe de Kairouan et risquait d'induire un fort biais dans la dynamique nappe/usages. Une nappe en plusieurs zones fonctionnant indépendamment les unes des autres entraînait des situations incohérentes. Finalement il a été décidé de représenter la nappe par un minimum de réservoirs homogènes communiquant entre eux.

Cette représentation simplifiée repose sur les séries temporelles piézométriques enregistrées depuis les années 1970, et plus particulièrement sur les données de ces dix dernières années (cf. fig. 14). La localisation des piézomètres dans la zone d'étude ainsi que les courbes d'isoprofondeur en décembre 1998, élaborées à partir de l'interpolation des données piézométriques et du modèle numérique de terrain peuvent être consultés

²¹ Rappelons que les estimations de la DGRE sont fondées sur les demandes de subventions. Or les agriculteurs savent qu'aucune subvention sur la construction d'un puits n'est plus accordée, en théorie, dans une zone de sauvegarde, et n'ont pas trop intérêt, d'une manière générale, à faire savoir à l'administration qu'ils ont construit un puits, sans demander d'autorisation.

respectivement en annexes 1.a et 1.d.

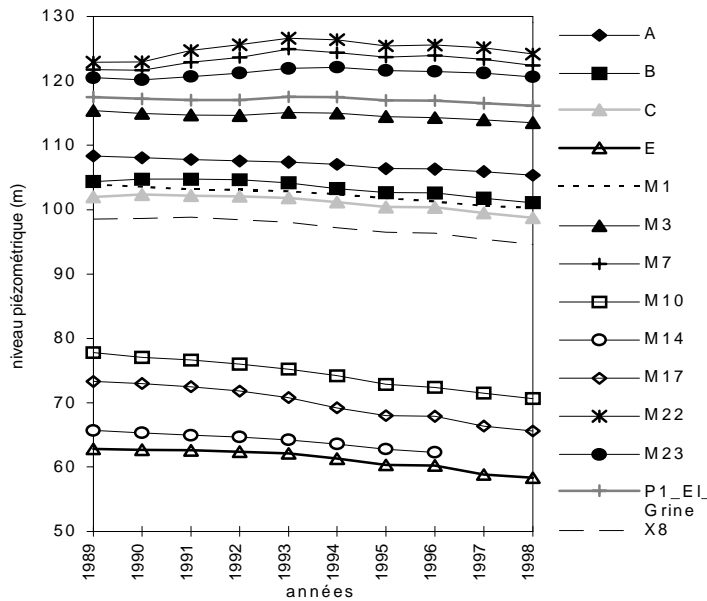


Fig. 14 : Evolution des niveaux piézométriques relevés pour différents piézomètres de la zone. Données du CRDA vérifiées (équipe MERGUSIE)²². L'échelle adoptée pour ce graphe atténue les tendances différentes des courbes (cf. annexe 1.e). Il s'agit ici de présenter un graphe synthétisant les tendances de la zone. En pratique, les choix de subdivision de la nappe pour sa modélisation ont reposé sur un échantillon plus important de piézogrammes mensuels, mais qui souvent ne couvrent pas toute la période considérée ici.

Hormis les différences de niveau, principalement dues à la pente du toit de la nappe, la forme des courbes permet de distinguer deux groupes :

1. les piézomètres soumis à l'influence du sous-écoulement amont et du lâcher de 1993 (M22, M7, M23)
2. et ceux en baisse continue²³ (A, M17, M14, E, M10).

Certains se trouvant à la charnière entre ces deux groupes (M1, P1, C, X8, B). Le groupe 2 est situé en amont et le groupe 1 en aval (les éléments charnière sont plutôt situés à l'amont)..

L'unique piézomètre représentant le quart sud-ouest de la zone (non figuré ici) ne montre pas les mêmes fluctuations que ceux situés plus au sud, en aval du barrage, ce qui pourrait signifier que cette partie de la nappe présente un fonctionnement singulier. Cependant, faute d'autres sources de données dans cette zone pouvant confirmer cette singularité, le fonctionnement de toute la partie ouest de la nappe a été supposé homogène, y compris au sud. Ces données ont permis, compte tenu de l'objectif de formalisation simplifiée, de scinder la nappe en 2 zones, une zone amont et une zone aval, délimitées sur la base d'une isopièze représentative. En terme de profondeur, la représentation de la nappe s'est basée sur une carte des profondeurs de 1998 établie par l'équipe MERGUSIE, par interpolation à partir des données piézométriques et topographiques.

La caractérisation de chacune des zones en termes de transmissivité, de porosité et d'apports est basée sur les différentes sources de données disponibles.

²² Ce travail de vérification a consisté à repérer les valeurs aberrantes et à réajuster l'ensemble des données à partir d'une correction des conditions de mesure des niveaux piézométriques (hauteur des margelles).

²³ La baisse est atténuée dans cette figure du fait de l'échelle adoptée.

1.4.2. Comment modéliser simplement le fonctionnement de la ressource ?

La représentation du fonctionnement hydrogéologique de chaque zone a été établie à partir des données hydrogéologiques issues de différentes études, en cohérence avec les données de prélèvements issues des enquêtes.

1.4.2.1. Cohérence des paramètres hydrogéologiques avec les données de travail

La comparaison du déstockage annuel et du bilan volumétrique de chaque zone de la nappe a permis de tester la cohérence des données collectées sur les prélèvements, et de caler les valeurs de transmissivité et de porosité de chaque zone, à partir des gammes de valeurs proposées par les différentes études de la zone. Le déstockage est estimé à partir des séries temporelles piézométriques (données du CRDA vérifiées)²⁴ et d'une estimation de la porosité, tandis que le bilan volumétrique est calculé à partir des apports annuels (données issues du modèle de nappe de Nazoumou²⁵), des prélèvements annuels (données du CRDA et les enquêtes) et des transferts (calculés à partir du gradient piézométrique de deux piézomètres représentatifs aux frontières et d'une estimation de la transmissivité).

La figure 15 donne le déstockage et l'évolution des apports, des prélèvements, des transferts et de l'abaissement au cours des dernières années²⁶.

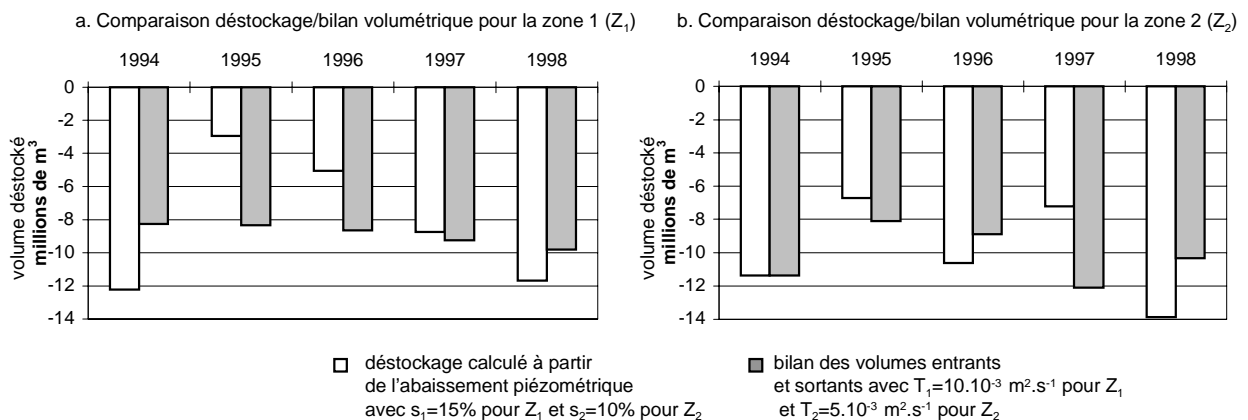


Fig. 15 : Comparaison par zone du déstockage et du bilan volumétrique annuel

Théoriquement, le déstockage d'une zone calculé à partir de l'abaissement piézométrique devrait correspondre au bilan volumétrique de la zone. En effet, l'inertie de la nappe est

²⁴ Ce travail de vérification, a consisté à repérer les valeurs aberrantes et à réajuster l'ensemble des données à partir d'une correction des conditions de mesure des niveaux piézométriques (hauteur des margelles).

²⁵ Hormis les sous-écoulements provenant du seuil d'El Haouareb, qui correspondent aux données du modèle de Kingumbi (1999), et les éventuels lâchers, les apports se résument aux infiltrations aux piedmonts, difficilement estimables. Dans le modèle de Nazoumou, les données portant sur ces apports sont des moyennes estimées par ajustement.

²⁶ Seules les années 1994 à 1998 ont été retenues en raison des perturbations induites par la mise en eau du barrage en 1990, et par le lâcher expérimental de 1993.

assez faible ce qui laisse supposer qu'il y a peu de répercussion d'une année sur l'autre. Cette comparaison a été effectuée sur les 5 dernières années, à partir des différentes valeurs possibles de transmissivité et de porosité de chaque zone²⁷, conduisant au choix de l'ensemble (T_1, s_1, T_2, s_2) le plus adapté aux données. Malgré cette procédure d'ajustement et une estimation des prélèvements par puits tenant compte du climat²⁸, le graphique ci-dessus montre que l'écart entre déstockage et bilan est rarement nul, et varie selon les années, ce qui s'explique par un mode de calcul fondé sur des moyennes, par les incertitudes sur les prélèvements des puits, sur les apports, et les possibles erreurs de relevé piézométrique...

1.4.2.2. Quels transferts entre les zones ?

Les transferts entre zones 1 et 2 et zone 2 et aval sont calculés d'après la loi de Darcy $Q = T.l.i$ où Q ($m^3.s^{-1}$) est le débit de la nappe transitant à la frontière, T ($m^2.s^{-1}$) est la transmissivité (équivalant à la perméabilité sur la profondeur mouillée de l'aquifère), i est le gradient piézométrique (rapport de la différence des niveaux piézométriques par la distance séparant les points de mesure) et l (m), la largeur de la section de transfert.

1.4.2.3. La réaction des zones aux prélèvements

La sensibilité de chaque zone de la nappe au déstockage peut être exprimée par la formule du déstockage en fonction de la porosité : $\Delta NP = \frac{V}{S.s}$ où ΔNP est la différence de niveau piézométrique (m), V le volume déstocké (m^3), S la surface (m^2) et s la porosité de la zone (%). Par ailleurs, le calcul de la diffusivité ($T.s^{-1}$) a permis d'estimer l'inertie de la nappe, c'est-à-dire son temps de latence.

Entre nappe et usages, il reste à étudier plus précisément les caractéristiques des points d'accès à l'eau.

²⁷ La bibliographie donne pour les zones 1 et 2 des valeurs de T allant de 5 à $15.10^{-3} m^2.s^{-1}$ et des valeurs de s variant entre 8 et 20% ; pour chaque zone les valeurs testées pour T sont donc 5, 10 et $15.10^{-3} m^2.s^{-1}$ et pour s , 8, 10, 15 et 20%.

²⁸ Un assolement moyen par puits a permis d'estimer les prélèvements annuels, compte tenu d'une efficacité moyenne. L'impact de la pluviométrie de chaque année sur les besoins en eau des cultures a permis d'estimer le prélèvement moyen par puits pour chaque année entre 1969 et 1998.

1.4.3. Etude des points d'accès à la ressource

Les deux grands types d'accès à la ressource en eau pour l'irrigation sont les périmètres collectifs d'irrigation, et les puits.

1.4.3.1. Comment caractériser les PPI ?

Le tableau des parcelles issu du sondage a donné lieu à un sous-tableau des parcelles en PPI. Son analyse, croisée avec celle du tableau des exploitants, a montré que les stratégies d'assolement des parcelles dépendent des caractéristiques globales de l'exploitation mais aussi du prix de l'eau et de l'efficacité de la distribution caractérisant le PPI.

Les 16 PPI de la zone étudiée (en toute rigueur, 15 périmètres publics irrigués, au moment de l'étude, et une Association d'Irrigation Collective ou AIC, celle de Melalsa, assimilée par mesure de simplification au groupe des PPI), sont d'ancienneté et de surfaces différentes (cf. annexe 2.c). L'étude des PPI s'est inspirée de la littérature existante, d'entretiens informels auprès des agriculteurs, des enquêtes du sondage réalisées en PPI et d'entretiens auprès d'interlocuteurs privilégiés²⁹. Tous les périmètres d'irrigation ont été assimilés à des PPI, y compris ceux actuellement en cours de rétrocession aux usagers. Cette transformation devrait se traduire par un contrôle du prix de l'eau par les usagers eux-mêmes, et une amélioration de la gestion et de l'efficacité de la distribution. Pour le moment, ces changements effectivement initiés à partir de 1998, semblent être surtout ressentis par les usagers en terme d'efficacité technique de la distribution³⁰, du fait d'une remise en état de l'infrastructure préalablement à la transformation en GIC, et au niveau de la rapidité d'intervention en cas de panne.

1.4.3.2. Comment caractériser les puits ?

Il était initialement prévu de mesurer la profondeur de l'eau à l'aide d'une sonde afin d'étudier les rabattements subis localement, de classer les puits selon une typologie des profondeurs d'accès, et de mesurer l'évolution durant la phase de terrain. La majorité des puits étant à sec et prolongés par des « forages à bras » (cf. photo en annexe 2.e), il aurait fallu demander à l'agriculteur de retirer le tuyau relié au groupe motopompe pour plonger la sonde dans le forage. Finalement, face aux premiers refus, l'enquête a été préférée à la mesure technique, malgré le gain de fiabilité permis par cette dernière.

²⁹ le responsable de l'arrondissement exploitation, des aigadiers, des vulgarisateurs des CRA concernées.

³⁰ Kefi (1999) ne signale pas de différence de tarif en GIC et PPI, et Faysse (comm. Pers.) signale des conséquences variables en termes d'efficacité de la gestion.

La descente au fond de 4 puits a permis de vérifier les dires des agriculteurs concernés, sur les caractéristiques techniques de leur puits (profondeur, installation de la pompe, nombre de "forages à bras" fonctionnels et abandonnés au fond du puits, nombre de faux puits indiquant un approfondissement du puits etc.).

Par ailleurs, des mesures de débit et une comparaison de la consommation d'énergie au volume annuel prélevé, estimé à partir des déclarations d'assolement, ont fourni les ordres de grandeur nécessaires à la caractérisation technique des puits.

2. A l'issue des enquêtes, un point de vue sur le système agraire étudié³¹

Le système agraire a été succinctement décrit en première partie à partir de la littérature existante. Les enquêtes ont permis de préciser cette vision générale en termes de caractérisation des exploitations et de comportement des individus, en vue de la modélisation.

2.1. Des exploitations morcelées de taille et d'accès à l'eau différents

Les agriculteurs étudiés sont tous propriétaires³². La plus grande part des exploitations sont de taille inférieure à 10 hectares.

D'après les inventaires effectués par les omdas au niveau de chaque secteur, 50% des exploitations seraient de surface inférieure ou égale à 5 hectares. Au total, 84% des agriculteurs possèderaient des exploitations de moins de 10 ha, ce qui représenteraient 52% de la surface exploitée ; tandis que 1% des agriculteurs possèdent au contraire des exploitations de plus de 50 ha, ce qui représenterait que 8% de la surface agricole utilisée.

Une même exploitation est souvent constituée de plusieurs parcelles dispersées dans l'espace.

Les exploitations comportent en moyenne 3 parcelles. Un quart des exploitations sondées ont une ou deux parcelles seulement. Le morcellement des parcelles s'explique par le processus d'héritage, par lequel chaque parcelle est traditionnellement divisée entre les fils. La dispersion des parcelles est relative : les parcelles d'une même exploitation restent en général confinées dans un périmètre restreint.

³¹ Les enquêtes approfondies, auxquelles il sera fait référence dans ce chapitre, sont brièvement résumées en annexe 2.d.

³² Sur les 300 enquêtes réalisées au total, sélectionnées à partir des listes des omdas, un cas seulement d'agriculteur sans terre a été répertorié.

Une grande part des systèmes famille-exploitation ont des revenus extérieurs fixes apportés par un ou plusieurs membres de la famille exerçant un métier hors de l'exploitation : Le sondage indique que 60% des systèmes famille-exploitation de la zone ont au moins un membre actif salarié. Sur le plan des flux monétaires, 90% des exploitants ne placent pas leur argent à la banque. En revanche, le bétail semble constituer une voie d'épargne privilégiée. D'une manière générale, les exploitants interrogés sont réticents à l'emprunt, et préfèrent à la rigueur s'adresser à leur famille, ou au crédit fournisseur.

La bibliographie sur la zone d'étude, ainsi que toutes les enquêtes et discussions informelles indiquent que "quand les fellahs gagnent de l'argent ici ils investissent dans des bêtes", pour reprendre les mots d'un fellah interrogé le 24/10/97 dans les piedmonts du Drâa Affane.

Les enquêtes préliminaires ont conduit à établir une typologie des modes d'accès à l'eau, qui départage les exploitations en six classes : (1) sans accès à l'eau, (2) avec puits, (3) avec puits et PPI, (4) PPI uniquement, (5) et (6) forage privé³³ avec ou sans PPI, dont la figure 16 présente les pôles d'agrégation.

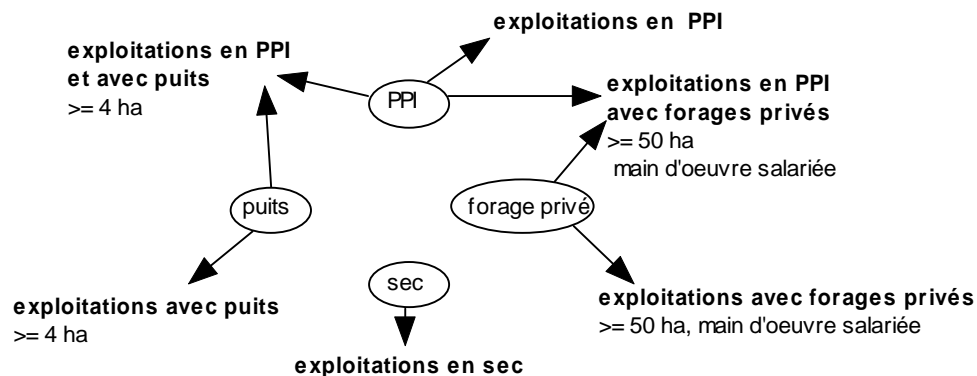


Fig. 16 : Pôles d'agrégation de la typologie préliminaire d'accès à l'eau

En général, les exploitations comportant un puits couvrent une surface d'au moins 4 hectares, sauf quand le puits est partagé. Celles qui comportent un forage couvrent des surfaces importantes, aux alentours de 50 hectares ou plus ; elles emploient de la main d'œuvre salariés, et un grand nombre d'ouvriers journaliers. En fait, le morcellement des exploitations entraîne bien souvent des situations mixtes sur le plan de l'accès à l'eau : quasiment toutes les exploitations, y compris avec forage, comprennent au moins une parcelle exploitée en sec. D'autre part, on observe souvent des agriculteurs possédant à la fois une parcelle en PPI et un puits (sur la parcelle en PPI, ou sur une autre parcelle).

³³ Le terme de forage désigne ici un captage en profondeur à fort débit, à différencier des "forages manuels" observés au fond des puits secs.

Dans ce cas, les différentes enquêtes montrent que les agriculteurs préfèrent utiliser leur puits, à l'eau distribuée par le PPI.

Parmi les quatre agriculteurs de l'enquête approfondie ayant des parcelles en PPI, trois ont construit un ou deux puits postérieurement à l'acquisition de la parcelle en PPI (E6, E14, E34), et un souhaite le faire (E9). E9 cherche à construire un puits car "le prix de l'eau dans le PPI est trop fort et on n'a pas l'eau quand on veut", c'est également l'argument avancé par E34, dont la parcelle en PPI bénéficie pourtant d'un réseau basse pression, et qui a construit son puits en association avec son voisin (et cousin). E6 affirme que l'irrigation à partir de son puits est prioritaire à l'irrigation de ses parcelles en PPI. Les visites de terrain ont par ailleurs permis d'observer à plusieurs reprises des puits construits sur des parcelles en PPI. Dans le sondage, sur les 12 agriculteurs possédant à la fois des parcelles en PPI et équipées d'un puits (il s'agit de parcelles différentes dans 10 cas), 10 ont construit leur puits alors qu'ils avaient déjà accès au PPI, ce qui conforte l'hypothèse selon laquelle les agriculteurs cherchent à construire leur propre puits, même s'ils ont déjà un accès à l'eau collectif.

En effet, les exploitants apprécient non seulement de pouvoir accéder à l'eau au moment où ils en ont besoin (certaines cultures, comme la pastèque, supportant mal les tours d'eau trop longs induits par la gestion sur demande des PPI), mais aussi d'avoir la quantité désirée, et de payer l'eau moins cher (de 15% environ, pour un puits captant une eau à 40 m de profondeur, mais sans compter l'amortissement du matériel). De plus, l'irrigation en PPI peut impliquer des pertes importantes à la distribution, ressenties par les fellahs sur le plan du prix, du débit reçu et du temps d'attente, ou des interruptions prolongées du service pour cause de panne non réparée. Enfin, les puits irriguant souvent plusieurs parcelles, comme on le verra par la suite, une mise en jachère partielle ou intégrale des parcelles par le jeu des rotations permet de cultiver sur des terres mieux fertilisées qu'en PPI.

Le sondage n'a pas interrogé de propriétaires de forages, qui représentent moins de 1% de la population agricole. La part de la population agricole concernée par les grands types d'accès à l'eau a pu être estimée par le sondage, comme le montre la figure 17 :

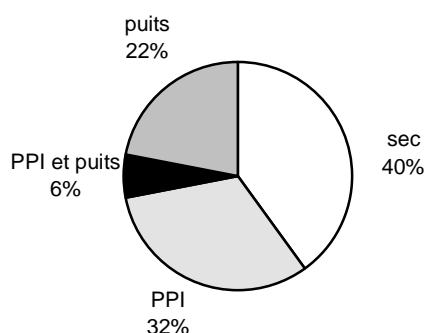


Fig. 17 : Répartition de la population en terme d'accès à l'eau. Source : le sondage.

La majorité des exploitants de la zone ont accès à l'irrigation, en premier lieu *via* les PPI. Pour la plupart, ils irriguent en gravitaire (90% des exploitants du sondage). Les autres utilisent l'aspersion (uniquement dans le PPI El Haouareb), ou beaucoup plus rarement, le goutte à goutte, dans les grandes exploitations sur forage. La distribution est souvent assurée par des tuyaux souples en polyéthylène, ce qui limite les pertes entre le point d'eau et la parcelle.

Les données de terrain montrent que les caractéristiques des puits sont assez homogènes : la majorité des pompes fonctionnent au gasoil (97% des cas d'après le sondage), elles ne sont jamais immergées et il s'agit le plus souvent de pompes à axe horizontal (dites « *pompes arabes* » en distinction aux « *pompes américaines* » à axe vertical). Les puits sont en général secs, et prolongés par des forages manuels (90% des puits seraient concernés, dans le sondage).

Les PPI sont anciens, en majorité (la plupart datent des années 1970 et certains, de 1955). Ils sont en général peu efficaces en terme de distribution de l'eau et l'eau y est distribuée "sur demande" : les exploitants retiennent une tranche horaire et doivent payer l'eau avant de la recevoir. Hormis le PPI El Haouareb, où l'eau est gérée à la demande par des réseaux sous pression et où chaque agriculteur est muni d'un compteur, les autres périmètres sont gérés « sur demande » et par des canaux à ciel ouvert, ce qui entraîne de longs tours d'eau et affecte l'efficacité de la distribution.

2.2. Les stratégies d'assolement et d'irrigation

2.2.1. Une tendance générale à la polyculture

Les parcelles menées "en sec" sont cultivées en céréales (blé dur et orge³⁴) et plantées en oliviers, ainsi qu'en amandier, dans une moindre mesure. Seul l'olivier est considéré dans la suite de cette étude, la marge brute de l'amandier étant supposée similaire. "En irrigué", il est fréquent d'observer plusieurs cultures sur une même parcelle, y compris d'une saison à l'autre. Souvent, une partie seulement de la surface totale est cultivée, l'autre partie étant laissée en jachère avant la mise en culture de plantes exigeantes en nutriments (comme la pastèque).

On trouve ainsi, outre l'olivier et les céréales, du maraîchage "d'hiver", principalement la fève, le piment d'arrière-saison et la tomate d'arrière-saison³⁵, et du maraîchage "d'été", principalement la pastèque, le melon et le piment de saison³⁶. Ces cultures n'ont pas les mêmes exigences en terme de précédents culturels. Par exemple, le piment se cultive préférentiellement après une jachère travaillée ou des céréales, tandis que la tomate se cultive après les cucurbitacées, et la fève, après les solanacées.

³⁴ Le blé dur est semé en novembre et récolté en juin ; l'orge couvre la période octobre-juin.

³⁵ La fève est semée en septembre et récoltée fraîche en janvier-février, ou sèche en mai-juin ; le piment peut être semé en novembre et récolté en mars, à condition d'être protégé, donc sous-serre, ou en intercalaire avec la fève ; la tomate peut être semée en août et récoltée en novembre, la tomate primeur couvrant plutôt la période novembre-janvier.

³⁶ la pastèque et le melon couvrent la période mars(ou avril)-juin (ou juillet), à moins d'être cultivé en primeur (de février à juin) ; le piment couvre la période mars-juin, ou juin-septembre.

Tous les agriculteurs interrogés déclarent que la pastèque, culture appréciée pour son gain monétaire potentiel, doit être cultivée sur un sol "reposé", c'est-à-dire laissé en jachère. D'après les agriculteurs interrogés, idéalement, ce sol ne devrait pas avoir été cultivé "en irrigué" depuis au moins 3 ans, pour obtenir des rendements corrects.

Les agriculteurs soutiennent en particulier que la pastèque ne doit pas revenir sur un même sol avant 3, voire 5 ans. Les techniciens de la vulgarisation agricole contestent ce propos en affirmant que "si les fellahs ont ces pratiques, c'est qu'ils gèrent mal leur fertilisation".

Ces successions culturales sont permises par la composition diversifiée de la sole cultivée, par la mise en jachère d'une partie de la parcelle (dont le taux de surface irriguée dépasse rarement 70%), ainsi que par une rotation des cultures entre parcelles lorsque c'est possible. Ajoutons que le maraîchage et les céréales sont souvent cultivés entre les oliviers, l'espacement intercalaire étant assez large (entre 10 et 20 mètres), ce qui d'après les agriculteurs permet aux oliviers de bénéficier de l'eau d'irrigation apportée à ces cultures : 71% des parcelles plantées en oliviers sont cultivées en intercalaire. Enfin, une minorité d'exploitations pratique l'arboriculture fruitière (distinguée de l'olivier dans cette étude), essentiellement composée d'abricotiers et de pommiers : le sondage indique que 4% des exploitations sont concernés. Par contre, les cultures intercalaires sont rarement pratiquées entre ces arbres fruitiers.

Ce choix de polyculture permet de minimiser les risques économiques et phyto-sanitaires, de valoriser la diversité des parcelles (en termes de qualité de sol, de distance au logement, etc.), de limiter les apports en intrants et de satisfaire partiellement les besoins alimentaires de la famille.

Les enquêtes indiquent que la composition culturale de la sole irriguée dépend du type d'accès à l'eau (réseau collectif ou accès privé), du statut de la terre (faire-valoir direct ou indirect), de la marge brute espérée par hectare³⁷, de la taille de la parcelle et de la surface irrigable dans l'exploitation.

Les sols lourds, plutôt situés en amont de la plaine, sont plus favorables aux céréales, tandis que les sols légers, plutôt situés en aval, sont plus favorables aux arbres fruitiers. Néanmoins, l'arboriculture fruitière se trouve également dans certaines exploitations de l'amont ou du centre de la zone (enquêtes approfondies E21, E34, enquêtes préliminaires E3, E10, E27, E24...), et le sondage montre que les céréales sont cultivées dans toute la zone. Pour simplifier, les choix culturaux sont supposés dépendre essentiellement des facteurs eau, surface irrigable, statut.

³⁷ La marge brute espérée est calculée en référence à un climat moyen et en l'absence d'aléas défavorables.

Enfin, il ressort du sondage et des enquêtes approfondies qu'une parcelle supposée en jachère peut dans les faits être cultivée en céréales de manière extensive, sans apport d'intrants, et avec une petite irrigation d'appoint en cas de déficit pluviométrique³⁸.

Les fluctuations interannuelles du marché semblent peu influencer le choix des cultures. En outre, les habitudes (alimentaires, de gestion), l'usage de techniques rodées et l'existence de débouchés connus induisent une certaine inertie dans les choix cultureux. A l'inverse, les prix sont assez fluctuants à l'échelle intra-saisonnière. Avec les risques climatiques (en été le vent du sud ou sirocco, par exemple) et phytosanitaires, ces fluctuations semblent avoir un impact important sur le revenu.

"La pastèque peut être ravagée par des maladies, et si on la récolte à une mauvaise période, le prix peut passer de 700 à 150 mil/kg, mais on continue à en faire car ça se vend bien, les gens viennent l'acheter sur place." Enquêtes informelles du 21/10/97 auprès du vulgarisateur de la CRA de Sidi Ali Ben Salem, du chef de la CTV de Chébika, et de plusieurs agriculteurs.

Ces aléas sont pris en compte par les agriculteurs dans les dates de semis. Par exemple, avancer la culture de la pastèque peut permettre de vendre la production avant une éventuelle chute des prix, et d'éviter les conséquences dramatiques du sirocco qui peut survenir vers l'époque de la récolte. Cependant, ces adaptations tactiques s'écartent pas le risque d'un mauvais produit brut. Malgré cela, une majorité d'agriculteurs pratique ces récoltes.

Finalement, on peut penser que la composition de la sole cultivée d'une exploitation varie essentiellement en fonction de son accès à l'eau. Pour simplifier, on considérera par la suite que **la composition spécifique de la sole cultivée est invariable sur les parcelles de même "type"**, en référence aux facteurs de variation évoqués plus haut. A l'inverse, **la proportion de sole irriguée³⁹ des parcelles est susceptible de varier** non seulement en fonction de l'accès, mais aussi de la situation socio-économique des exploitants.

2.2.2. Des stratégies d'irrigation différentes selon le type d'accès à l'eau

Le puits est en général utilisé au maximum de sa capacité, compte tenu de la surface disponible, et irrigue souvent plusieurs parcelles. La plupart des agriculteurs dotés d'un puits cherchent à prendre une parcelle "reposée" en faire-valoir indirect (FVI), où ils peuvent cultiver plus intensivement que sur leur propre parcelle, n'étant pas contraints par les rotations interannuelles.

³⁸ Ce constat ressort des enquêtes approfondies E8 et E6, et de discussions informelles.

³⁹ La sole irriguée désigne ici la partie irriguée de la parcelle.

Les cas de diminution de surface irriguée par un puits paraissent très rares malgré la baisse de la nappe (un cas parmi les 80 propriétaires de puits rencontrés). A partir d'un puits "il faut irriguer le plus possible, même si l'eau coûte cher, même si on est endettés" Enquête E8. A la question du sondage "qu'allez vous faire si la nappe continue de baisser?", très peu ont déclaré avoir l'intention de diminuer leur prélèvements (5%). Dans les enquêtes de (Ben Hamouda, 1999), menées dans une zone où l'abaissement a été plus ressenti que dans la zone d'étude, 2 cas seulement de diminution de la surface irriguée ont été recensés, sur 70 enquêtes.

Les agriculteurs cherchent en premier lieu à cultiver la pastèque, réputée fructueuse malgré les nombreux aléas qu'elle subit. "Le fellah qui n'a que des terres en PPI cultive un peu de tout, celui qui a un puits préfère cultiver le maraîchage avec son puits, d'abord sur les terres louées autour du puits, sinon sur sa terre s'il n'a pas le choix" (enquêtes informelles du 21/10/97 auprès du vulgarisateur de la CRA de Sidi Ali Ben Salem, du chef de la CTV de Chébika et de plusieurs agriculteurs)

Toutefois, on suppose que si la marge brute que l'exploitant espère dégager de son puits est négative, ou si l'exploitant est endetté à la fois sur le long terme et sur le court terme, le puits n'est utilisé que pour une irrigation de complément des céréales, et seulement sur la parcelle qu'il occupe. Finalement, on considérera pour la modélisation que le taux d'irrigation et le choix des parcelles irriguées par un puits dépendent - si la situation économique de l'exploitant le permet - de la capacité d'irrigation du puits, du statut des parcelles (une parcelle prise en FVI peut être entièrement irriguée), et de la présence dans le voisinage de parcelles "reposées" appartenant au propriétaire du puits.

En PPI, le taux d'irrigation d'une parcelle est supposé dépendre de sa taille, des conditions économiques de l'exploitant, mais aussi de la marge brute que l'exploitant peut espérer tirer de sa parcelle, compte tenu de l'efficacité de distribution du PPI : il diminue progressivement et proportionnellement à la marge brute espérée, ce qui exprime le fait que l'irrigation en PPI, plus difficile à gérer et plus risquée du fait de la longueur des tours d'eau, des pannes ou autres incidents, est plus exigeante qu'à partir d'un puits. Par ailleurs, si l'agriculteur en PPI possède un puits, il utilise préférentiellement celui-ci. Lorsque la marge brute espérée n'est pas suffisamment attrayante, il cultive sa parcelle en PPI "en sec" (avec une irrigation d'appoint pour les céréales).

Ces hypothèses ont été établies sur la base des enquêtes approfondies E6, E9, E11, E14 et E34, d'entretiens. Par ailleurs, le sondage révèle que 26% des agriculteurs en PPI ont globalement diminué leurs prélèvements (en arrêtant par exemple de cultiver l'été). Les raisons invoquées sont d'abord le coût élevé de l'eau, puis les contraintes liées à l'irrigation (horaires rigides, débit insuffisant). "Dans le PPI de Sidi Ali Ben Salem I, des hommes sont partis travailler hors de l'exploitation car l'eau est devenue trop cher : l'irrigation n'est plus rentable. La famille reste pour exploiter en sec" (enquête informelle du 28/4/98).

Une fois prises les décisions d'irrigation sur les différentes parcelles, une partie des actifs familiaux non sollicités par les travaux sur l'exploitation se constitue en main d'œuvre ouvrière à l'extérieur, dans un objectif de diversification des revenus de l'exploitation⁴⁰. Le recours à la main d'œuvre journalière est fréquent dans les exploitations irriguées : d'après le sondage, les exploitations emploient 2 journaliers en moyenne, en période de pointe. Les différentes enquêtes ont conduit à supposer que le marché de la main d'œuvre journalière est dynamique et assez souple, dans le sens où la main d'œuvre est facilement employée par une offre importante. Le prix de la journée de travail ne semble pas varier en fonction de l'offre et de la demande (5 DT/jour). Par ailleurs, les fellahs se constituent aussi maçon ou peintre en ville, le tarif étant le même que pour les travaux agricoles. Il arrive que des membres de la famille quittent le ménage pour partir à Sousse ou à Monastir où les travaux en bâtiments sont mieux rémunérés, mais on considère alors qu'ils ne font plus partie du ménage, même s'ils peuvent contribuer par des aides ponctuelles, à son fonctionnement.

2.3. Un objectif commun : l'acquisition ou l'extension de l'irrigation privée

Les enquêtes indiquent que la majorité des exploitants cherche à acquérir un puits, ou à étendre leur surface irriguée (sauf les exploitants seuls, le plus souvent des individus âgés et sans héritage ou des veuves). Cet objectif commun peut s'expliquer par la nécessité de minimiser les aléas climatiques, pour les agriculteurs "en sec". Les agriculteurs en PPI, eux, cherchent par ce moyen à disposer d'un accès à l'eau plus "sûr" en termes de gestion, d'efficience et de prix de l'eau, leur permettant notamment de cultiver des espèces exigeantes sur le plan de doses et fréquences d'irrigation. D'une manière générale, le puits est perçu comme un moyen d'enrichissement ; il s'agit d'un modèle partagé de réussite sociale, amplifié par la pression du voisinage.

Les enquêtes approfondies ont conduit à définir différentes trajectoires possibles en terme d'évolution de l'accès à la ressource en eau, parfois liée au foncier, synthétisée par la figure 18.

⁴⁰ La proportion des actifs familiaux disponibles qui travaillent temporairement à l'extérieur est déterminée sur la base des données du sondage (voir annexe 3.I).

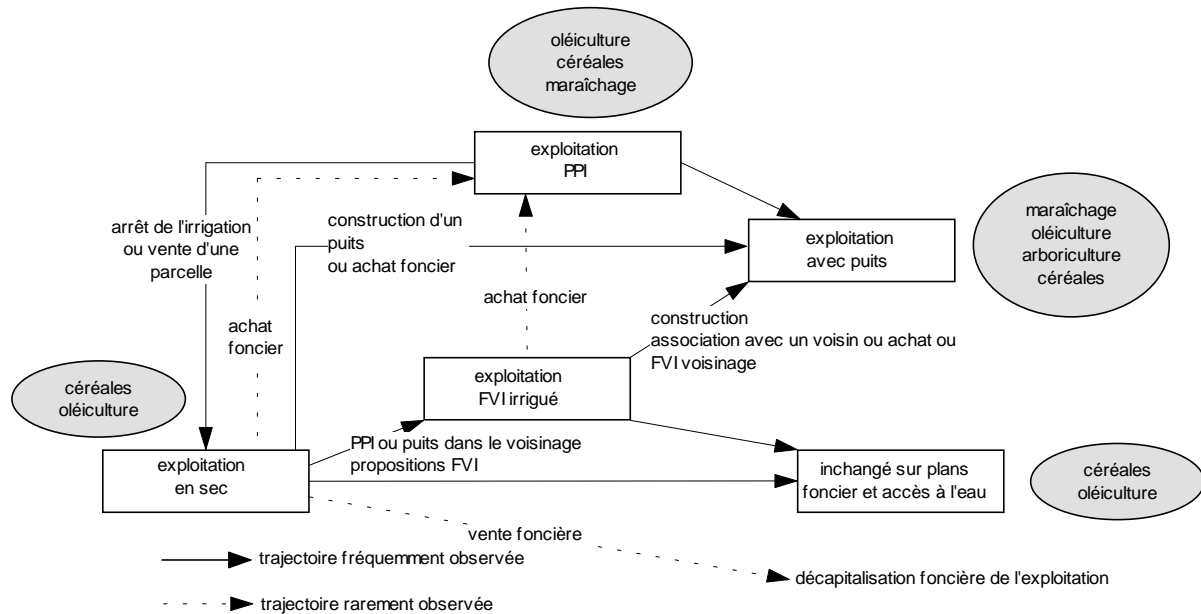


Fig. 18 :Trajectoires possibles en termes d'évolution foncière et d'accès à l'eau. L'arrêt de l'irrigation en PPI peut être dû à une combinaison du prix de l'eau vendue, d'une mauvaise efficacité, de conditions économiques défavorables de l'exploitation ; Cette "réversibilité" n'a pas été observée au niveau des puits.

Le passage d'une exploitation "en sec" à une exploitation irriguée par le biais du FVI, par la construction d'un puits ou par l'achat d'une parcelle (plus rare, puisque le marché foncier est peu dynamique), est plus fréquent pour les exploitations moyennes et grandes (qui peuvent même être conduites à construire un forage privé, ou plusieurs puits), sans être pour autant impossible dans le cas des petites exploitations. Les questions posées aux agriculteurs portent sur les déterminants de ces changements, principalement sur les facteurs qui les incitent à investir dans un puits, et sur les paramètres susceptibles d'induire une variation interannuelle de leurs prélèvements.

Ainsi, selon leurs conditions familiales (nombre d'actifs, revenus extra-agricoles, stratégies familiales), parcellaires, spatiales, les agriculteurs tentent de passer d'une classe d'accès à l'eau à une autre, plus ou moins temporairement. Conditionnées à la fois par les caractéristiques de l'exploitation et de l'environnement, les stratégies mises en œuvre ne paraissent pas confinées à des types d'agriculteurs figés, mais peuvent être mobilisées par tous, selon leur situation.

2.4. Plusieurs types d'échanges fonciers

Les exploitations sont souvent en faire-valoir mixte : les agriculteurs de la zone pratiquent largement le faire-valoir indirect (FVI), tout en conservant en faire-valoir direct (FVD) une partie de leurs parcelles. Un agriculteur peut donc à la fois exploiter une parcelle en FVD, donner une parcelle en FVI, et prendre une parcelle en FVI.

Sur les 11 exploitations de l'enquête approfondie, 10 sont impliquées dans un échange foncier. Le sondage indique que 35% des exploitations sont impliquées dans des échanges en FVI. La totalité des agriculteurs concernés exploitent leurs parcelles en faire-valoir mixte.

Ceci s'explique par le fait que les parcelles ont des intérêts différents aux yeux des agriculteurs. Par exemple, un agriculteur à la fois propriétaire d'une parcelle en PPI et d'un puits aurait tendance à délaisser la première au profit de la seconde. Il peut chercher à donner la parcelle en PPI, en FVI, et à prendre une parcelle au voisinage de son puits en FVI, surtout si celle-ci n'a pas été irriguée depuis au moins 3 ans, afin d'y cultiver intensivement du maraîchage.

Plusieurs types de faire-valoir indirect sont rencontrés dans la zone (cf. première partie, § 2.2.2.3) : la location, minoritaire, et le métayage, qui comprend une grande diversité de contrats possibles (la plupart du temps il s'agit de contrats oraux), le plus souvent à court terme, et dans l'environnement proche des parcelles des agriculteurs.

Les contrats de location concernent 9% des échanges en FVI d'après le sondage. Environ 75% des agriculteurs interrogés lors du sondage qui prennent ou donnent en FVI irrigué le font sur la base de contrats d'un ou deux ans.

Le métayage comprend :

- la *khemassa*, ou « association au 1/5 » si le métayer fournit l'accès à l'eau, avec une variante par rapport au schéma classique de la *khemassa* puisque le métayer fournit les moyens de production et prend les 4/5 du produit brut,
- la *dhehara* ou « association 50-50 » en général lorsque le propriétaire fournit l'accès à l'eau (cf. annexe 3.h le calcul des marges brutes en FVI). Un agriculteur muni d'un puits recherche préférentiellement un contrat de type *khemassa*, tandis qu'un agriculteur sans accès privé à l'eau recherche un contrat de type *dhehara*. La recherche de parcelles sans accès à l'eau, à irriguer par le preneur, est axée sur les parcelles neuves ou reposées depuis 3 ans ;
- la *mouzaraâ* : une parcelle d'au moins 15 hectares non équipée d'un puits et non irriguée, est donnée en FVI pendant 4 ans au métayer, à condition que celui-ci

l'équipe d'un puits. Le métayer profite intégralement des productions, et restitue la parcelle équipée à son propriétaire au terme du contrat⁴¹.

La *mgharsa*, décrite en détails en première partie, ainsi que les échanges en FVI portant sur des parcelles non irriguées, ont été considérés comme marginaux dans la zone d'étude.

Ces hypothèses sur les modes d'association proviennent des enquêtes approfondies (E6, E9, E14, E20, E17, E21, et E11), et des détails fournis par certaines enquêtes du sondage. Celui-ci montre que 85% des échanges en FVI obéissent à cette règle, tandis que 5% des contrats sont de type location, les autres 5% étant de type divers. La prise en FVI d'une parcelle implique sa mise en jachère préalable pendant au moins 2 ans, selon E34, 3 ou 4 ans selon E20. Les discussions informelles aboutissent aux mêmes ordres de grandeur : "on cultive la pastèque sur un sol qui a reposé pendant au moins 3 ans ; il y a tout un marché des terres reposées, car la pastèque rapporte énormément, même si elle coûte cher en intrants" (omda du secteur de Sidi Ali Ben Salem, 14/10/97). "Le phénomène du métayage est apparu avec les puits et l'engouement pour les pastèques car les gens recherchent des terres neuves ; l'information sur les terres circule de bouche à oreille dans les cafés" (E40, 14/4/98).

Le FVI permet aux agriculteurs de s'affranchir des contraintes structurelles qui limitent leur accès à l'irrigation. Il peut donc avoir un impact important sur la dynamique d'apparition et d'usage des puits.

La sole irriguée semble fortement influencée par ces stratégies d'échanges fonciers. La culture de la pastèque en particulier, très demandeuse en eau et très attractive du fait de sa forte valeur ajoutée est prioritairement pratiquée en FVI.

Les enquêtes révèlent que les parcelles en FVI sont cultivées plus intensivement qu'en FVD, et que leur assolement est composé de pastèque (considérée comme une culture minière) pour une plus grande part.

Les données d'enquêtes ont conduit à supposer que :

- **le donneur en FVI est propriétaire d'au moins deux parcelles**, à moins d'être dans une situation extrême sur le plan économique ;
- **l'exploitant propose une parcelle en FVI lorsque ses facteurs de production sont limitants** (main d'œuvre insuffisante par rapport à la surface à cultiver et trésorerie insuffisante pour employer des temporaires), ou s'il est seul ;
- **la présence d'un puits fonctionnel dans l'exploitation motive la recherche de parcelles neuves ou mises en jachère dans le voisinage**, à condition toutefois que la situation économique ne soit pas limitante (cette stratégie est supposée

⁴¹ Les considérations sur ce type d'association proviennent surtout des enquêtes E40 et E21, et de discussions avec les techniciens du CRDA : l'agriculteur pratique lui-même ce genre de stratégie ; il peut aller chercher les terres assez loin, et prétend que la parcelle doit faire au minimum 15 ha pour que cette opération soit rentable.

compatible avec une situation d'endettement jusqu'à un certain seuil⁴²), et que la main d'œuvre ou la capacité de trésorerie permettent d'assumer une parcelle irriguée supplémentaire.

C'est ce qu'on fait ressortir les enquêtes approfondies E11, E14, E17, E34 et les cas de 29% des propriétaires de puits du sondage. Le fait que les 71% complémentaires ne prennent pas de parcelle en FVI à irriguer avec leur puits malgré l'hypothèse posée peut s'expliquer par l'absence de propositions intéressantes (pour au moins 13% d'entre eux) ou par une limite en main d'œuvre (moins de 1 actif par hectare irrigué).

Le faire-valoir indirect permet également aux propriétaires non-résidents de faire exploiter leurs parcelles. Les terres des non-résidents, qui représentent 14% de la surface totale (il s'agit de parcelles de 0,5 à 82 hectares), sont exploitées à 91% (les 9% restants sont laissées en jachère) par FVI, par gestion déléguée, ou par arrangement familial. Mais pour simplifier, les non-résidents ne seront pas considérés dans la construction du modèle.

Enfin, les enquêtes et entretiens informels indiquent que les exploitants sont très réticents à la vente de leur terre : "la terre, c'est l'honneur" déclarent-ils unanimement. Seulement 3% des personnes interrogées dans le sondage ont vendu une de leur parcelle, apparemment dans des situations de fort besoin. Par ailleurs, il semble que les agriculteurs sans terre soient rares dans la zone.

2.5. La construction et l'approfondissement des puits

La construction des puits procède surtout par imitation : la présence dans leur voisinage proche de puits dont les propriétaires "réussissent" indique aux exploitants que la nappe est accessible, que la construction est rentable, et les incite à suivre un modèle de réussite agricole et donc sociale.

La comparaison des dates de construction des puits (issues des 82 puits du sondage) indique des similarités de voisinage. Les techniciens du CRDA confirment une occupation de l'espace par les puits par zones successives. Ainsi, la région d'Ouled Zaier (au nord-ouest de la zone d'étude) aurait été "colonisée" par les puits de la zone par diffusion, depuis 1995. Par ailleurs des observations de terrain conduisent à supposer que le même phénomène survient dans la région de Houffia (au nord-est), depuis 1998 (confirmé par une tournée de terrain en 2000). "Les voisins attendent le résultat de ce puits pour faire de même si ça marche", raconte un agriculteur de la zone des piedmonts du Drâa Affane (sud-ouest de la zone, non colonisée par les puits), en cours de construction d'un puits (24/10/97). Six constructions de puits par "imitation" ont été observées directement sur le terrain. Enfin, parmi les enquêtes approfondies, la plupart des puits ont été construits par "imitation". "Personne n'accepte plus de cultiver en sec quand les voisins ont l'irrigation" (Enquête approfondie E4).

⁴² Le sondage montre qu'un agriculteur peut prendre des terres en FVI depuis plusieurs années tout en étant endetté.

Si leur parcelle est de taille suffisante, et s'ils possèdent suffisamment d'argent, les exploitants tentent de construire un puits.

La taille de la parcelle où est construit le puits doit être de 5 hectares au moins, d'après les enquêtes approfondies E6 et E14. Le sondage indique que la surface minimale des parcelles dotées de puits est supérieure à 4 hectares. Compte tenu des possibilités d'emprunt à la famille élargie et du recours au crédit fournisseur, l'épargne devrait être disponible à hauteur d'au moins 60 ou 65% du prix du puits à construire, selon des enquêtes informelles.

Toutefois, le sondage laisse penser que la construction d'un second ou d'un n^{ème} puits se fait moins facilement que pour un premier : les trois quart des propriétaires de puits n'ont qu'un puits.

La construction des puits par imitation peut être déclinée selon plusieurs modes : le puits peut être construit par un exploitant seul, en association avec un voisin, sur une parcelle en PPI, sur une parcelle prise en FVI (par le contrat de la *mouzaraâ*) et sur une petite parcelle (de taille inférieure à la taille standard), si dans le voisinage des parcelles reposées peuvent être irriguées par le puits en FVI.

5% des puits du sondage ont été construits en association ; c'est également le cas de l'enquête approfondie E34.

Plusieurs puits ont été observés sur le PPI de Chébika Est par (Peythieu, 1998) ; plusieurs cas ont été observés également lors des tournées de terrain.

La construction d'un puits sur une parcelle compte tenu des offres potentielles en FVI a été observée dans l'enquête approfondie E34, et confirmée par des enquêtes informelles.

Il arrive également que des agriculteurs plus téméraires que la moyenne s'aventurent à construire un puits dans une zone dépourvue de puits, au risque de ne pas accéder à l'eau.

Deux agriculteurs ayant pris ce risque avec succès ont été interrogés de manière informelle. La plupart du temps, il semble que ce risque a été pris lorsque la présence d'un puits très ancien non fonctionnel dans le voisinage indiquait un captage par le passé. D'autre part, les exploitants auraient souvent recours à un sourcier pour s'assurer de l'accessibilité de l'eau à une profondeur raisonnable.

En fait, toute entreprise de construction d'un puits comporte un risque d'échec, lié comme on l'a déjà vu à la structure lenticulaire de la nappe, et à une profondeur limite de construction, au-delà de laquelle les techniques actuelles de creusage ne permettent pas de descendre. Cette profondeur serait d'environ 70 m, d'après des entrevues avec un entrepreneur de "forages à bras" et avec des maçons constructeurs de puits, confirmées par les dires des agriculteurs. Le risque d'échec est supposé démultiplié lorsqu'aucun puits n'est présent dans le voisinage pour indiquer une profondeur accessible et l'absence de lentille imperméable.

L'enquête approfondie E20 donne le cas de deux frères qui ont tenté la construction d'un puits dans une zone isolée, tentative qui débouche apparemment sur un échec : le puits a atteint 70 mètres de profondeur et n'a "toujours pas rencontré l'eau".

Les paysans s'adaptent à l'abaissement de la nappe en approfondissant leurs puits. Ils semblent peu sensibles à l'augmentation des coûts d'accès (construction des puits et coûts d'exhaure). Ils ne sont pas non plus sensibles à l'instauration de la zone de sauvegarde, contournant allègrement la réglementation en vigueur : aucune demande d'autorisation n'est effectuée, alors que tous savent qu'elle est obligatoire.

Tous les propriétaires de puits rencontrés à ce stade déclarent qu'ils approfondissent leur puits sans hésiter lorsque le débit devient trop faible. D'autre part, les responsables des CTV et CRA n'ont pas noté de changement dans les assolements, qui pourrait être lié à une augmentation du coût de l'eau. Les puits continuent de "proliférer", malgré l'abaissement de la nappe. Enfin, les agriculteurs savent qu'ils sont en "zone rouge" mais déclarent que ça ne les empêche pas de creuser un puits ou d'approfondir le leur et qu'ils ne craignent pas les mesures de contrôle de l'administration.

L'approfondissement des puits est soumis au même risque d'échec que la construction, mais le seuil technique d'approfondissement va jusqu'à 90 mètres, seuil fixé sur la base d'une discussion avec un entrepreneur de forages manuels.

2.6. D'autres interactions en jeu ?

Barreteau (1998) a montré que les interactions sociales entre agriculteurs d'un même périmètre irrigué, même lorsqu'elles sont exogènes au périmètre, ont un impact sur la viabilité du système irrigué. Ce type d'entraides semble peu fréquent, encore moins institué, une tendance à l'individualisme étant au contraire déplorée par les agriculteurs, et observée par les techniciens agricoles.

"La mentalité a changé, et les gens ne s'aident plus autant qu'avant !". Réflexion entendue à plusieurs reprises, lors de discussions informelles.

Les enquêtes effectuées dans le cadre de ce travail *concluent à l'absence, au-delà du cercle familial, de réseaux sociaux spécifiques pouvant influencer la demande en eau des agriculteurs*. Aucune autre source de données n'est disponible à ce sujet dans la zone d'étude ; cette question mériterait néanmoins d'être encore creusée. Les échanges fonciers et les constructions de puits en association impliquent une certaine relation de confiance. Souvent, les constructions de puits en association ont lieu entre frères ou cousins, devenus voisins par le jeu des héritages, alors que les échanges fonciers semblent au contraire éviter le réseau familial proche. Hormis la confiance ou la méfiance inégalement développée entre

voisins, membres d'une même famille ou à plus long terme, entre propriétaire et métayer. De plus, l'eau ne se vend pas entre agriculteurs dans cette zone.

"ça ne se fait pas", d'après les agriculteurs interrogés à ce sujet.

Elle peut faire ponctuellement l'objet d'échanges de service, le plus souvent au sein d'une même famille. Ce point, apparemment mineur, n'a pas été approfondi. Finalement, les règles d'action des agriculteurs en termes d'échanges fonciers, d'accès à la ressource et d'utilisation de l'eau dépendent essentiellement de leur environnement, de leur conditions socio-économiques, parcellaires et de leurs interactions avec leur voisinage. Ceci revient à supposer que tous partagent une perception similaire du monde et adoptent le même type de stratégie.

Par exemple, le raisonnement suivant est souvent entendu : "je construis un puits, je cherche d'abord à irriguer les parcelles des voisins en FVI pour faire de la pastèque, j'irrigue moins mes parcelles en PPI si j'en ai (éventuellement je les donne en FVI à un voisin), je cherche à acheter de la terre et à construire un autre puits, quand je n'ai pas de terres à irriguer en FVI j'irrigue ma propre parcelle. Si la nappe descend, j'approfondis mon puits" (enquêtes E11, E9, E8, E6, E40, E4, E34, E14).

La mise en commun des connaissances acquises sur le système agraire et des données sur la ressource permet de construire une vision globale de la zone d'étude, et de mieux percevoir les dynamiques en jeu.

2.7. Les grandes dynamiques du système

Cette étude du système permet déjà, avant même la construction du modèle, d'entrevoir les principaux mécanismes en jeu, et de poser des hypothèses préliminaires sur les variables clés de la dynamique.

Le croisement des données d'enquêtes et des données sur la nappe conduit à retracer l'évolution du système selon plusieurs indicateurs, comme le montre la figure 18 :

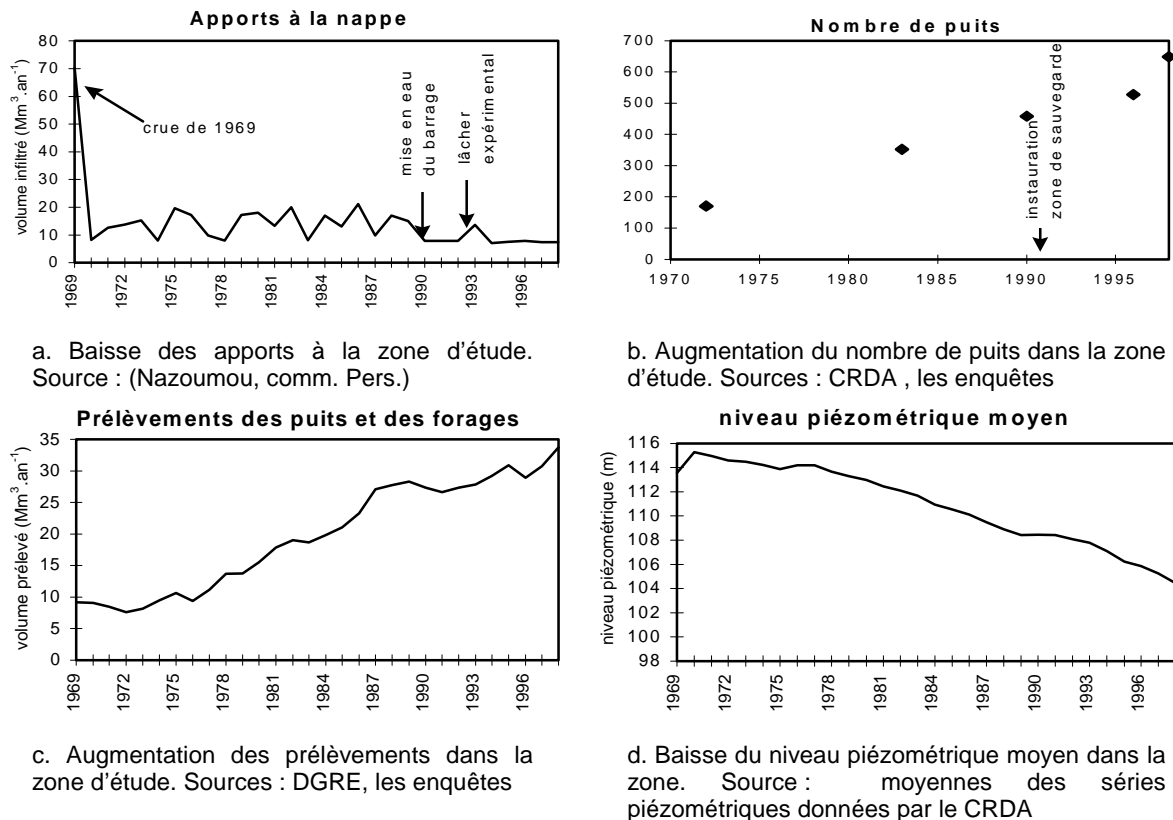


Fig. 18 : Les grandes dynamiques du système étudié.

Hormis la crue de 1969 et avant la fermeture du barrage El Haouareb, les apports à la nappe sont irréguliers, approximativement compris entre 10 et 20 millions de mètres cubes par an (graphe a), alors que celle-ci s'abaisse de manière continue (d), et ceci, parallèlement à l'augmentation du nombre de puits (b). et par conséquent des prélèvements (c) La comparaison de ces évolutions semblent confirmer que la dynamique d'apparition des puits joue un rôle important dans l'abaissement de la nappe, et qu'elle n'est pas sensible à l'instauration de la zone de sauvegarde.

La recherche de types de stratégies de gestion de l'eau a mis en évidence un jeu de

stratégies différentes, mobilisables par tous les agriculteurs, selon leur situation⁴³. Le comportement des agriculteurs est caractérisé comme suit :

- tous cherchent à améliorer, au minimum à maintenir leur revenu agricole, pour satisfaire les besoins familiaux et améliorer leur assise sociale, par des investissements agricoles ou familiaux tels que la construction d'une maison, le mariage des enfants, les pèlerinages... ;
- dans ce sens, pour pallier le déficit pluviométrique et les insuffisances de l'irrigation en périmètre collectif, ils cherchent à construire leur propre puits (hormis les agriculteurs célibataires et sans héritier), ce qui correspond au modèle collectif de réussite sociale, sinon à accéder à l'irrigation *via* le faire-valoir indirect ;
- cependant, par prudence, ils ne s'aventurent dans cet investissement que lorsque leur surface parcellaire est suffisante, lorsque des puits fonctionnels dans le voisinage indiquent que la nappe est accessible ; si leur parcellaire ou leur situation économique est limitante, ils cherchent à construire un puits en association avec un voisin ;
- selon leur situation économique et familiale, les agriculteurs cherchent à prendre ou à donner des parcelles en faire-valoir indirect ; ces échanges ont un impact sur leur situation économique et sur leur surface irriguée ;
- les prélèvements entraînent un abaissement général de la nappe, dont l'impact sur la stratégie des agriculteurs est indirect et peu significatif.

Mentionnons ici la réaction obtenue lors du sondage à la question adressée aux propriétaires de puits "qu'allez vous faire si la nappe continue de s'abaisser" : pour la plupart ils sont décidés à poursuivre l'approfondissement de leur puits, en ayant recours éventuellement à la micro-irrigation si l'Etat subventionne les équipements. Très peu évoquent la possibilité d'avoir recours à des cultures moins consommatrices, ce qui s'explique par le fait que les cultures actuellement pratiquées sont très valorisantes.

La vision d'ensemble retenue de ces enquêtes est celle d'une transition en cours, d'une « agriculture familiale de subsistance », reposant sur les céréales, l'olivier et le cheptel ovin, telle que décrite par Hassainya (1987) à une agriculture familiale en irrigué. Celle-ci est beaucoup plus intégrée au marché, grâce à la culture du maraîchage ou aux arbres fruitiers, mais elle fonctionne toujours sur la base d'une fusion famille-exploitation en termes de circulation monétaire, de consommation, de travail et d'objectifs, et reste fidèle aux cultures

⁴³ L'interprétation faite ici des stratégies agricoles déterminées par les conditions se démarque de celle d'Aubry *et al.* (1988) qui dans leur étude des exploitations agricoles de Zaghouan, attribuent surtout les différences de trajectoires à des niveaux variés d'attachement à la terre et d'exigence quant aux modes de consommation.

traditionnelles, en irrigué ou en sec. Cette juxtaposition permet au fellah « *de se prémunir contre le risque d'échec des cultures irriguées, de réaliser, bon an mal an, son objectif de subsistance et d'avoir un pouvoir d'achat sur le marché. C'est cette modalité d'adoption de l'irrigation qui est le plus souvent préférée.* » (Hassainya, *op. cit.*).

Sidi Bouzid, région proche de Kairouan, est également une ancienne zone aride d'élevage bouleversée par l'introduction des PPI et des puits. Le nombre de puits y connaît aussi une croissance exponentielle, d'où il résulte une surexploitation de la nappe. L'analyse menée par Daoud (1996) dans cette région conforte les conclusions issues des enquêtes effectuées ici sur le comportement des agriculteurs, par exemple leur préférence pour les puits par rapport aux PPI, du fait de la mauvaise efficacité, des pannes et incidents, des problèmes de gestion et du prix de l'eau, dont se plaignent les usagers dans ces derniers.

L'adoption de l'irrigation implique selon Hassainya (1987) un risque technique, dû en particulier à la difficulté d'apprentissage et d'adaptation aux nouvelles techniques, et à la méconnaissance du marché. La tendance des agriculteurs de la plaine de Kairouan à adopter l'irrigation, malgré ce risque théorique, peut s'expliquer par le fait que le faire-valoir indirect et l'emploi de main d'œuvre agricole journalière constituent un apprentissage informel pour les agriculteurs en sec, par le modèle de réussite sociale que constitue l'accès à l'irrigation, et par le climat rude de la région, qui motive l'acquisition d'une irrigation sécurisante. De plus, certaines régions de la plaine de Kairouan connaissent l'irrigation depuis longtemps, du fait des syndicats d'inondation qui existaient avant la mise en eau des barrages.

Décrivons à présent la manière dont les différents processus issus de ces données ont été formalisés dans le modèle SINUSE.

3. SINUSE, Simulateur des Interactions entre Nappe et USages de l'Eau

Le présent chapitre s'attache à présenter les principes de base du modèle, sa structure et son fonctionnement, c'est-à-dire les principaux processus du modèle. Les choix opérés pour la modélisation proviennent des données et suppositions présentées antérieurement.

Par commodité, les agents exploitants seront souvent appelés "exploitants", les objets parcelles, "parcelles", les objets puits, "puits" etc., la suite de ce travail se référant essentiellement au monde artificiel du modèle.

3.1. L'hypothèse forte du modèle

Le modèle SINUSE se démarque des modèles classiques nappe/usages par la représentation du comportement individuel des usagers sur la base de règles d'action observées (et non d'un modèle micro-économique standard). L'hypothèse centrale du modèle considère que **la dynamique globale du système provient essentiellement des interactions directes et indirectes entre agriculteurs, à propos de la nappe**. Autrement dit, les processus que constituent l'imitation, les échanges fonciers, les associations, ainsi que l'effet rétroactif induit par l'abaissement de la nappe en réaction aux prélèvements, ont un effet important sur l'évolution du système. La formalisation des comportements suppose que globalement, les agriculteurs de la région sont mus par un même objectif : **ils cherchent à cultiver en irrigué, si possible à partir d'un puits. Les stratégies déployées pour atteindre cet objectif sont fonction des conditions locales** : hormis la diversification des revenus de la famille par des salaires fixes - caractéristique des exploitations fixée à l'initialisation du modèle, les règles d'action des exploitations dépendent de leurs conditions familiales, économiques, parcellaires, de leur voisinage et d'un ensemble de valeurs, de normes et de perceptions propres à la zone agraire et implicitement défini dans le modèle.

3.2. Entités et initialisation du modèle

Le modèle SINUSE, programmé en langage orienté objet SMALLTALK sur la plate-forme de simulation CORMAS⁴⁴ (Bousquet *et al.*, 1998), vise, par la formalisation de comportements individuels à partir des données de terrain, à faire émerger la dynamique globale observée dans le système réel.

⁴⁴ CORMAS (Common-pool resources and multi-agents systems) est un programme développé dans l'environnement de programmation Visualworks®.

Les systèmes multi-agents ne préjugent pas du choix de la plateforme de modélisation (SWARM, STARLOGO, CORMAS, programmation directement en langage objet JAVA, etc...). Celui de CORMAS se justifie ici par rapport au contexte d'étude. Spécialement conçue pour l'étude des dynamiques à l'interface entre ressources naturelles et sociétés, cette plateforme, et tout le savoir qui entoure l'apprentissage de son utilisation, capitalise un grand nombre d'expériences dans le domaine. Elle comporte en outre des modalités techniques adaptées au genre de problème étudié, telles qu'une grille spatiale modulable, une interface graphique, des classes d'objets génériques susceptibles de caractériser facilement des agents humains, animaux, environnementaux. Enfin, cette plateforme présente une interface très conviviale, facile d'utilisation, et le langage Smalltalk, jusqu'alors utilisé pour la programmation sur CORMAS est facile d'accès pour les non informaticiens.

Comme tout modèle multi-agents, SINUSE comporte différentes entités, agents ou objets⁴⁵, doués d'attributs et de méthodes propres. La modélisation multi-agents donne lieu à nombreuses options dont le choix dépend évidemment des objectifs du modélisateur et des caractéristiques du système : quelles entités représenter ? Quels processus modéliser ? Quelles simplifications opérer ? Quel degré de réalisme adopter ?

Lorsqu'il s'agit d'explorer des interactions inspirées par un cas d'étude concret, le modélisateur peut opter pour la conception d'un archétype, en représentant les divers objets et processus en jeu sans s'attacher à une adéquation poussée du modèle avec le cas d'étude (c'est le cas du modèle de Barreteau, 1998), ou, au contraire, on peut tenter par exemple de représenter l'espace le plus fidèlement possible, en s'appuyant notamment sur des cartes de la zone étudiée, voire sur un Système d'Information Géographique (c'est le cas du modèle développé par Bousquet *et al.*, sous presse).

Dans le cas étudié, les processus observés sur le terrain sont liés aux caractéristiques spatiales et socio-économiques des exploitations et à la distribution des paramètres hydrogéologiques. Une reconstitution des interactions en jeu sans tenir compte des ordres de grandeur peut donc induire une mauvaise représentation du poids relatif des différents processus. Par exemple, attribuer aux agriculteurs des parcelles de grande taille, représenter la nappe sans respecter les profondeurs observées, ou répartir dès le départ les puits déjà présents sur toute la zone, jouerait sur la dynamique d'apparition des puits. Il a donc paru raisonnable de rester proche des données de terrain en termes de proportions et de distributions, tout en procédant à une simplification et à une réduction d'échelle obligée du système⁴⁶.

⁴⁵ Le terme d'"agent" est entendu au sens de métaphore sociale douée de communication, représentant un individu et le terme d'"objet", au sens de représentation d'un élément inerte dans la réalité (puits, nappe, périmètre irrigué).

⁴⁶ Compte tenu des capacités du logiciel.

Ce choix permet en outre de procéder dans une certaine mesure à des calages de valeurs intermédiaires et à une analyse de la cohérence du modèle fondée sur sa comparaison avec les ordres de grandeur réels.

Le simulateur est organisé en deux parties : le monde artificiel constitué des différents agents et objets qui interagissent, et la structure de contrôle qui gère la simulation. Une grille spatiale constituée de cellules constitue le support de l'environnement.

Le choix des entités est une étape déterminante pour la simulation des interactions à suivre. Le modèle SINUSE comporte trois types d'entités⁴⁷ :

- **des entités sociales**, les agents exploitants, qui représentent les agriculteurs irriguants et non irriguants du système réel, peuvent communiquer en s'envoyant des messages ou simplement observer leur environnement ;
- **des entités spatiales** actives, agrégats de cellules, de taille variable, comme les objets nappe, parcelles et périmètres irrigués collectifs (qui seront désignés par la suite « PPI »). Ces objets représentent respectivement la nappe, les parcelles et les périmètres irrigués collectifs du système réel ;
- **des entités passives** (et situées), les objets puits, qui représentent les puits réels. Ils évoluent avec la profondeur de l'objet nappe (en terme de profondeur et de prix d'exhaure par exemple), et peuvent être construits, approfondis, non fonctionnels ou abandonnés.

La figure 19 montre que ces entités interagissent entre elles tout en fonctionnant de manière autonome, chacune selon ses propres règles d'action. La structure en couches de ce schéma symbolise la superposition d'objets spatiaux de niveaux d'agrégation différents, dont les informations et processus se chevauchent. La position en hauteur de la nappe signale l'émergence d'un phénomène global (l'abaissement de la nappe) à partir de processus locaux, et le fait que la ressource, invisible, n'est perçue qu'à travers la représentation mentale que s'en font les acteurs.

⁴⁷ La typologie usitée ici est celle de CORMAS et ne correspond pas forcément à la terminologie adoptée ici : par exemple les puits, sans être des agrégats de cellules constituent des éléments spatialisés, d'autre part on les considère comme des objets actifs puisqu'ils sont dotés de procédures propres, néanmoins ils sont classés comme entités passives situées.

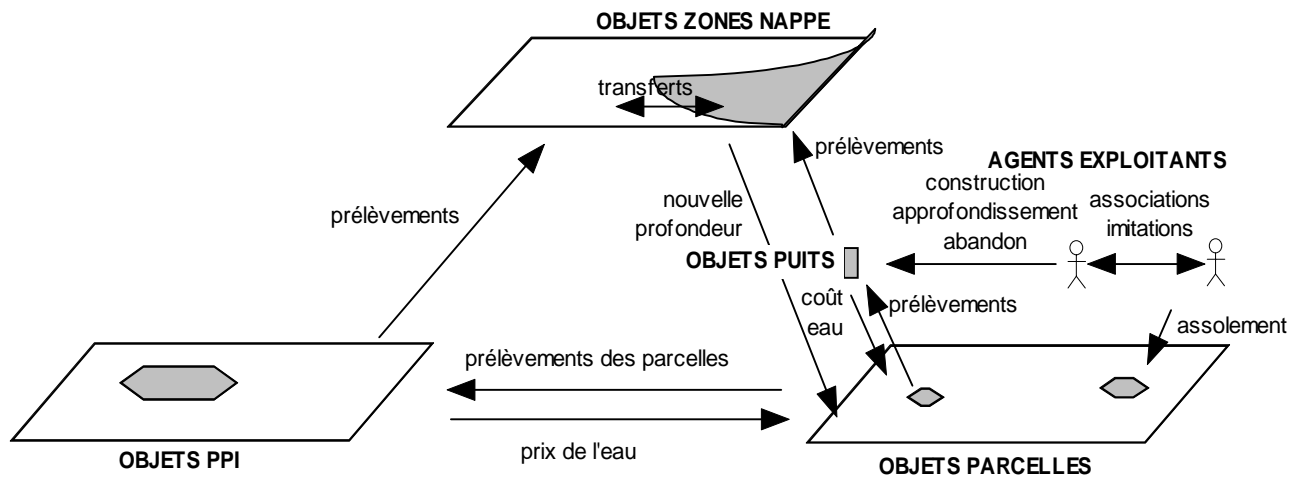


Fig. 19 : Principales interactions entre les entités du modèle SINUSE

La simulation se déroule par pas de temps annuel subdivisé en deux saisons. Des échanges en FVI ont lieu au début de l'année. Chaque saison, les exploitants cultivent leurs parcelles, construisent et approfondissent leurs puits. Le prix de l'eau en PPI et le coût d'exhaure au niveau des puits, ainsi que le taux d'irrigation des parcelles jouent sur les résultats économiques des exploitants. Les prélèvements effectués au niveau des puits et des PPI pour l'irrigation des parcelles constituent un volume déstocké auquel la nappe réagit en s'abaissant. Le gradient piézométrique résultant peut entraîner des transferts entre zones de la nappe. A la fin de l'année, les exploitants font le bilan de leur situation et tentent éventuellement de construire un puits ou d'acheter une parcelle.

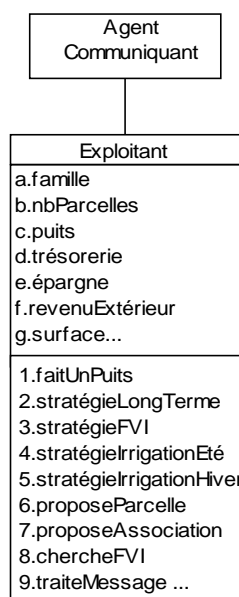
3.2.1. Une seule classe #Exploitant pour une diversité de situations

En langage "orienté objet", une classe désigne la description d'un ensemble d'objets (ou d'agents) de même type. Une classe hérite d'une autre classe lorsqu'elle est créée à partir d'un "moule" constitué par la classe générique : elle hérite par défaut de ses propriétés.

Les agriculteurs sont représentés par une seule classe #Exploitant. Les instances de cette classe sont des agents très simples : leur représentation du monde, leurs objectifs et leurs plans d'action sont implicites (c'est-à-dire définis en amont de la modélisation) et leur mémoire des événements passés se limite à des indicateurs économiques ou à des attributs de l'exploitation. Ils disposent d'une panoplie de méthodes différentes pour le même type d'opération, mobilisées selon les caractéristiques de leur exploitation et les interactions de voisinage. Ce choix permet de tenir compte d'une grande diversité de situations, susceptibles d'évoluer : un agriculteur cultivant en sec peut être amené à cultiver en irrigué une année, à construire son puits, tandis qu'un agriculteur doté d'un puits peut l'abandonner

pour des raisons techniques et finir par cultiver en sec⁴⁸... Cependant, malgré cette latitude d'action, et hormis l'apprentissage collectif sur l'accessibilité de la nappe permis par le processus d'imitation de voisinage, les agents de SINUSE ne sont pas susceptibles de modifier l'ensemble de leurs règles d'action en fonction des événements passés ; dans ce sens ils ne sont pas doués de facultés d'apprentissage, telles que d'autres modèles multi-agents les conçoivent (Barreteau, 1998 ; Attonaty, 1992...).

Comme le montre le diagramme de classe en UML⁴⁹ donné par la figure 20, les instances de la classe #Exploitant, qui hérite de la classe générique « AgentCommuniquant » de CORMAS, sont dotées d'attributs caractérisant leur système exploitation-famille, et de méthodes (la totalité des attributs et méthodes n'est pas représentée ici).



Les agents exploitants sont susceptibles de prendre des décisions :

- à moyen terme : échange de parcelles en faire-valoir indirect, assolement saisonnier de leur parcelle, diversification des revenus à la saison en cas d'actifs familiaux disponibles...,
- ou à long terme : construction d'un puits avec possibilité de s'associer avec un voisin si nécessaire, achat ou vente d'une parcelle....

Ils sont caractérisés par un nombre d'actifs familiaux (attribut a), la structure de leur exploitation en terme de parcellaire et d'accès à l'eau (attributs b, c, g), leur situation économique (attributs d, e, f).

Ils peuvent prendre des parcelles voisines en FVI (méthodes 3 et 8) ou s'associer à un voisin pour construire un puits (méthodes 7 et 9) pour s'affranchir en partie des limites imposées par leurs conditions. Ces procédures impliquent des envois de messages entre exploitants.

Fig. 20 : Diagramme UML de la classe #Exploitant. FVI=faire-valoir indirect

3.2.2. Une classe #ZoneNappe pour une nappe hétérogène

Pour représenter dans le modèle l'hétérogénéité spatiale de la nappe de Kairouan, l'objet nappe a été décomposé en 2 zones dont l'alimentation et les paramètres hydrogéologiques sont différents. Les zones 1 et 2 de la nappe sont divisées respectivement en 2 et 3 zones de profondeurs différentes, selon un gradient croissant est-ouest, à l'image de la nappe de Kairouan (cf. annexes 1.d et 3.c).

⁴⁸ On aurait pu choisir de représenter plusieurs types d'agriculteurs, disposant de méthodes différentes, un agent étant susceptible au cours de sa "carrière" de changer de groupe plusieurs fois.

⁴⁹ Unified Modelling Language ; la formalisation utilisée ici est issue de Muller (1998).

La géométrie lenticulaire de la nappe est prise en compte implicitement dans les processus de construction d'un puits : la probabilité d'échec du creusage varie selon les zones de la nappe, symbolisant la présence de lentilles argileuses ou sableuse épaisses. L'objet nappe est représenté par une classe #ZoneNappe, de type « agrégat spatial », dont les deux instances formalisent les zones de la nappe. La figure 21 présente les principales caractéristiques de la classe « ZoneNappe » en UML..

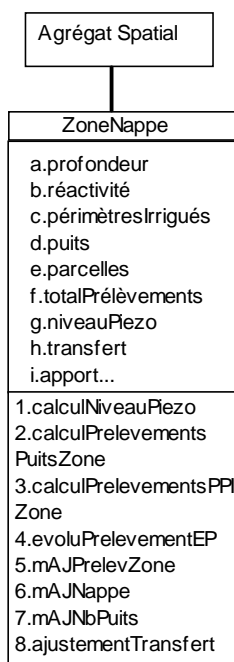


Fig. 21 : Diagramme UML de la classe #ZoneNappe. MAJ= mise à jour

Les zones de la nappe sont dotées d'une profondeur (plusieurs profondeurs en fait, selon une subdivision définie par une carte), d'un niveau piézométrique, d'un paramètre de sensibilité au forçage, d'un apport en eau. Elles sont susceptibles de réagir aux apports ainsi qu'aux prélèvements et d'échanger entre elles, selon leur caractéristiques hydrogéologiques.

A la fin de chaque saison, donc deux fois par an, elles intègrent les prélèvements qui leur ont été transmis par les puits et les périmètres qui les ont exploitée pendant la saison (méthodes 2 et 3). Elles réajustent leur profondeur en conséquence (procédure 6) en vertu d'un paramètre fonction de leur surface et leur porosité (attribut b).

Des transferts souterrains ont alors lieu entre les zones en fonction de leurs différences de niveaux piézométriques, ce qui entraîne à nouveau un réajustement des niveaux (méthode 8).

Les prélèvements en eau potable sont définis pour chaque saison selon une fonction d'évolution fidèle aux tendances actuelles⁵⁰, au niveau de chaque zone de l'objet nappe (méthode 4).

⁵⁰ Les volumes prélevés entre 1969 et 1996 par la SONEDE sont issus des données du CRDA.

3.2.3. A l'interface entre ressource et usages : les classes #Parcelle, #Puits, #PPI

Les interactions entre nappe et usagers de l'eau ont lieu *via* les objets parcelles, puits et PPI, décrits par les diagrammes de classe suivants :

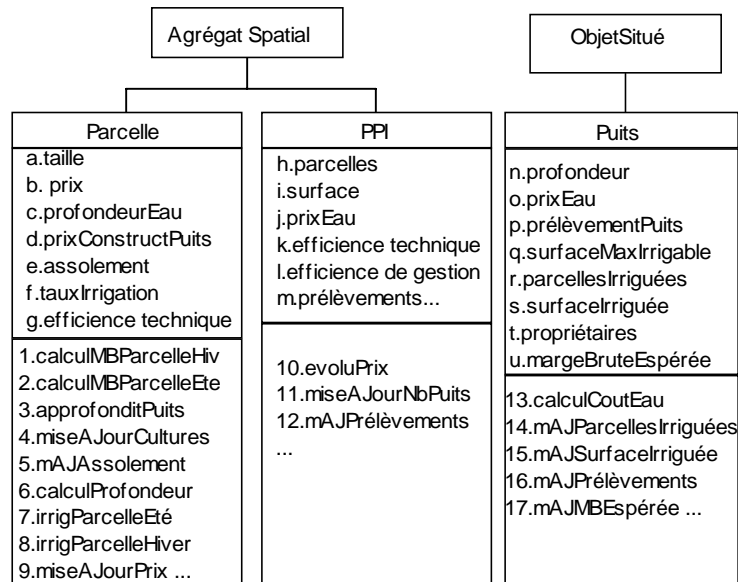


Fig. 22 : Diagramme UML des classes #Parcelle, #PPI, #Puits. mAJ=mise à jour, MB=marge brute

Les objets parcelles sont caractérisés par leur taille, leur prix (évolutif, selon l'accès à l'eau et le voisinage), leur assolement fixé à la saison (méthodes 4, 5, 7 et 8), leur accès à l'eau. Le prix de construction d'un puits dépend de la profondeur de l'eau (attribut c, remis à jour selon l'abaissement de la nappe par la méthode 6). Les marges brutes saisonnières sont calculées au niveau des parcelles (1 et 2).

Les objets périmètres irrigués (PPI) ont un prix de l'eau (l, qui évolue annuellement selon la méthode 10) et intègrent les prélèvements des parcelles qui les constituent.

L'efficience technique de la distribution du point d'extraction à la plante est caractérisée par (g) pour les parcelles, et remplacée par (k) en PPI, compte tenu des pertes en amont de la parcelle. Les objets PPI sont également caractérisés par une efficience de gestion (i), qui recouvre à la fois le type de gestion, la longueur des tours d'eau, la fréquence des pannes...

Les objets puits ont un coût d'extraction de l'eau (o) calculé selon la procédure 13 en fonction de la profondeur (n). Chaque saison ils irriguent une ou plusieurs parcelles (15) selon leur capacité (q, qui dépend de leur équipement) et la stratégie de leur propriétaire.

3.2.4. Un modèle initialisé à l'image du système actuel

L'initialisation du modèle, qui correspond au schéma des conditions actuelles du système, entraîne la mise à jour des cartes des parcelles, de la nappe, des PPI et des strates agricoles. Sur cette base sont créées les exploitations, par regroupement de parcelles, et par attribution de paramètres socio-économiques, et les puits, distribués sur les parcelles et dans les exploitations selon les contraintes correspondant aux connaissances actuelles du terrain⁵¹. La zone d'étude s'étend sur environ 25 000 hectares. La définition de l'espace dans le modèle SINUSE se fait sur une grille rectangulaire de 40 cellules sur 60 cellules, chaque cellule représentant 1 hectare. En effet, ne disposant pas du cadastre de la zone il était impossible de représenter les exploitations réelles ; en revanche il était important de tenir compte des différentes tailles des parcelles (plutôt que de représenter les parcelles d'une même exploitation de manière agglomérée, ou de représenter plusieurs hectares par une seule cellule), puisqu'elles conditionnent en partie la construction d'un puits. Enfin, il fallait restreindre la taille de la grille pour des raisons de taille du modèle. La grille représente donc au total 2400 hectares, soit environ 10% en surface du système étudié. Le voisinage de chaque cellule est l'ensemble des 8 cellules adjacentes, les frontières de la grille étant considérées fermées. Afin de retrouver la cohérence des phénomènes observés sur le terrain, les proportions du terrain ont été approximativement respectées.

3.2.4.1 Des exploitations définies à chaque initialisation

Les strates agricoles correspondent schématiquement au zonage effectué sur le terrain à partir du critère d'accès à la ressource, et utilisé pour la stratification du sondage. Les exploitations sont constituées par regroupement de parcelles au niveau de chaque strate agricole, ce qui permet d'attribuer plusieurs parcelles dispersées aux exploitations, tout en les confinant dans un périmètre pour tenter d'approcher la réalité du terrain. Le sondage ne révèle pas de différence notable entre exploitations de strates différentes.

Le regroupement des parcelles en exploitations est effectué sur la base des distributions de taille des exploitations observées sur le terrain. Les exploitations ainsi conçues sont dotées d'une famille, de revenus extérieurs, d'une trésorerie et d'une épargne initiales, selon les données du sondage. Les revenus extérieurs fixes (actifs salariés) ont été distingués des revenus temporaires, correspondant à l'emploi journalier de la main d'œuvre familiale inactive dans l'exploitation. Aucune corrélation n'apparaît entre nombre d'actifs familiaux, surface (ou nombre de parcelles), revenu extérieur fixe, accès à l'eau et salaire fixe moyen.

⁵¹ Les puits sont placés sur des parcelles de taille supérieure à 4 hectares (marginale entre 2 et 4 hectares pour figurer des processus d'héritage) et au départ les exploitations ne sont pas dotées de plus de 2 puits.

La méthode d'initialisation repose donc sur l'affectation aléatoire de ces différents paramètres aux exploitations constituées, en respectant les proportions observées sur le terrain. En revanche, l'affectation de l'épargne initiale correspond au choix aléatoire d'un chiffre dans un intervalle qui dépend de l'accès à l'eau et de la surface de l'exploitation, sur la base des données de sondage (la taille du troupeau ovin et des déclarations qualitatives des exploitants sur leur niveau d'endettement ont permis d'estimer l'épargne)⁵². Enfin, la trésorerie initiale des exploitants est calculée sur une simulation « à vide » de la culture de leurs parcelles. Les paramètres d'initialisation des exploitations peuvent être consultés en annexe 3.j. L'effet que peut avoir la configuration initiale des exploitations sur le déroulement des simulations sera étudié en troisième partie.

3.2.4.2 Une configuration initiale fixée pour la nappe

Les 2 zones de la nappe sont subdivisées en 2 et 3 sous-zones de profondeurs différentes (cf. annexe 3.c). Les valeurs des paramètres de chaque zone sont fixées comme expliqué au § 1.4.2.1. La zone 1, de transmissivité moyenne $T_1=10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et de porosité $s_1=15\%$, couvre 120 km^2 et reçoit entre 5 millions de mètres cube par an (Mm^3/an) ; les prélèvements d'eau potable, sont de $0,2 \text{ Mm}^3/\text{an}$. La zone 2, de transmissivité moyenne $T_2=5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et de porosité $s_2=10\%$, couvre 140 km^2 et reçoit $0,5 \text{ Mm}^3/\text{an}$; les prélèvements d'eau potable, sont de $7 \text{ Mm}^3/\text{an}$ ⁵³. La salinité de la nappe n'a pas été prise en compte dans le zonage de la nappe : malgré une certaine hétérogénéité sur la zone d'étude, (le résidu sec mesuré dans le sud-est de la zone serait d'environ 3 g.l^{-1}), la salinité ne semble pas affecter le comportement des agriculteurs en termes de choix culturels ou d'accès à l'eau, et les techniciens du CRDA sont peu alarmés par son évolution. De même, aucun lien entre abaissement et salinisation de la nappe n'a été représenté, les données actuelles ne permettant pas de conclure sur ce point.

La salinité est plus forte vers le sud, et plus forte en surface qu'en profondeur et les cartes de salinité du CRDA se contredisent : certaines montrent que la salinité a diminué entre 1969 et 1989, tandis que d'autres, focalisées sur la zone d'Abida, montrent au contraire qu'elle a augmenté entre 1968 et 1983 (zones à 3 g/l contre 2 g/l auparavant) ; aucune ne signale les points de mesure à l'origine des courbes d'isosalinité. Par ailleurs, la comparaison des mesures effectuées lors des inventaires de 1970 et de 1983, montrent que la salinité n'augmente pas dans tous les puits, ou augmente peu.

La structure lenticulaire de la nappe est implicitement prise en compte *via* la probabilité

⁵² "Pas du tout", "un peu", ou "très" endetté, notions subjectives dont les seuils ont été estimés à partir de discussions informelles ; cependant on ignore s'il s'agit de dettes à court ou à long terme...

⁵³ Ces chiffres correspondent approximativement aux derniers prélèvements en eau potable disponibles au moment de l'étude de terrain (1995 et 1996) ; ignorant la manière dont ces prélèvements vont évoluer, ils sont fixés pour toute la simulation, leur évolution pouvant constituer un scénario à simuler.

d'abandon des puits à la construction ou à l'approfondissement (cf. annexe 3.f).

En dehors des abandons discrets dans l'espace, la présence d'une large lentille imperméable faisant barrage à l'approfondissement des puits peut entraîner des abandons groupés (c'est ce qui pourrait expliquer les nombreux abandons sous prétexte qu'"il n'y a plus d'eau" observés à proximité de la zone d'étude par (Ben Hamouda, 1999)). Ce phénomène est symbolisé dans le modèle par le fait qu'un puits entouré d'au moins trois puits abandonnés (du fait de la probabilité d'échec), l'est à son tour.

Chaque zone de profondeur est dotée d'une profondeur initiale uniforme (de 60 à 20 m d'amont en aval), représentative des profondeurs actuellement observées dans la zone d'étude⁵⁴.

3.2.4.3 Un parcellaire fixé pour plusieurs simulations, ou redéfini à chaque initialisation

Le parcellaire joue un rôle important dans la mesure où il conditionne l'investissement dans un puits. Un parcellaire fictif est reconstitué par un programme d'initialisation respectant la distribution des classes de taille, la cohésion des parcelles et leur distribution aléatoire dans l'espace⁵⁵. Les 770 parcelles proviennent du regroupement de cellules élémentaires d'un hectare, et leur taille va de 1 à 20 hectares⁵⁶. La constitution du parcellaire peut être soit fixée une fois pour toutes, soit réitérée lors de chaque initialisation.

L'efficacité technique de l'irrigation, ou rendement de la distribution de l'eau entre le puits et les plantes, est le même pour toutes les parcelles, dans la version actuelle du modèle, et correspond à l'efficacité moyenne en irrigation gravitaire avec tuyaux en polyéthylène souple. Cette efficacité moyenne, estimée à 70% faute de mesures précises, correspond à la distribution dans les parcelles⁵⁷, la distribution entre le puits et la parcelle se faisant quasiment sans perte du fait de l'usage de tuyaux. Pour les parcelles en PPI, il est nécessaire de tenir compte de l'efficacité de distribution du PPI.

⁵⁴ La zone du modèle ne représente que 10% de la surface réelle, ce qui peut laisser penser que la pente de l'eau, avec des profondeurs de nappe conformes à la réalité, se trouve accrue. En fait les calculs hydrogéologiques (formule de sensibilité au déstockage et loi de Darcy) ne tiennent pas compte de ce coefficient de réduction, dans le modèle : ils reposent sur les surfaces réelles, tandis que les prélèvements issus des simulations sont multipliés par 10 avant d'être affectés à la zone de la nappe impliquée. La pente d'eau, responsable des transferts, ne se trouve donc pas affectée par cette distorsion apparente, tandis que la diversité d'accès en terme de profondeur est représentée.

⁵⁵ Le seul indicateur de morcellement à disposition est la taille des parcelles, et leurs distribution aléatoire dans l'espace.

⁵⁶ Sur les 889 parcelles du sondage, environ 10% ont une taille inférieure à un hectare (de 0,2 à 0,9 ha), et 0,3% ont une taille comprise entre 20 et 25 ha ; mais on estime que l'influence de ces tailles extrêmes dans la dynamique globale est négligeable.

⁵⁷ Source : estimations de l'équipe usage de MERGUSIE ; cependant, l'utilisation de tuyaux en polyéthylène permettrait même d'atteindre 90% d'efficacité, sous réserves de fuites limitées et pour une parcelle de taille moyenne.

3.2.4.4. Des PPI caractérisés par leur prix de l'eau et leur efficacité

La zone d'étude comporte 16 PPI, regroupés dans le modèle en 6 PPI différents, selon leur localisation sur la nappe et caractéristiques en terme de modes de gestion et de distribution, en respectant au total le ratio des surfaces occupées par chacun, compte tenu de la réduction opérée dans le modèle. La distribution spatiale des PPI respecte approximativement la distribution réelle en terme de dispersion dans la zone, comme on peut le voir en annexe 3.c.

Les prix de l'eau en PPI correspondent à l'initialisation aux prix en vigueur en 1998 : 0,061 DT/m³ sauf pour El Haouareb (PPI₁) qui vend son eau à 0,055 DT/m³.

Des coefficients d'efficacité technique tenant compte de l'efficacité de distribution de l'eau en amont de la parcelle, liée au type et à l'état des infrastructures, et d'efficacité de la gestion, sont affectés à chaque PPI, symboliques de leurs principales caractéristiques. Par exemple, le PPI₁, doté d'un coefficient égal à 0,8 pour l'efficacité technique et 1 pour l'efficacité de gestion, représente le PPI El Haouareb, équipé d'un réseau sous pression et d'aspenseurs, et distribuant l'eau à la demande, alors que tous les autres PPI distribuent l'eau dans des canaux à ciel ouvert plus ou moins délabrés et « sur demande », et ont des coefficients compris entre 0,5 et 0,8. L'efficacité technique varie en fonction du mètre linéaire de la distribution ; pour simplifier, ces coefficients sont considérés homogènes à l'intérieur des PPI. Les prélèvements des PPI sont affectés à une zone de la nappe, correspondant à la localisation sur le terrain du forage qui les dessert.

Les PPI sont finalement réduits à des infrastructures de distribution dotées d'un prix de l'eau et d'une efficacité.

3.2.4.5 Des puits initialement concentrés dans les zones peu profondes

Les puits sont créés par strate agricole et par parcelle, conformément aux observations de terrain. Affectés aux parcelles selon une probabilité qui dépend de la zone et de la taille des parcelles, ils se trouvent concentrés dans les zones de faible et moyenne profondeur, dans lesquelles les premiers puits ont été construits. A l'initialisation, il n'y a pas de puits dans les zones de profondeur supérieure à 40 mètres, dans les PPI (sauf le PPI₄⁵⁸), ni dans les parcelles de taille inférieure à 2 hectares ; chaque exploitation comporte un puits au plus⁵⁹.

⁵⁸ Le PPI4 représente les PPI de Chébika où sont signalés de nombreux puits par le CRDA.

⁵⁹ On observe peu de puits dans les PPI (aucun dans les enquêtes ; il en existe quelques uns dans les PPI les moins efficaces situés en zone de faible profondeur), dans les zones profondes (moins de 10% des puits recensés par le sondage sont dans des zones de profondeur supérieure à 40 mètres), sur des petites parcelles (1% des puits sondés sont sur une parcelle de moins de 2 hectares), et peu d'exploitations possèdent plusieurs puits (2% des exploitations sondées).

Par simplification, la capacité d'irrigation des puits est exprimée en surface et repose sur les statistiques du sondage et sur les mesures de débit effectuées : la moyenne et la médiane des surfaces irriguées par les puits du sondage donnent 5 hectares⁶⁰, ce qui correspond également aux données des enquêtes approfondies. En toute rigueur, la capacité d'irrigation du puits devrait être exprimée en terme de débit maximal, sur une certaine durée, et devrait dépendre du niveau d'équipement du puits, mais aussi de son ancienneté et de la profondeur de l'eau captée. L'impact de ces facteurs est supposé négligeable par rapport à la dynamique globale. D'ailleurs, un même débit peut être obtenu à profondeurs différentes selon la puissance de la pompe, ce qui est implicitement pris en compte dans la relation entre prix de l'équipement et profondeur de captage.

Les principaux processus qui mettent les entités du modèle en interaction à partir de ces conditions initiales sont décrits dans ce qui suit.

3.3. Formalisation des interactions dans le modèle SINUSE

Cette partie présente les méthodes les plus importantes du modèle SINUSE. La gestion stratégique des exploitations est représentée par « champs de décision » distincts : les échanges fonciers, les décisions d'assolement et d'irrigation, l'ensemble des processus économiques, la réaction de la nappe aux prélèvements, la réaction des propriétaires de puits à l'abaissement, et enfin les décisions d'investissement ou de décapitalisation. La justification de ces méthodes s'appuie sur les observations de terrain décrites au § 2 ; le choix de leurs paramètres est étayé en note de bas de page. Le lecteur pourra trouver les méthodes non présentées ici en annexe 3.b.

Les agriculteurs entretiennent plusieurs types d'interactions : indirectes *via* l'environnement, ou directes, pouvant impliquer l'envoi de messages ou simplement l'observation du voisinage. Le tableau 6 inventorie les interactions directes entre agriculteurs en précisant l'objet de l'interaction et sa portée.

⁶⁰ La surface de 5 ha paraît cohérente : cette surface cultivée en maraîchage d'été nécessite le prélèvement d'environ 28 000 m³ au total, compte tenu d'une efficacité de distribution de 70%. Ceci est compatible avec un débit moyen de 5 l.s⁻¹ et des durées de pompage pouvant facilement atteindre 20 h/jour en période de pointe, d'après les enquêtes approfondies : un débit de 6 l/s, 15 h/jour pendant 3 mois conduit à un volume de 30000 m³.

Tab. 6 : Les interactions directes entre exploitants. Le voisinage 2 signifie que l'échange peut avoir lieu avec les parcelles voisines directes (voisinage 1) ou indirectes (parcelles voisines des parcelles voisines), etc. Le voisinage étendu désigne toutes les parcelles d'une même strate agricole.

	Type d'interaction	objet	portée
impliquant l'envoi de messages	échanges fonciers annuels	échange parcelle	voisinage 2 ou 3
	construction de puits en association	construction puits	voisinage 1
	mouzaraâ (construction d'un puits sur une terre prise en FVI)	puits et parcelle	voisinage étendu
	vente/achat de parcelle	parcelle	voisinage 2
sans envoi de message	construction d'un puits compte tenu des possibilités d'échange	puits	voisinage 2
	imitation	puits	voisinage 2
	indicateur de risque (présence de puits abandonné dans le voisinage)	puits	voisinage 3
	influence du voisinage sur le prix de la terre	prix parcelle	voisinage 2

Les portées de ces interactions reposent sur des observations de terrain⁶¹ et sur un calage effectué en simulation. Par simplification ces échanges ont lieu dans la plupart des cas entre voisins directs ou indirects.

Avant d'aborder la description de ces processus d'interaction, présentons ci-dessous les méthodes de calcul des divers attributs économiques en jeu.

3.3.1. Les attributs économiques

Les "attributs économiques" désignent des attributs tels que l'épargne et la trésorerie des exploitants, la marge brute des parcelles, le coût d'exhaure de l'eau des puits...

3.3.1.1. Articulation des différents attributs économiques

Les exploitants prennent leurs décisions annuelles et saisonnières en fonction de leur trésorerie et de leur niveau d'endettement. La trésorerie correspond au revenu net de l'exploitation sur l'année :

$$T_n = \sum_{\text{parcellesFVD}} MB_n + \sum_{\text{parcellesFVI}} \alpha \cdot MB_n + Rt_n + Rf - (Ch_{\text{puits}})_n - (Ch_{\text{famille}})_n - D_n$$

T_n désigne la trésorerie constituée l'année n , MB les marges brutes des parcelles exploitées en faire-valoir direct (FVD) ou indirect (FVI), et α la part de la marge brute qui revient à l'exploitant dans une exploitation en FVI. Rt_n correspond aux revenus extra-agricoles temporaires cumulés pendant l'année. Rf désigne les revenus extra-agricoles fixes annuels, c'est-à-dire les salaires des membres du ménage ayant un emploi fixé à l'initialisation. Les parents (enfants, frères) ayant un emploi fixe et vivant hors du ménage n'ont pas été pris en

⁶¹ Les associations observées pour la construction d'un puits sont réalisées entre 2 voisins directs. En revanche, on a observé des exploitants prenant en faire valoir indirect des parcelles voisines indirectes pour l'irriguer avec leur puits (ils prétendent pouvoir transporter l'eau jusqu'à 1 km grâce aux tuyaux en polyéthylène), voire plus loin encore lorsque les parcelles sont en PPI, tout en restant dans le voisinage pour des raisons pratiques.

compte, malgré le fait qu'ils peuvent prêter une aide temporaire à l'exploitation⁶² (implicitement pris en compte dans la capacité d'emprunt des exploitants). Ch_{puits} désigne les charges correspondant aux puits (approfondissement, changement d'équipement). D_n désigne les dépenses de l'année, c'est-à-dire les investissements agricoles ne concernant pas l'irrigation et les dépenses familiales (dépenses courantes, construction d'une maison, fête...). On suppose ici que ces dépenses varient en fonction des revenus de l'année. Ch_{famille} correspond aux dépenses familiales, c'est-à-dire l'alimentation, les frais scolaire et correspondent d'une manière générale au niveau de vie de la famille. Ce niveau de vie varie également en fonction des revenus (cf. annexe 3.k), ; la restriction des dépenses alimentaires et le report des investissements familiaux faisant partie des ajustements conjoncturels, tel que le décrivent Aubry *et al.* (1988). En moyenne, il repose sur les enquêtes de Ben Hamouda (1999) effectuées dans une zone voisine.

La partie de la trésorerie non dépensée est intégrée à l'épargne chaque année, laquelle est placée sous forme de cheptel ovin, et soumise à un taux d'accroissement et à un risque de perte.

La totalité des exploitants interrogés disent placer leur argent dans le bétail (ou plus marginalement, à la poste). Les exploitants en sec (116 cas dans le sondage) ont en moyenne 6 ovins, alors que les exploitants en irrigué (156 cas dans le sondage), détiennent 9 ovins en moyenne. Le cheptel bovin étant marginal en général (les ¼ des agriculteurs interrogés ont moins de deux bovins), le calcul du taux d'intérêt dégagé par cette épargne repose uniquement sur le prix unitaire et la marge brute animale d'une tête d'ovin (respectivement 400 DT et 70 DT/an en moyenne ; 1 DT épargné rapporterait donc 0,18 DT/an, taux d'intérêt a priori très intéressant mais ce placement n'est pas sans risque). L'état accordant des prêts à des taux de 9%, et les crédits étant le plus souvent contractés auprès de la famille, on suppose que les emprunts sont soumis à un faible taux d'intérêt, fixé ici à 5%.

A la fin du pas de temps annuel, l'épargne disponible détermine en grande partie les investissements réalisables. La trésorerie courante accumulée pendant l'année sert néanmoins de référence aux décisions annuelles (FVI) et saisonnières (irrigation d'hiver), prises au début de l'année suivante.

Il n'a pas été tenu compte des contraintes d'accès à l'emprunt officiel (essentiellement la possession d'un titre foncier) car sur le terrain, les agriculteurs sont réticents à emprunter à long terme. Ils ont surtout recours au crédit familial et à court ou moyen terme, aux crédits fournisseur ou « privé ».

⁶² Sur les 272 chefs d'exploitation du sondage, 41 seulement déclarent avoir un parent proche vivant hors du ménage et ayant un revenu extra-agricole fixe (autre qu'ouvrier, ces derniers représentant une vingtaine de cas). Par ailleurs certains précisent qu'ils ne reçoivent aucune aide de ces parents. Parmi les 82 puits recensés par le sondage, 12 appartiennent à des exploitants qui ont des parents employés à l'extérieur, donc susceptibles de les avoir aidés à financer leur puits.

La figure 23 récapitule l'articulation dans le modèle des attributs économiques pour un exploitant au cours d'un pas de temps annuel.

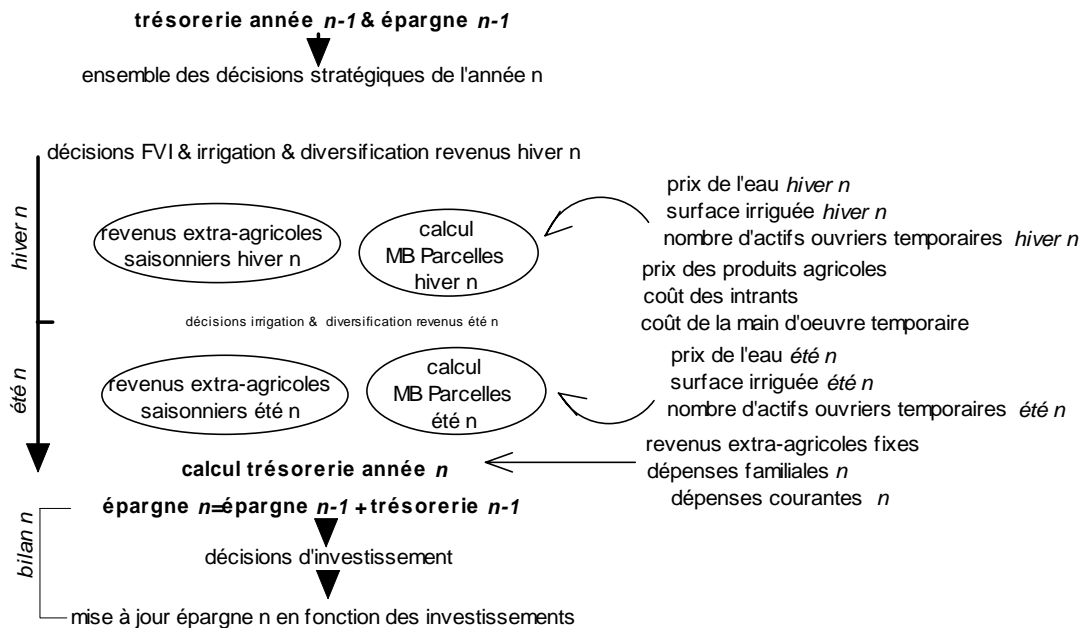


Fig. 23 : Articulation des paramètres économiques. MB=marge brute. FVI=faire-valoir indirect.

Comme l'indique la figure 23, les prix des produits agricoles, des intrants et la rémunération de la main d'œuvre ouvrière sont fixes d'une année sur l'autre :

- l'inflation a été jugée négligeable ;
- les interactions entre les quantités produites dans la zone et les prix à la production ont été jugées faibles (les demandes touristique et locale ont une forte capacité d'absorption, de plus certains prix sont encadrés par l'Etat) ;
- de même, la demande en main d'œuvre est telle que les prix varient peu selon l'offre (elle a fait preuve de stabilité au cours des dernières années).

Les attributs économiques tels que la trésorerie et l'épargne influencent en partie les décisions stratégiques de l'exploitant. Ils interviennent dans les procédures en question, sous forme de valeurs seuils pour les prises de décision des agriculteurs.

3.3.1.2. Quels seuils d'endettement ?

Sur le terrain, plusieurs discussions informelles avec les agriculteurs laissent penser que ceux-ci continuent d'irriguer en situation courante déficitaire, et même en cas d'endettement (« *on espère toujours gagner* », attitude qui semble confirmée par le sondage : 38% des agriculteurs qui irriguent se déclarent endettés, dont 9% « très endettés »). Dans le modèle, le seuil de blocage de toute dépense est constitué par la combinaison d'une trésorerie très déficitaire et d'une épargne déficitaire (trésorerie $\leq -10\ 000$ & épargne ≤ 0).

La figure précédente montre que le revenu des exploitants est calculé sur la base de plusieurs facteurs, notamment la marge brute des parcelles cultivées.

3.3.1.3. Une marge brute à la parcelle fonction de la sole cultivée, du prix de l'eau et du climat

Le calcul de la marge brute est effectué au niveau de chaque parcelle puis sommé à la fin de la saison par l'exploitant qui constitue sa trésorerie. Dans le modèle, les niveaux de rendement en irrigué, de charges et de prix sont considérés constants. Les facteurs de variation de la marge brute sont la proportion de la surface irriguée, la composition de la sole irriguée, le prix de l'eau, la sole plantée et les apports pluviométriques mensuels.

La formule générique du calcul de la marge brute explicitée au § 3.3.3.3. Cette formule se décline suivant différemment en fonction de la saison, du mode de faire-valoir, du taux d'irrigation (cf. annexe 3.h).

Sur une parcelle irriguée par un puits, le prix de l'eau est fonction de la profondeur de la nappe, qui détermine aussi le prix de construction des puits. Voyons à présent comment ces attributs économiques sont liés à la profondeur de la nappe.

3.3.1.4. Un coût d'accès à l'eau fonction de la profondeur

Les coûts d'accès à l'eau désignent le coût d'extraction de l'eau sur un puits ou un forage, le prix de l'eau dans un PPI, et les coûts de construction et d'approfondissement d'un puits.

Le tableau 7 donne la formule de calcul, l'origine des données et les simplifications opérées pour les coûts d'accès à l'eau sur un puits ou un forage privé localisé sur une cellule où la nappe est de profondeur p . Les coûts de construction et d'approfondissement sont modifiés lorsque le puits est partagé par deux propriétaires. On suppose alors que le puits est équipé de deux pompes plus puissantes, tel qu'observé dans les cas rencontrés et que le coût d'extraction est le même pour chacun. Les coûts sont également modifiés dans le cas particulier d'un forage dont la profondeur est fixée à 200 mètres.

Tab. 7 : Les coûts d'accès privé à l'eau. Ces équations sont justifiées par les données de terrain en annexe 3.g.

Attribut	valeur	origine	simplifications
coût de construction C_c⁶³			
un seul propriétaire, puits	$C_c = 11300 * \ln(p + 3) - 29000$	enquêtes préliminaires et approfondies, entretiens avec un constructeur de puits et un fournisseur d'équipement	coûts d'électrification non pris en compte car la majorité des puits fonctionnent au gasoil (98% des puits sondés)
deux propriétaires, puits	$C_c = 3200 * \ln(p + 3) - 5800$ $p \leq 40$ m : $C_c/2 + 3000$ $p > 40$ m : $C_c/2 + 84 * (p + 3) + 5200$		
un propriétaire, forage	50000 ⁶⁴		
coût d'approfondissement C_a⁶⁵			
un propriétaire	$C_a = 300 + 30 * (p + 5)$	entretiens avec un constructeur de puits	profondeur seuil : 90 m
deux propriétaires	$C_a = 150 + 30 * (p + 5)$	et avec les agriculteurs	
changement d'équipement C_h (tous les 5 m supplémentaires)	si $p < 40$ m $C_h = 3000$; si $p \in [40 ; 60]$ $C_h = 4500$; si $p > 60$ $C_h = 6500$	entretiens avec un fournisseur d'équipement	
coût d'extraction C_e⁶⁶			
puits	$C_e = 0,02 * e^{0,017 * p}$	enquêtes préliminaires et approfondies	pompes au gasoil seule dépense énergétique & maintenance ⁶⁷
forage	$C_e = 0,011$		

Le coût de l'eau correspond classiquement aux frais de fonctionnement et à l'amortissement de l'équipement engagé. Le coût de l'eau tel qu'il est appréhendé par la majorité des agriculteurs de la plaine de Kairouan (qui ne tiennent pas de comptabilité pour la plupart), semble ne correspondre qu'au coût de l'énergie d'extraction et aux frais de maintenance courante (une réparation du moteur par an en moyenne).

Dans le modèle, l'exploitant approfondit son puits quelque soit le coût d'approfondissement (faible devant celui de la construction d'un autre puits), sauf s'il est très endetté ou seul sur son exploitation ; auquel cas, l'investissement est reporté jusqu'à ce que la situation soit favorable (cf. annexe 3.b). Ce comportement est retrouvé dans les enquêtes de Ben Hamouda (1999). La construction et l'approfondissement des puits comportent un risque d'échec, variable selon les zones et le type de construction. Par exemple, une construction dans une zone sans puits voisins comporte un risque d'échec plus grand qu'une construction dans une zone "colonisée". En cas d'échec, l'exploitant abandonne son puits tout en étant

⁶³ En réalité cet attribut est affecté à la parcelle ; pour plus de détail sur l'équation voir annexe.

⁶⁴ Enquête approfondie E21.

⁶⁵ Les pompes, non immergées, doivent être suffisamment proches en hauteur du niveau de l'eau (à moins de 11 mètres en théorie, et de 5 mètres en pratique, compte tenu des pertes de charge au niveau des équipements de puits), ce qui oblige à creuser un "faux puits" c'est à dire à approfondir le puits, dès que le forage doit être approfondi.

⁶⁶ Contrairement aux calculs classiques du coût de l'eau, seuls les coûts de fonctionnement (énergie et entretien de l'équipement) sont pris en compte ici, les agriculteurs de la zone d'étude ne raisonnant pas apparemment en terme d'amortissement ; pour l'origine des fonctions voir annexe 3.g.

⁶⁷ Les agriculteurs interrogés ne semblent pas raisonner sur un calcul d'amortissement mais uniquement en fonction des dépenses de fonctionnement (énergie et dépenses courantes ; une panne par an).

contraint de payer l'approfondissement effectué. En cas de réussite, la capacité d'irrigation du puits reste la même. L'exploitant doit rénover l'équipement de son puits tous les 5 mètres approfondis, selon un coût qui varie en fonction de la profondeur du puits.

Le tarif de l'eau en PPI est présenté au § 3.2.4.4. Il augmente de 15% par an (première partie, § 2.2.2.3). Le tarif de l'unique GIC existant déjà lors des enquêtes est assimilé à celui des PPI⁶⁸, et le plafond d'augmentation du prix de l'eau est fixé à 0,3 DT/m³. Ce seuil est élevé si on se réfère à l'étude de Kefi (1999), qui estime la valorisation de l'eau moyenne à 0,219 DT/m³ au maximum.

Dans le modèle actuel, les coefficients d'efficience des PPI ne sont pas évolutifs, alors qu'ils pourraient diminuer pour symboliser une dégradation des réseaux de distribution ou au contraire augmenter pour signifier une amélioration de la gestion ou des infrastructures. Cependant, aucune donnée à ce sujet ne permet de prévoir l'évolution de l'efficience⁶⁹. Une variation saisonnière de l'efficience pourrait être considérée, étant donné les différences en terme d'évaporation et de saturation en eau du sol. Des tests de sensibilité sur ce facteur, effectués par simulation, permettront de savoir s'il s'agit d'un paramètre important.

3.3.2. Les stratégies d'échanges fonciers en FVI

La formalisation de ces stratégies repose sur les règles suivantes :

- **chaque agent exploitant donne ou prend au plus une parcelle par an**, mais peut à la fois prendre une parcelle et en donner une, sur la base d'un contrat annuel ;
- **la négociation pour l'échange procède en trois temps** : les agriculteurs qui cherchent à prendre une parcelle en FVI envoient un message aux propriétaires des parcelles qui les intéressent, lesquels répondent favorablement aux demandes reçues leur permettant de céder les parcelles auxquelles ils tiennent le moins, les critères d'intérêt variant selon les conditions de l'agriculteur. Pour finir, les exploitants demandeurs choisissent, parmi les réponses favorables, celle qui leur convient le mieux (essentiellement selon un critère d'accès à l'eau) ;

⁶⁸ "La tarification dans les GIC dépendra des frais de fonctionnement et sera suivie par le CRDA" (entrevue du 28/7/98 avec le responsable de l'arrondissement maintenance des PPI au CRDA de Kairouan). Il semble que le prix de l'eau dans les GIC est également soumis à une contrainte d'homogénéité régionale de la tarification dans les périmètres publics (rapport du CRDA de Kairouan sur l'évaluation des PPI).

⁶⁹ Les notes de travail de Nicolas Faysse (comm. pers.) suite à ses enquêtes sur plusieurs GIC de la plaine, le mémoire de fin d'étude de Lardilleux (2000), les considérations de Daoud (1996) montrent la gestion en GIC n'est pas toujours plus efficace qu'en PPI, du moins dans un premier temps.

- les propriétaires de puits recherchent des parcelles dénuées d'accès à l'eau et "reposées" depuis au moins 3 ans.

Comme le montre la figure 24, les échanges en FVI sont motivés par des conditions limitantes ou au contraire excédentaires, et par la possession d'un puits :

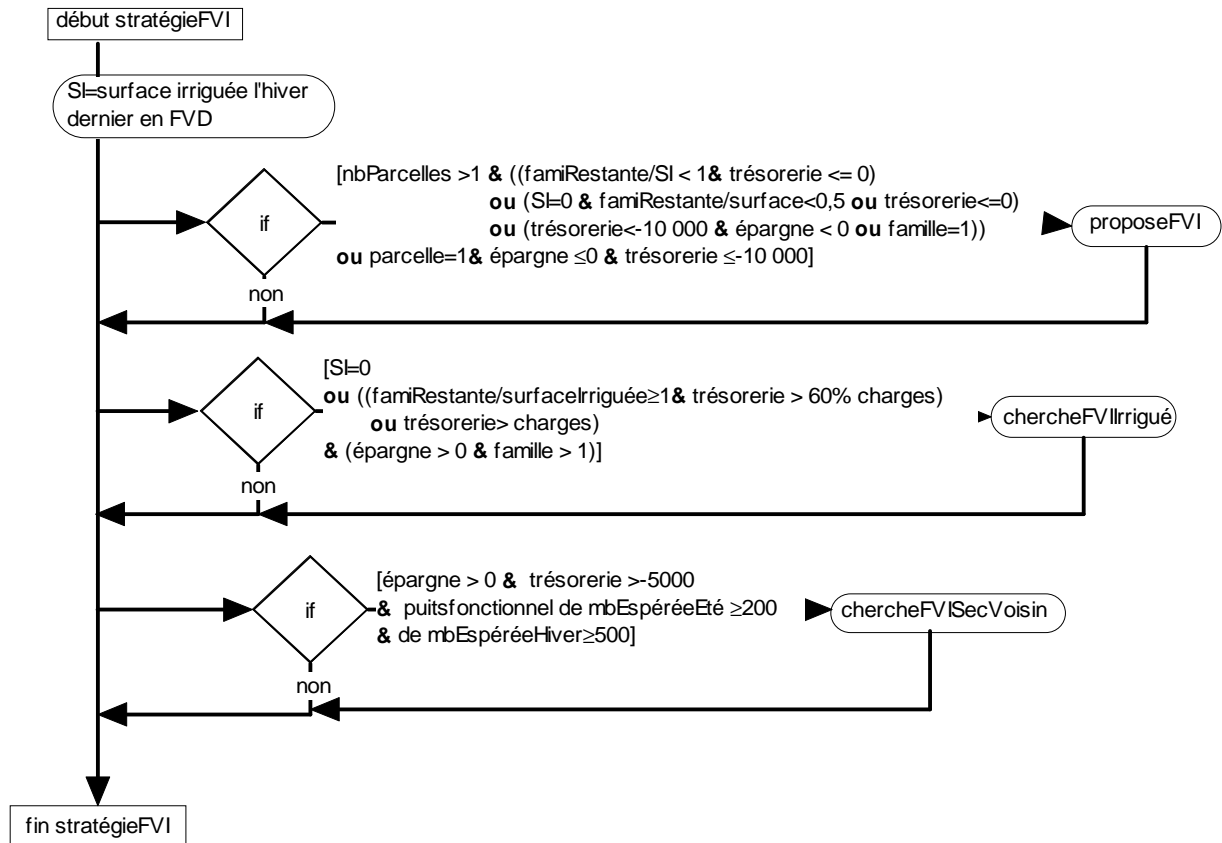


Fig. 24 : Diagramme d'activité représentant la stratégie d'échange foncier. FVI=faire-valoir indirect. FVD=faire-valoir direct. FamiRestante : actifs familiaux non salariés. Le calcul de la surface irriguée permet d'évaluer le nombre d'actifs par hectare irrigué, indicateur qui incite un agriculteur à donner ou au contraire à prendre une parcelle en FVI. Charges = charges moyenne par hectare irrigué.

Décrivons ce diagramme pas à pas. L'exploitant commence par faire le bilan de la surface qu'il a cultivée en irrigué l'hiver précédent afin d'estimer sa capacité en main d'œuvre de travail. Un premier cas de figure se présente alors à lui : une situation défavorable en terme de trésorerie, d'épargne et/ou de main d'œuvre le pousse à proposer une parcelle en FVI s'il en a au moins deux en propriété, ou une situation plus défavorable encore le pousse à proposer son unique parcelle en FVI. Un deuxième cas de figure, à peu près diamétralement opposé est possible : une situation au contraire favorable sur le plan de la main d'œuvre, de la trésorerie le pousse à rechercher une parcelle à prendre en FVI, si toutefois il n'est pas à mener son exploitation, et n'est pas endetté. Enfin, s'il possède un puits, n'est pas trop endetté à court terme et espère tirer de bons revenus de son puits étant donné sa

profondeur de captage, il recherche une parcelle à prendre en FVI au voisinage de son puits (cf. annexe 3.b).

Les procédures "proposeFVI", "chercheFVI Irrigué" et "chercheFVI Sec Voisin" déclenchent des envois de messages comme le montre la figure 25 :

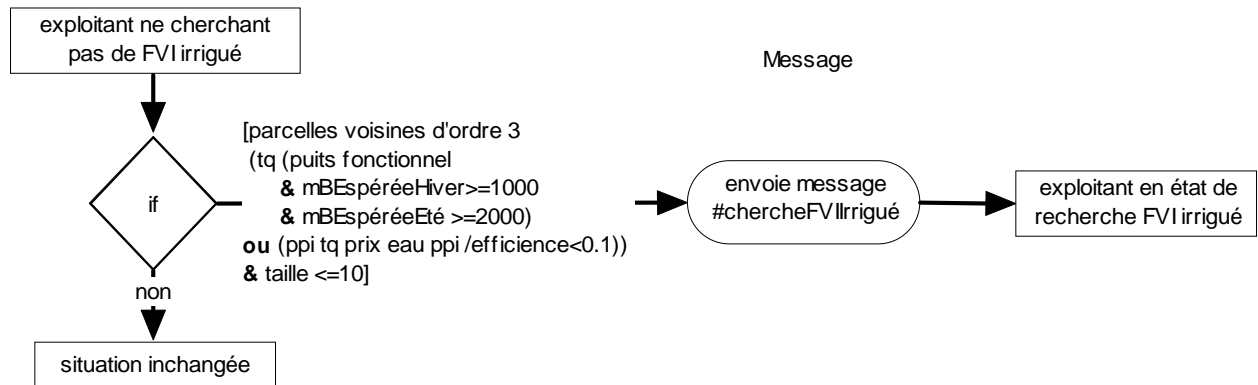


Fig. 25 : Diagramme d'activité représentant la stratégie de recherche d'une parcelle irriguée à prendre en FVI. Efficienc=efficacité technique moyenne de distribution des PPI. mB=marge brute.

La recherche d'une parcelle irriguée est dirigée vers les parcelles voisines directes et indirectes équipées de puits ou desservies par un PPI ; dans le premier cas, la marge brute espérée de l'hectare irrigué par le puits⁷⁰ doit être suffisamment attrayante, dans le second, le rapport entre le prix de l'eau et l'efficacité du PPI doit être suffisamment faible.

Parmi les propositions adressées à ses parcelles, le donneur potentiel sélectionne celles qui lui conviennent en fonction de ses préférences (qui dépendent de ses accès à l'eau, de sa famille, de son niveau d'endettement, cf. annexe 3.b). L'explicitation de ce processus de choix repose sur l'analyse des 24 cas répertoriés par le sondage, parmi lesquels figurent par exemple des exploitants seuls sur leur exploitation, non endettés, qui choisissent de donner leur unique parcelle en PPI en ne conservant en FVD que leurs parcelles en sec, ou des exploitants dotés d'une grande famille, mais endettés qui font le même choix. Les autres cas semblent indiquer qu'en dehors de conditions familiales ou économiques limitantes, les agriculteurs donnent une parcelle en sec, munie d'un puits non fonctionnel, ou en PPI, en conservant pour eux leur parcelle dotée d'un puits fonctionnel. Face à ces alternatives⁷¹, le preneur potentiel finit par choisir, d'après les réponses favorables à sa requête, la parcelle qui lui convient le mieux⁷² : s'il a un puits fonctionnel, il préfère prendre une parcelle en sec à

⁷⁰ La marge brute espérée est calculée sur la base d'un assolement moyen, d'un climat moyen, et ne tient pas compte de l'aléa sur les cultures maraîchères.

⁷¹ L'intérêt accordé à une parcelle dépend aussi de facteurs non pris en compte tels que l'éloignement du domicile, la qualité du sol, l'attachement, la taille, la surface plantée...

⁷² Ces hypothèses sur les préférences du preneur reposent essentiellement sur les enquêtes approfondies E9 (prend des terres en PPI faute de mieux), E6, E11, E17, E20 (prennent des terres neuves ou reposées qu'ils

irriguer avec son puits, si possible n'ayant jamais été irriguée, sinon il recherche de préférence une parcelle munie d'un puits fonctionnel si possible, et en dernier lieu il opte pour une parcelle en PPI (cf. annexe 3.b).

Une fois effectués les échanges fonciers, les exploitants procèdent à des stratégies d'assolement qui dépendent en partie du statut de la parcelle.

3.3.3. Représentation disjointe de l'assolement et de l'irrigation

Les enquêtes conduisent à supposer que pour des parcelles de même type (statut, accès à l'eau, etc.) la composition culturale de la sole cultivée est peu variable. **Pour faciliter la modélisation du processus d'irrigation, la sole irriguée a été décomposée en deux termes : la surface irriguée**, dont le choix varie en fonction du statut de la terre, de la capacité d'irrigation du puits ou de caractéristiques économiques en PPI (voir infra), et **la composition culturale de la sole irriguée**, qui dépend essentiellement du type d'accès à l'eau, du statut de la terre et de la surface irrigable dans l'exploitation. Le statut de la terre intervient au niveau des deux termes : les enquêtes approfondies montrent que les exploitants cultivent plus intensément les terres prises en FVI que les leurs, non contraints par des soucis de rotation et d'épuisement du sol, ce que les statistiques sur le système réel confirment avec des écarts significatifs entre parcelles en FVI et en FVD, sur les plans de l'assolement et du taux d'irrigation. L'effet d'une augmentation du coût de l'eau - *via* son impact sur la marge brute - est supposé porter essentiellement sur la proportion de parcelle à irriguer plutôt que sur la composition de la sole cultivée, qui subit une certaine inertie tant que la marge brute est positive et l'endettement, limité.

3.3.3.1. Choix des cultures : une stratégie et une aversion au risque implicites

Les cultures sont regroupées en types de culture (maraîchage d'été, d'hiver, céréales, arboriculture fruitière et oliviers, dont la composition est donnée en annexe 3.i). La composition de la sole cultivée et en particulier irriguée a été reconstituée à partir des statistiques effectuées sur les différents types de parcelles⁷³. L'assolement d'une parcelle peut ainsi varier d'un pas de temps au suivant, si les facteurs mentionnés plus haut (accès à l'eau, mode de faire-valoir, etc.) varient. Cependant la surface plantée en oliviers ou en arbres fruitiers, si elle peut être accrue, ne peut être diminuée (à moins pour l'arboriculture

irriguent avec leur puits, ou des terres munies de puits) et E4 et E34 (déclarent leur intention de prendre des parcelles qu'ils irrigueront avec leur puits).

⁷³ Les différences de composition de l'assolement n'ont été retenues que lorsqu'elle étaient significativement différentes, compte tenu du nombre de cas observés.

fruitière hors oliviers, d'abandonner l'irrigation⁷⁴). D'autre part les plantations limitent la surface irrigable sur une parcelle, même si l'intercalaire est très pratiqué.

Dans sa thèse sur l'effet de la tarification de l'eau sur les choix cultureux et techniques en PPI dans une région du nord-est de la Tunisie, Belhaj Hassine (1997) insiste, d'une part sur l'effet significatif du prix de l'eau sur l'assolement, d'autre part sur la prise en compte nécessaire de l'aversion au risque des exploitants. Son raisonnement est cependant fondé sur des modèles économiques dont les hypothèses sont très différentes de celles qui sont posées dans ce travail⁷⁵. Par rapport aux stratégies d'assolement, qui ne sont pas explicitement représentées, l'allocation de la surface irriguée aux cultures maraîchères est supposée peu sensible au prix de l'eau dans ce travail, leur valeur ajoutée étant assez importante, et que c'est la surface totale irriguée et non la composition de la sole irriguée, qui est surtout touchée par les variations du prix de l'eau, en PPI du moins⁷⁶. Au niveau des puits, la stratégie d'irrigation obéit à une logique « tout ou rien » : tant que l'agriculteur n'est pas très endetté, il essaye d'utiliser son puits au maximum de ses capacités, en ayant recours aux crédits de campagne et en prélevant sur son épargne si nécessaire. Dans tous les cas, lorsque le gain espéré est inférieur à un certain seuil, l'assolement est bouleversé, et la parcelle n'est plus cultivée qu'en céréales en sec, avec une irrigation de complément, tant que la marge brute espérée par hectare demeure positive. Une analyse des données de production des exploitations sur plusieurs années permettrait de préciser l'impact du prix de l'eau sur le choix des cultures et sur la surface à irriguer. Par ailleurs, une aversion au risque à moyen terme est prise en compte implicitement à travers les différences d'assolement selon le statut de la terre et son accès à l'eau. Par exemple, en PPI le risque lié aux cultures maraîchères est plus élevé du fait des problèmes de distribution. En outre, un agriculteur qui prend une parcelle en FVI montre peu d'aversion au risque. Une enquête ciblée sur l'aversion des exploitants aux risques à moyen et long termes permettrait de préciser cette question, notamment d'étudier l'hétérogénéité des comportements.

Les différents stades d'enquête conduisent à penser que les stratégies de mise en culture, relativement stables, sont moins liées à des objectifs explicites (de recherche du meilleur revenu par exemple), qu'à des facteurs technico-socio-économiques tels que les habitudes

⁷⁴ Par mesure de simplification, la période d'installation des plantations n'a pas été prise en compte : les coûts d'investissement, la période non productive ou la demande en eau réduite des jeunes plants ne sont pas pris en compte.

⁷⁵ Dans ce modèle, les fonctions d'offre et de demande des agriculteurs sont dérivées à partir de leurs programmes de maximisation de profit en environnement déterministe ou de maximisation de l'espérance d'utilité en environnement aléatoire.

⁷⁶ Si Belhaj Hassine, 1997 montre sur des périmètres irrigués du nord-est de la Tunisie qu'une hausse du prix de l'eau a un impact significatif sur le choix des cultures, celui-ci consiste notamment à privilégier les cultures à forte valeur ajoutée, quel que soit leur niveau de consommation en eau, ce qui ne contredit pas l'hypothèse posée.

techniques, les traditions, les besoins alimentaires de l'exploitation, les débouchés traditionnels... La modélisation des choix cultureux repose finalement sur la description statistique des 889 parcelles classées selon les critères qui semblaient les plus pertinents dans le choix de l'assolement, compte tenu des connaissances acquises sur le comportement des exploitants.

En sec, les parcelles de surface inférieure ou égale à 5 hectares sont plantées à 70% en oliviers et cultivées à 30% en céréales, tandis que les parcelles de surface supérieure à 5 hectares sont plantées à 50% en oliviers et à 50% en céréales (tab. 8).

Tab. 8 : Assolement des différents types de parcelles irriguées. En raison de leur caractère pérenne le taux d'occupation des plantations est donné en fonction de la taille de la parcelle tandis que celui des cultures annuelles est donné en fonction de la taille de la sole irriguée. Les valeurs données par le tableau correspondent aux moyennes issues du sondage⁷⁷ ; un test de Student bilatéral ayant permis de montrer des différences significatives entre les types de parcelles.

Accès à l'eau Mode de faire-valoir	PPI ⁷⁸					PUITS			
	FVD			FVI		FVD			FVI
surface irrigable dans l'exploitation (en ha)	≤5	5-10	>10	≤5	>5	≤5	5-10	>10	toutes tailles
% de la sole irriguée cultivée en maraîchage d'hiver	50	50	30	40	30	60	50	40	50
% de la sole irriguée cultivée en céréales	50	50	70	60	70	40	50	60	50
% de la surface totale plantée en arboriculture fruitière	0	10	0	0	0	0	0	0	0
% de la surface totale plantée en oliviers	30	20	30	30	10	20	10	0	0

En dehors de l'arboriculture fruitière, la sole irriguée en été, soit une petite portion seulement de la parcelle, est entièrement consacrée au maraîchage.

Les précédents cultureux sont pris en compte implicitement dans les stratégies d'assolement des parcelles *via* la diversité des cultures pratiquées, la rotation culturale, et en FVI *via* la recherche de parcelles qui n'ont pas été irriguées depuis 3 ans au moins.

⁷⁷ Ne portant pas systématiquement sur tous les PPI, les données recueillies ici n'ont pas permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle en deçà d'une certaine efficacité, les parcelles des PPI sont intégralement plantées en oliviers (cas du PPI de Chébika décrit par Kefi, 1999). De fait, la présence de puits dans les PPI de Chébika conduit à penser que ces plantations font l'objet de cultures intercalaires.

⁷⁸ Une politique récente de prix de l'eau incitant à cultiver des céréales (50% de réduction du prix de l'eau en hiver dans les PPI) a été mise en place postérieurement aux travaux de terrain.

3.3.3.2. Les stratégies d'irrigation sur puits et en PPI

La proportion irriguée de la parcelle constitue l'attribut « tauxIrrigationHiver » ou « tauxIrrigationEté », selon la saison. Que ce soit en PPI ou à partir d'un puits, le taux d'irrigation d'une parcelle ne dépasse jamais un seuil maximal, surtout en faire-valoir direct (FVD) : les agriculteurs pratiquent une rotation culturale impliquant une jachère (en contrepartie les apports en engrais ne sont pas optimaux) et respectent un temps de retour donné pour certaines cultures, comme la pastèque. La figure 26 résume les stratégies d'irrigation représentées dans SINUSE, suivant que la parcelle est irriguée par un puits ou est en PPI :

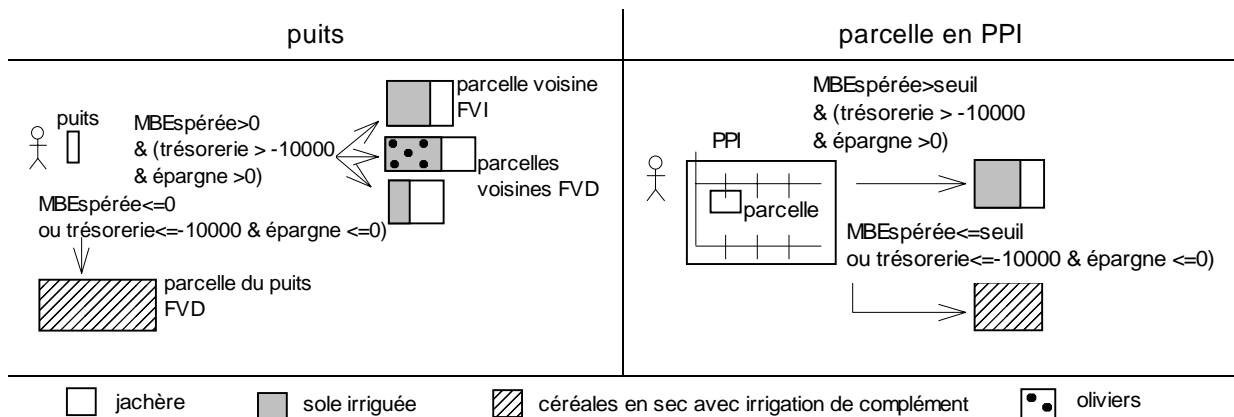


Fig. 26 : Schématisation des stratégies d'irrigation. MB=marge brute. FVD=faire-valoir direct. FVI=faire-valoir indirect. Seuil=valeur seuil de la marge brute. Les exploitants gèrent l'irrigation au niveau du point d'accès à l'eau : par puits, et au niveau des PPI, par parcelle

Une stratégie globale d'irrigation, telle que présentée par la figure 27, passe en revue le cas des différentes parcelles.

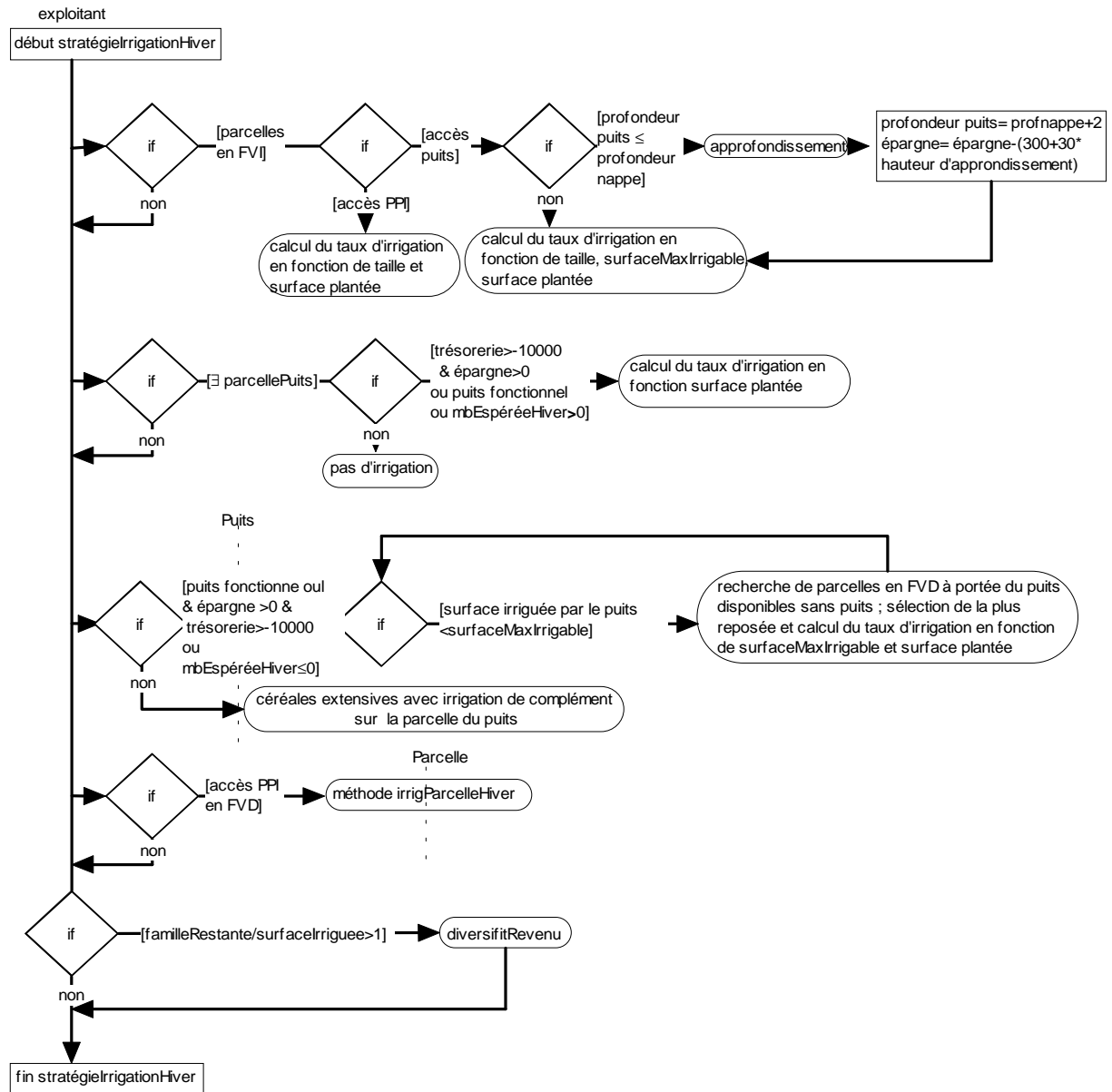


Fig. 27 : Diagramme d'activité de la stratégie d'irrigation en hiver. ParcellePuits = parcelle ayant fait l'objet d'un contrat de type *mouzaraâ*

L'exploitant se préoccupe d'abord de la parcelle en FVI s'il y en a. Si cette parcelle est en PPI, son taux d'irrigation dépend de sa surface plantée (l'intercalaire étant pratiqué entre les oliviers, mais pas entre les arbres fruitiers), et de sa taille. Si elle est irriguée par un puits (le puits de l'exploitant ou celui du propriétaire de la parcelle), l'exploitant vérifie d'abord que la profondeur du puits est suffisante. Si ce n'est pas le cas, il approfondit le puits à ses propres frais, puis calcule le taux d'irrigation de la parcelle de manière à la cultiver au maximum, compte tenu de sa surface plantée, et de la capacité du puits. S'il a pris une parcelle en

mouzaraâ, qu'il n'est pas trop endetté et que le puits a bien été approfondi auparavant⁷⁹ l'exploitant calcule son taux d'irrigation compte tenu de sa surface plantée, de la capacité du puits de la parcelle, et de la rotation effectuée sur 4 ans. S'il possède des puits, n'est pas trop endetté et que la marge brute espérée des puits est positive, l'exploitant se préoccupe alors des parcelles que chaque puits irriguera cette année (avec une préférence pour les parcelles reposées) et de leur taux d'irrigation, compte tenu de la capacité du puits, de la parcelle déjà irriguée en FVI par le puits (s'il y en a une), de la surface plantée des parcelles et de la rotation sole cultivée/jachère. En revanche, s'il est très endetté ou si la marge brute espérée des puits est négative, l'exploitant se contente d'utiliser ses puits pour l'irrigation d'appoint des céréales cultivées "en sec" sur les parcelles où sont situés les puits. Une parcelle à la fois équipée d'un puits et desservie par un PPI ne prélève que sur le puits, par mesure de simplification. Enfin, s'il a des parcelles en PPI, l'exploitant les irrigue selon la procédure "irrigParcelleHiver" (ou "irrigParcelleEté", en été), explicitée par la suite.

Une fois le plan d'irrigation des différentes parcelles établi pour la saison, le bilan des membres actifs de la famille réquisitionnés pour la mise en culture des parcelles conduit, en cas d'actifs disponibles, à diversifier les revenus du système exploitation famille *via* des emplois temporaires d'ouvriers agricoles ou en bâtiment (cf. annexe 3.I).

La figure 28 illustre la succession culturale sur une parcelle type de 5 hectares, irriguée par un puits, et comportant quelques oliviers. Ce cas de figure correspond à un taux d'irrigation de 60% en été comme en hiver (donc une absence de rotation entre parcelles).

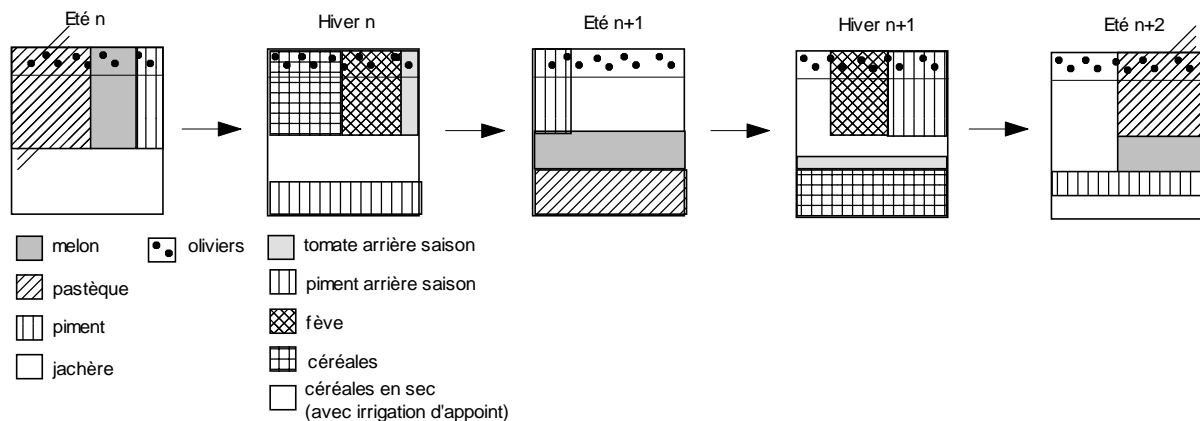


Fig. 28 : Assolements saisonniers successifs sur une parcelle type irriguée par un puits. L'intercalaire est pratiqué au gré des rotations culturales. Ce schéma correspond à une reconstitution à partir des assolements moyens donnés par le sondage, des informations sur les rotations culturales données par les enquêtes approfondies.

⁷⁹ On verra par la suite que dans le déroulement d'un pas de temps les puits sont normalement soumis à un test de profondeur : s'ils ne sont pas plus profonds que la nappe et si l'exploitant n'est pas trop endetté alors ils sont approfondis.

Voyons maintenant selon quelles règles est décidé le taux d'irrigation d'une parcelle en PPI, exploitée en FVD. Cette méthode est modélisée au niveau des objets parcelle.

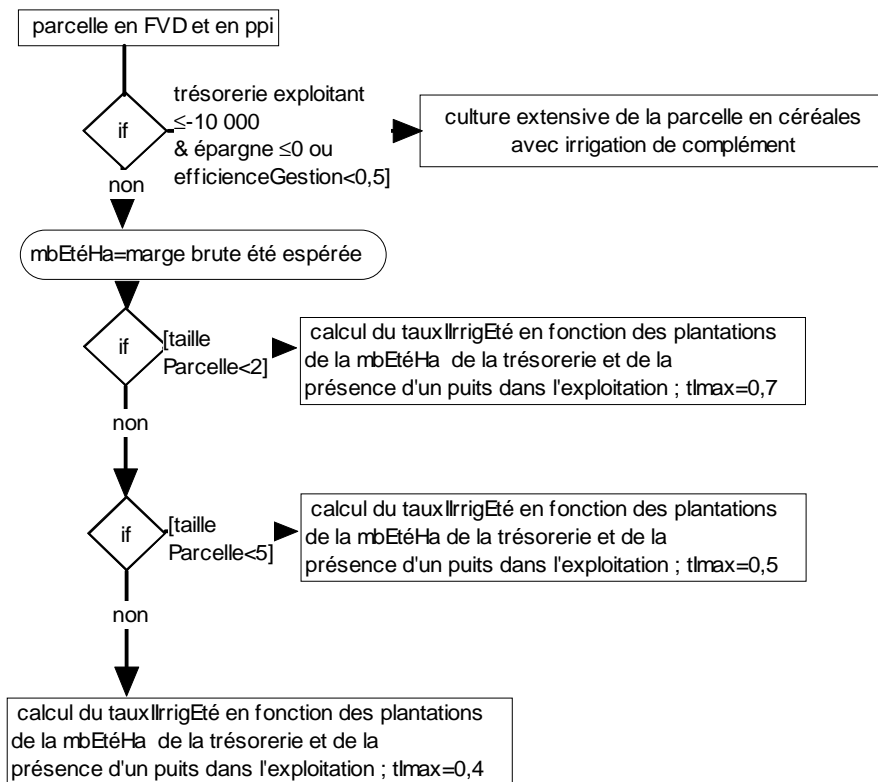


Fig. 29 : Diagramme d'activité de l'irrigation d'une parcelle en PPI cultivée en faire-valoir direct, en été. T_{max}=taux d'irrigation maximal pratiqué (compte tenu de la rotation). FVD=faire-valoir direct. MbEtéha=marge brute espérée par hectare. TauxIrrigEté =taux d'irrigation adopté.

La figure 29 illustre les règles de décision de l'exploitant pour l'irrigation de chacune de ses parcelles en PPI, en été. En cas d'endettement important ou de gestion de la distribution en eau du PPI peu satisfaisante, la parcelle est entièrement cultivée en céréales en sec, avec une irrigation d'appoint. Dans le cas contraire, l'exploitant commence par estimer la marge brute qu'il peut espérer sur cette parcelle, par hectare irrigué. Il choisit alors le taux d'irrigation, en fonction de la taille de la parcelle, du niveau de marge brute espérée, de sa trésorerie et de la surface plantée. Si l'exploitant possède un puits par ailleurs, il a tendance à délaissier l'irrigation de sa parcelle, surtout en été.

Sur les parcelles disposant d'un accès à l'eau, la conduite des oliviers est menée en irrigué afin de régulariser la production⁸⁰, en grande partie *via* les cultures intercalaires, la partie hors intercalaire faisant systématiquement l'objet d'une irrigation de complément (en fonction des apports pluviométrique). Cette stratégie, qui peut paraître irrationnelle sur le plan

⁸⁰ D'après les discussions enquêtes auprès des exploitants, l'olivier non irrigué ne produit qu'une année sur deux, et de manière irrégulière ; Par contre, la qualité de l'olive est jugée meilleure sans irrigation.

économique, dès que le prix de l'eau dépasse un certain seuil⁸¹, est discutée en troisième partie.

Ces hypothèses ainsi que les seuils retenus reposent notamment sur des informations issues de l'Unité régionale de suivi et d'évaluation des périmètres irrigués mise en place par le CRDA⁸², sur l'analyse détaillée des exploitants ayant déclaré avoir diminué leur surface irriguée en PPI, ainsi que sur un calage des résultats de simulation sur les données de terrain : la répétition de plusieurs simulations dans des conditions proches de celles du terrain doit permettre de retrouver approximativement la même proportion de parcelles non irriguées en été et en hiver, ainsi que le même assolement en moyenne sur les PPI⁸³.

En conclusion, dans le modèle, l'assolement sur une parcelle donnée varie peu d'une année sur l'autre, sauf en cas de changement du statut de la parcelle, ou de situation économique très différente. Une rotation est néanmoins permise entre jachère et sole cultivée, et entre cultures de la sole cultivée, l'irrigation n'étant pas menée sur toute la surface et la sole irriguée étant composée de plusieurs cultures.

Voyons maintenant comment est calculé la marge brute au niveau d'une parcelle, compte tenu de la différenciation opérée entre taux d'irrigation et composition culturale.

3.3.3.3. Le calcul de la marge brute sur la parcelle, fonction du taux d'irrigation et de l'assolement.

La formule générique de la marge brute réalisée au niveau d'une parcelle irriguée se décompose en quatre termes :

$MB_n = MB_k + MB_{ol} + MB_{arbo} + MB_{cerSec}$ où MB_n est la marge brute de la parcelle n et...

- MB_k la marge brute des cultures annuelle irriguées fonction du taux d'occupation de chaque culture dans la sole irriguée et du taux d'irrigation ;
- MB_{ol} la marge brute des oliviers fonction de la proportion de la parcelle plantée en olivier et de la part d'oliviers irriguée par les cultures intercalaires ;
- MB_{arbo} celle des arbres fruitiers fonction de la proportion de la parcelle plantée en arbres fruitiers ;

⁸¹ Sans tenir compte des apports en eau *via* les cultures intercalaires, et des années climatiques favorables, la marge brute moyenne de l'olivier devient négative dès que le prix de l'eau dépasse 0,08 DT/m³, ce qui est rapidement le cas en PPI, étant donnée l'augmentation annuelle de 15%.

⁸² Considérations selon lesquelles la sous-utilisation des PPI est due à l'état dégradé des infrastructures et à l'intérêt que portent les agriculteurs pour leur parcelles hors PPI.

⁸³ Le taux d'irrigation en été est plus sensible qu'en hiver car le maraîchage d'été est une culture à risque : 42% des agriculteurs en PPI n'irriguent pas l'été seulement, 12% n'irriguent pas l'hiver seulement, 3% n'irriguent pas du tout.

- et MB_{cerSec} la marge brute des céréales cultivées en sec fonction du taux d'irrigation.

Comme on l'a déjà vu ces termes sont également fonction du prix de l'eau et des apports pluviométriques. Donnons le détail de chacun de ces termes.

$$MB_k = s_n \cdot t_n \cdot \sum_k s_k \cdot \left(P_k - C_k - \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{Et_n} \right)$$

Où S_n la surface, PE_n le prix de l'eau sur la parcelle n , Et_n l'efficacité technique de la distribution sur la parcelle n , t_n la proportion de sole irriguée (ou "taux d'irrigation"), s_k la proportion de sole irriguée occupée par la culture k , P_k , C_k , D_k et CP_k respectivement le produit brut, la somme des charges (hors charges d'irrigation), la demande en eau et le coefficient de réduction de la demande en eau de la culture k , dû aux apports pluviométriques durant les phases de croissance de la culture (cf. annexe 3.i). Rappelons qu'une partie de ces cultures annuelles irriguées peut être cultivée en intercalaire. Les excédents et pertes de cette irrigation étant censés bénéficier aux plantations, l'irrigation de l'olivier ne porte que sur la partie hors intercalaire de la plantation.

$$MB_{ol} = s_n \cdot t_{ol} \left[\left(P_{olr} - C_{olr} \right) - \frac{hI \cdot CP_{olr} \cdot 0,4 \cdot D_{olr} \cdot PE_n}{Et_n} \right]$$

Où t_{ol} la proportion de parcelle plantée en oliviers, P_{olr} , C_{olr} , D_{olr} et CP_{olr} respectivement le produit brut, les charges, la demande en eau et le coefficient de réduction pluviométrique unitaires pour l'olivier en irrigué.

$$MB_{arbo} = s_n \cdot t_{arbo} \left(P_{arbo} - C_{arbo} - \frac{D_{arbo} \cdot CP_{arbo} \cdot PE_n}{Et_n} \right)$$

Où t_{arbo} la proportion de parcelle plantée en oliviers, P_{arbo} , C_{arbo} , D_{arbo} et CP_{arbo} respectivement le produit brut, les charges, la demande en eau et le coefficient de réduction pluviométrique unitaires pour l'olivier en irrigué.

$$MB_{cerSec} = (1 - tI_n) \cdot \left(P_{Cer} - C_{cer} - \frac{D_{cerIr} \cdot CP_{cerIr} \cdot 0,7 \cdot PE_n}{Et_n} \right)$$

Où P_{cer} , C_{cer} , D_{cerIr} et CP_{cerIr} respectivement le produit brut moyen (en climat moyen) des céréales cultivées en sec, la somme des charges unitaires pour les céréales en sec, le besoin en eau affecté du coefficient pluviométrique des céréales en irrigué (à hauteur de 70% des besoins, s'agissant d'une irrigation d'appoint). Les céréales, comme les oliviers, sont supposées bénéficier d'une irrigation d'appoint tant que leur marge brute espérée demeure positive⁸⁴ (en absence d'accès à l'eau, les oliviers adultes résistent, mais les niveaux de charge et de rendement sont moindres). La demande en eau de l'olivier est affectée d'un coefficient 0,4 correspondant à la part d'irrigation de l'hiver, son complément étant apporté en été⁸⁵.

Dans le modèle, les termes MB_{ol} et Mb_{cerSec} ne sont pris en compte qu'en hiver, saison de récolte des olives et des céréales, tandis que le terme MB_{arbo} n'est pris en compte qu'en été. Cependant on estime que 60% des apports en eau de l'olivier sont apportés en été, ce qui implique un coût d'irrigation supplémentaire pour les oliviers hors intercalaire.

Les prix des produits, rendements et charges proviennent de normes régionales et de moyennes issues de quelques enquêtes. Comme les itinéraires techniques, le rendement est considéré peu variable dans le système agraire, et est ramené à une moyenne, par simplification.

La demande en eau des cultures irriguées provient des besoins en eau des cultures calculés à partir (i) de l'ETP moyenne (formule donnée par Riou, 1980), (ii) des coefficients culturaux de la FAO, (iii) des apports en eau moyens pratiqués dans la zone, estimés à partir des enquêtes (iv) et de la pluviométrie mensuelle relevée dans la zone d'étude (cf. annexe 3.i). La demande en eau est supposée peu varier entre individus et entre parcelles de même assolement, ce qui implique une relative homogénéité des pratiques et des sols, comme déjà signalé. Le terme D_{kn} correspond finalement à la demande d'une année de référence, corrigée par le coefficient CP qui correspond à l'effet de la pluviométrie mensuelle de l'année simulée sur la demande en eau.

Le calcul de CP a été effectué sur la base des 20 dernières années pluviométriques relevées dans la zone d'étude (cf. annexe 3.i).

⁸⁴ On suppose que son comportement sécuritaire pousse l'exploitant à préférer une marge brute proche de zéro en irrigué, plutôt qu'une marge brute espérée plus forte en sec, avec un risque accru, en cas de pluviométrie insuffisante.

⁸⁵ source : calcul du bilan hydrique mensuel de l'olivier à partir des données de la FAO.

Les fluctuations de prix intra-saisonnières et les risques climatiques et phytosanitaires sont implicitement pris en compte à travers un coefficient aléatoire affecté au produit brut du maraîchage d'été (voir annexe 3.e).

Les stratégies d'échanges fonciers, d'assolement et d'irrigation ont été présentées. Voyons maintenant comment sont formalisées les stratégies à long terme.

3.3.4. Les stratégies à long terme

Dans le cycle des décisions modélisé dans SINUSE, les agriculteurs "font le point" en fin d'année sur l'orientation de l'exploitation, matérialisées par des investissements, l'acquisition d'un accès à l'eau, l'extension ou au contraire la diminution du parcellaire.

Contrairement aux modèles classiques nappe-usages qui considèrent un nombre fixe d'usagers (lorsqu'ils ne considèrent pas les usages comme un volume global), le modèle SINUSE prend en compte les stratégies d'investissement à l'origine de l'apparition de nouveaux captages. La figure 30 présente le déroulement de la stratégie à long terme, mise en œuvre annuellement par chaque exploitant, en cohérence avec sa situation et ses objectifs implicites. Cette méthode appelle d'autres méthodes en fonction de la situation de l'exploitant. Ces méthodes sont elles-mêmes conditionnées par une série de paramètres. L'intention de construire un puits, par exemple, n'aboutit pas forcément à sa réalisation, comme nous allons le voir dans ce qui suit.

La première branche du diagramme traite le cas des exploitants endettés à long terme. Selon son degré d'endettement, l'exploitant cherche à reconstituer son épargne en proposant de céder une parcelle en *mouzaraâ* (selon sa strate agricole, car ce type de contrat ne se pratique pas dans toute la zone⁸⁶), ou se voit contraint de vendre une de ses parcelles, dont le choix dépend d'un ordre de préférence lié au type d'accès à l'eau de la parcelle (cf. annexe 3.b). L'endettement doit être très important pour que l'exploitant vende son unique parcelle. Les procédures « proposeMouzaraâ » et « proposeParcelle » consistent à envoyer des messages de proposition dans le voisinage, qui seront traités par la suite. En particulier, l'exploitant ne vendra sa parcelle que si la tentative de *mouzaraâ* a échoué.

La deuxième branche du diagramme concerne les exploitants dépourvus de puits : ceux-ci cherchent à construire un puits, sauf s'ils sont seuls. L'exploitant peut parvenir à cet objectif selon plusieurs méthodes, mises en oeuvre à tour de rôle, dans un ordre de préférence, si la précédente a échoué : la construction d'un puits "par imitation" sur une parcelle de taille intéressante ("faitUnPuits"), sur une petite parcelle ("faitUnPuitsPetiteParcelle"), sur une parcelle en PPI ("faitUnPuitsPPI"), dans des conditions risquées ("faitUnPuitsRisque")⁸⁷ ou en association avec un voisin ("proposeAssociation"). Ces méthodes peuvent échouer : absence d'une parcelle répondant aux conditions requises, épargne insuffisante, ou échec à la construction. Si le facteur limitant est l'épargne, mais que l'exploitant possède une parcelle favorable à la construction d'un puits, il s'abstient de mettre en oeuvre des méthodes moins intéressantes et préfère attendre d'avoir renfloué son épargne.

La troisième branche du diagramme est mise en oeuvre si l'exploitant possède déjà un ou plusieurs puits.

⁸⁶ D'après plusieurs enquêtes informelles.

⁸⁷ Cette entreprise risquée est mise en oeuvre selon une probabilité qui correspond à la part de la population non averse au risque, calé en fonction des résultats de simulations de manière à retrouver un taux d'apparition des puits "pionniers" réaliste.

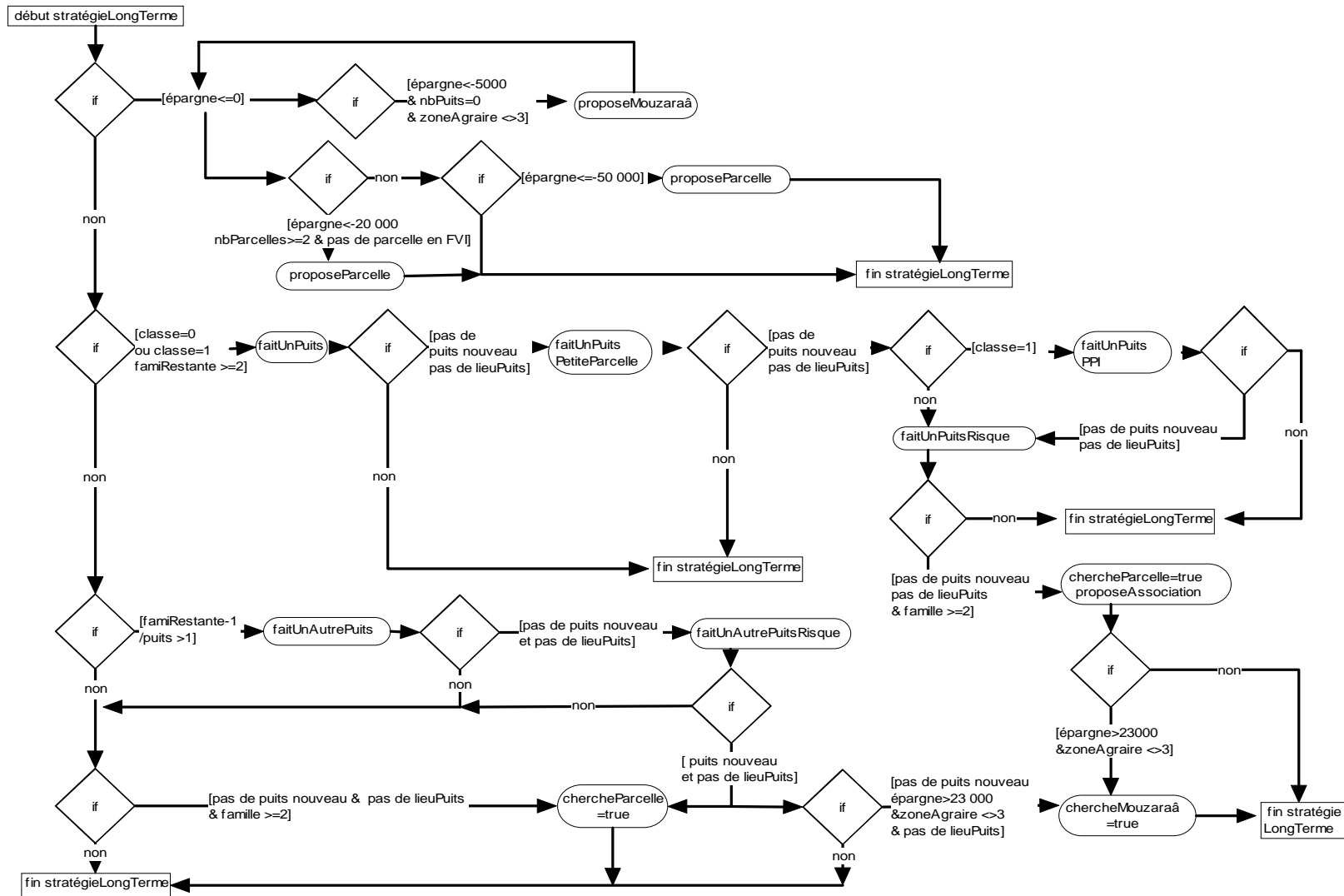


Fig. 30 : Diagramme d'activité de la stratégie à long terme. LieuPuits=parcelle potentiellement intéressante pour la construction d'un puits. famiRestante=actifs familiaux non salariés.

Suivant le rapport du nombre de puits et d'actifs familiaux dans l'exploitation, il peut chercher à en construire un autre, mais les procédures, toujours mises en œuvre dans un ordre de préférence, sont plus contraignantes que les précédentes (en terme de capacité de paiement, de taille de la parcelle...), pour symboliser une plus forte volonté d'*acquérir l'irrigation privée*, quitte à construire son puits dans des conditions moyennement satisfaisantes, qu'à *l'étendre*.

Enfin, si aucun investissement n'a eu lieu et s'il ne possède pas déjà une parcelle favorable à la construction d'un puits dans le futur, l'exploitant cherche à acheter une parcelle dans son voisinage (l'attribut "chercheParcelle" permettra par la suite à l'exploitant de recevoir et de dépouiller les propositions de parcelles à vendre), et s'il est suffisamment riche, à prendre une parcelle en *mouzaraâ*⁸⁸ (de même l'attribut "chercheMouzaraâ" permet à l'exploitant de traiter les propositions de *mouzaraâ*).

Les agents exploitants du modèle ne peuvent réaliser qu'un seul investissement par an, ce qui correspond à une mesure de simplification assez réaliste : il s'agit d'une décision lourde, qui demande un certain temps de réflexion, de travail, de recherche de finances. Les différentes procédures de construction de puits sont répertoriées par le tableau 9 :

Tab. 9 : Les différentes voies de construction d'un puits

Procédure de construction de puits	Description
faitUnPuits	Tentative de construction d'un premier puits dans un lieu favorable, sur une parcelle de taille suffisante, hors PPI, avec une épargne disponible à hauteur de 65% du prix du puits
faitUnPuitsRisque	Tentative de construction d'un premier puits pionnier, selon une propension à la prise de risque, sur une parcelle de taille suffisante, hors PPI, avec une épargne disponible à hauteur de 100% du prix du puits
faitUnPuitsPetiteParcelle	Tentative de construction d'un premier puits dans un lieu favorable, sur une parcelle de petite taille mais entourée de parcelles proposées en FVI, hors PPI, avec une épargne disponible à hauteur de 65% du prix du puits
faitUnPuitsAssociation	Tentative de construction d'un premier puits dans un lieu favorable, en association avec un voisin, sur une parcelle de taille suffisante ou petite, hors PPI, avec une épargne disponible à hauteur d'au moins 30% du prix du puits ; cette procédure implique un échange de messages
faitUnPuitsPPI	Tentative de construction d'un premier puits dans un lieu favorable, sur une parcelle de taille suffisante, en PPI, avec une épargne disponible à hauteur de 65% du prix du puits
faitUnAutrePuits	Tentative de construction d'un autre puits dans un lieu favorable, sur une parcelle de taille suffisante, hors PPI, avec une épargne disponible à hauteur de 80% du prix du puits
faitUnAutrePuitsRisque	Tentative de construction d'un autre puits pionnier, selon une propension à la prise de risque, sur une parcelle de taille suffisante, hors PPI, avec une épargne disponible à hauteur de 100% du prix du puits
mouzaraâ	recherche d'une parcelle de taille suffisante en lieu favorable à prendre en FVI pendant 4 ans et à équiper d'un puits

⁸⁸ ne connaissant pas à l'avance le montant de l'investissement, on suppose que l'exploitant se lance dans l'opération seulement s'il possède une épargne au moins égale au prix de construction d'un puits en zone profonde.

En cas d'échec de la construction, l'exploitant ne fait pas de deuxième tentative de construction dans le foulée, mais il peut réitérer l'année qui suit⁸⁹. La figure 31 donne à titre d'exemple le déroulement de la procédure "faitUnPuits" de construction d'un puits.

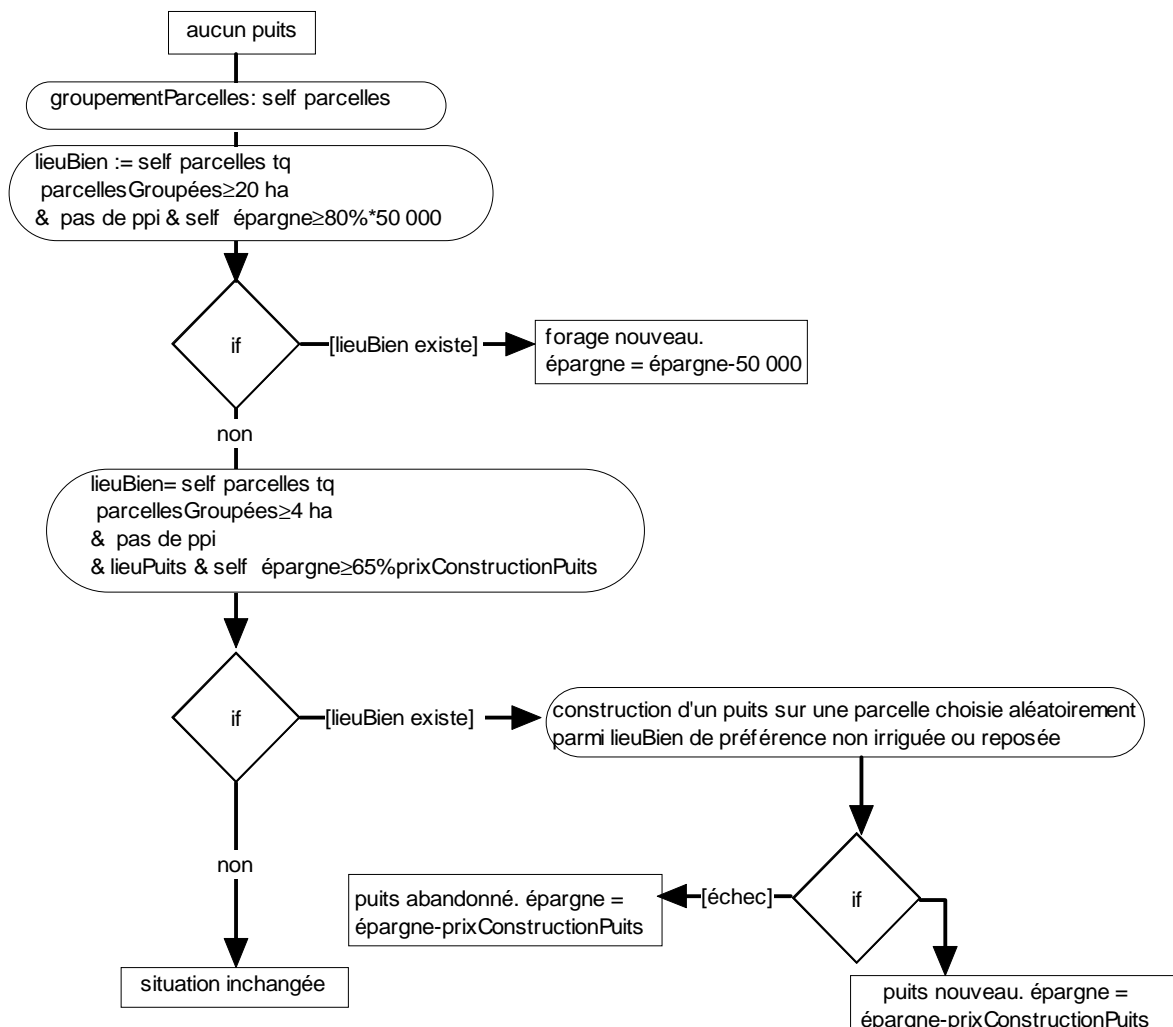


Fig. 31 : Diagramme d'activité de la méthode « faitUnPuits ». LieuPuits=lieu intéressant pour la construction d'un puits

Décrivons ce diagramme pas à pas. Pour construire son puits l'exploitant regroupe d'abord ses parcelles adjacentes de manière à obtenir des groupements de taille suffisante, afin de rentabiliser la construction du puits. S'il réussit à regrouper au moins 20 hectares de terres sans accès à l'eau, et qu'il possède au moins 50 000 DT, il investit dans un forage profond. Sinon, il sélectionne parmi les groupes de parcelles constitués ceux qui sont aptes à la construction du puits.

⁸⁹ On pourrait supposer une modification de l'aversion au risque en cas d'échec ; pour le moment cette hypothèse n'a pas été représentée.

Les parcelles doivent pour cela remplir plusieurs conditions :

- la parcelle sur laquelle est construit le puits ne doit pas avoir été irriguée depuis au moins un an ;
- son voisinage (au plus d'ordre 2) doit comporter des puits dont les propriétaires réussissent (ce qui se traduit par un niveau de revenu fixé à 1000 DT ; ce seuil sera testé en troisième partie), ce facteur exprimant l'importance de la pression sociale, du phénomène d'imitation, et indiquant un accès probable à la nappe ;
- son voisinage (d'ordre 1 et d'ordre 2) ne doit pas comporter de puits abandonnés ;
- l'exploitant doit disposer de 65% au moins du coût potentiel de construction, lequel est connu grâce à la profondeur des puits voisins ;
- si la parcelle est en PPI, la construction est justifiée si le rapport entre le prix de l'eau et le coefficient d'efficacité est grand (le seuil a été fixé à 0,1, en référence au prix actuel de l'eau et au plus petit coefficient d'efficacité, qui correspondraient à la situation du PPI de Chébika, où la construction de puits a été observée).

S'il possède des parcelles remplissant ces conditions, l'exploitant en sélectionne une aléatoirement et y construit son puits. Dans la réalité, cette sélection dépend de la combinaison de plusieurs paramètres difficiles à prendre en compte ici (attachement à la terre, qualité du sol, éloignement du domicile...), dont la hiérarchie varie suivant les individus.

Dans les stratégies à moyen ou long terme, l'aversion au risque est prise en compte de plusieurs manières : dans les stratégies à long terme le risque est représenté explicitement à travers la propension à construire un puits pionnier ou implicitement *via* l'importance des indicateurs de voisinage, à court terme il n'est représenté qu'implicitement *via* l'assolement des parcelles, fonction de leur accès à l'eau et de leur mode de faire-valoir. D'autre part l'aversion au risque n'est pas individualisée : elle ne dépend pas de l'agriculteur mais de ses conditions d'action, ce qui permet de rendre compte d'un phénomène observé sur le terrain : plusieurs puits "pionniers" ont été construits car il existait non loin un puits très ancien (non fonctionnel), témoin d'un accès à la nappe par le passé, lorsque les techniques de forages ne permettaient pas de creuser aussi profond qu'à l'époque actuelle.

Jusqu'ici plusieurs types de procédures du modèle SINUSE formalisant les stratégies des exploitants en termes d'échanges fonciers, d'irrigation, d'investissement ont été décrits. La réaction de la nappe aux prélèvements issus de ces comportements fait aussi l'objet d'une modélisation, présentée dans ce qui suit.

3.3.5. Impact des prélèvements sur la nappe

Les parcelles transmettent à leur point d'accès à l'eau les prélèvements des cultures, qui correspond à la somme des apports en eau de chaque culture, compte tenu de l'efficacité de distribution et pour les oliviers, de l'apport en eau théoriquement fourni par les cultures en intercalaire, comme le montre la formule suivante (pour l'hiver) :

$$Pr_n = \frac{S_n}{Et_n} \left[t_n \cdot \left(\sum_k s_k \cdot D_k \cdot CP_k \right) + hI \cdot D_{olivr} \cdot 0,4 \cdot CP_{olivr} \right]$$

où Pr_n est le prélèvement de la parcelle n , S_n la surface de la parcelle, Et_n l'efficacité de la distribution moyenne entre le point d'eau et les cultures, t_n la proportion irriguée de la parcelle, s_k la part de sole irriguée consacrée à la culture k , D_k la demande en eau de la culture k en année pluviométrique moyenne, multipliée par CP_k le coefficient d'ajustement lié à la pluviométrie de l'année en cours ; hI correspond à la surface de la parcelle plantée en oliviers sans cultures intercalaires.

Les paramètres hydrogéologiques ne sont pas affectés par le changement d'échelle opéré entre le système réel et le modèle, contrairement au système agraire. Par conséquent, les volumes prélevés sont multipliés par 10 au moment de leur transfert à nappe, pour respecter le changement d'échelle opéré par la modélisation.

Les zones de la nappe réagissent linéairement aux prélèvements et aux apports, tous les 6 mois, ce qui correspond à une série d'hypothèses simplificatrices sur la ressource : homogénéité dans l'espace et en profondeur, réservoir en « U ».

Dans le modèle, l'abaissement induit par les prélèvements et les apports saisonniers entraîne un gradient piézométrique entre les zones, induisant un transfert de volume entre les zones. Pour retrouver des gradients piézométriques réalistes à partir de différences de niveaux piézométriques ΔNP observées, la distance d des points de mesure a servi de paramètre de calage⁹⁰.

Le transfert est calculé d'après loi de Darcy, sur une durée de 6 mois et en référence au gradient du moment, l'inertie de la nappe étant relativement faible.

L'évolution saisonnière du niveau aval (partie de la nappe située hors de la zone d'étude) est régie par le "contrôleur" du modèle. Elle repose sur une prolongation des tendances de ces 10 dernières années, sachant que cette zone est moins soumise aux prélèvements que la zone d'étude.

⁹⁰le gradient piézométrique i se calcule suivant : $i = \frac{\Delta NP}{d}$

4. Vue d'ensemble du système à travers le prisme du modèle

Finalement, le modèle, initialement très simple, a été enrichi par étapes sur la base du traitement des données, des résultats de simulation de chaque version du modèle, des situations observées dans les enquêtes, des discussions avec des experts⁹¹. L'ajout de certains détails (comme la représentation de la *mouzaraâ* ou des forages) peut sembler superflu étant donné les objectifs du système, toutefois leur importance est difficile à jauger du fait de la complexité du modèle et permettent en tous cas de rendre le modèle plus crédible : « [...]it may sometimes be necessary to include things in a model that are not strictly required for the model validity, due to credibility concerns » (Law et Kelton, 1991). La figure 32 retrace l'enrichissement progressif du modèle (de manière non exhaustive) :

Nappe uniforme sans apports ; les exploitants construisent leur puits en imitant le voisinage, selon leur parcellaire; répercussion des prélèvements (forfaitaire par puits) sur la nappe, sans retour de l'abaissement sur les exploitants

introduction d'un **retour de l'abaissement sur les exploitants** : définition des liens entre revenu et parcellaire, entre prix d'accès et profondeur, entre famille et revenus agricoles et extra-agricoles, entre abaissement de la nappe et approfondissement des puits

introduction de l'**échange foncier**

introduction du "marché" foncier

possibilité de **regroupement des petites parcelles voisines**

possibilité de **construction en association, de mouzaraâ, de construction en fonction des parcelles en FVI**

partage de la nappe en **deux nappes indépendantes**

modélisation des **transferts entre les nappes**, des apports aux deux zones, de l'évolution de l'aval

représentation des **efficacités de distribution selon les types d'accès à l'eau**

possibilité de construire des **forages** sur les grandes parcelles, introduction de la **prise en compte d'un résultat espéré dans la stratégie d'irrigation de la parcelle**



version actuelle du modèle SINUSE

Fig 32 : Un modèle enrichi par étapes

Une étude de la sensibilité aux différents paramètres du modèle permettra de cibler les simplifications à opérer et les données à approfondir (cf. troisième partie), tandis que les comportements modélisés pourraient faire l'objet de discussions avec des experts locaux - en particulier avec les agriculteurs représentés dans SINUSE.

L'étude approfondie du système a permis dans un premier temps de supposer que l'abaissement de la nappe est principalement lié à la dynamique d'apparition des puits et aux prélèvements des puits et des PPI, ces processus dépendant d'une part des conditions intrinsèques des exploitations (parcellaires, économie, famille, localisation...) d'autre part des interactions de voisinage (imitation, faire-valoir indirect, associations...).

⁹¹ L'analyse des données et la construction du modèle ont bénéficié du suivi de Patrice Garin (agronome, chercheur au CEMAGREF), de François Bousquet (modélisateur, chercheur au CIRAD) et de Christian Leduc (hydrogéologue, chercheur à l'IRD).

Mais le jeu des interactions permet difficilement de prévoir la sensibilité du système à des perturbations, justifiant l'étape suivante de la modélisation.

Le modèle multi-agents a donc été construit à partir des entités et processus qui ont paru les plus importants, leur caractérisation et explicitation découlant parfois d'une démarche uniquement inductive, faute d'avoir pu à nouveau « interroger le terrain » suite aux questions soulevées par le modèle. Le caractère transparent de l'architecture et des processus décrits permet néanmoins d'apporter des révisions ultérieures aux processus modélisés.

La figure 33 schématise l'enchaînement des méthodes des différentes instances du modèle, au cours d'un pas de temps par un diagramme de séquence simplifié en langage UML (une version détaillée de cet algorithme peut être trouvée en annexe 3.a).

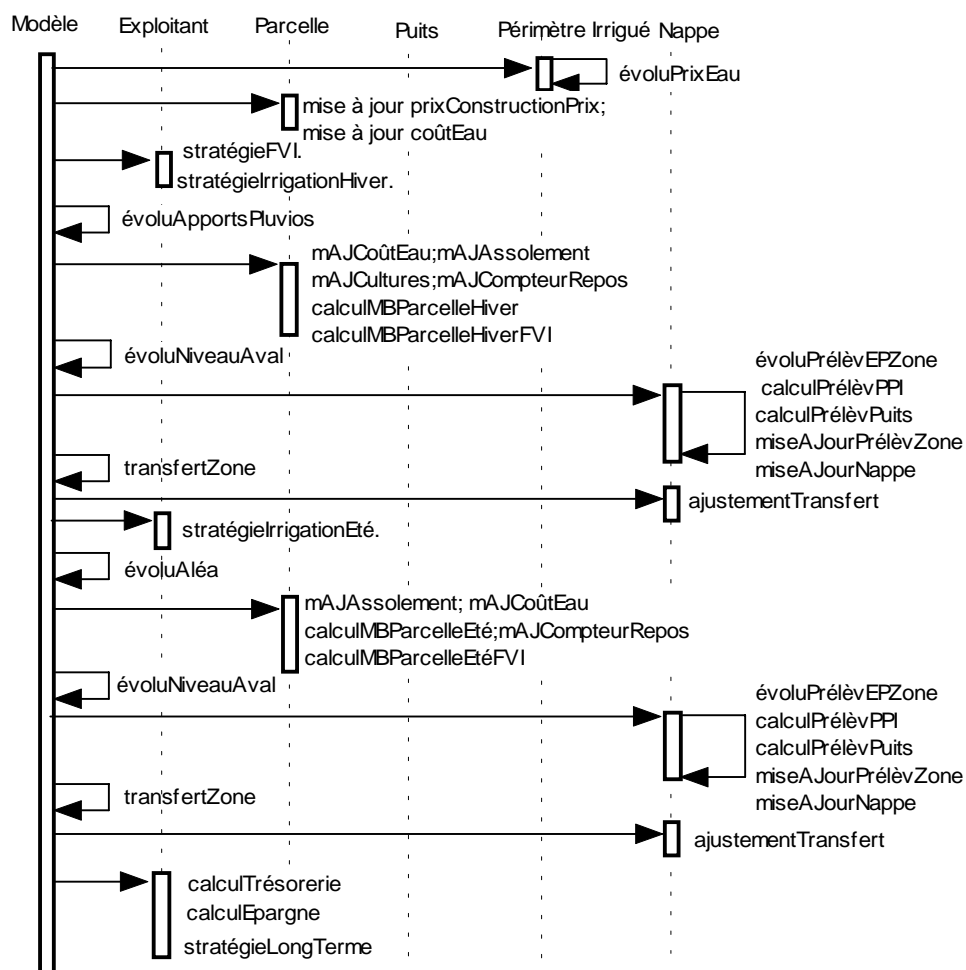


Fig. 33 : Diagramme de séquence simplifié du modèle SINUSE. Chaque classe est figurée par une ligne verticale en pointillés ; l'activation des objets de la classe est matérialisée par un rectangle sur sa ligne de vie. Les objets communiquent en échangeant des messages représentés au moyen de flèches horizontales, orientées de l'émetteur du message vers le destinataire. mAJ=mise à jour ; MB=marge brute ; EP=eau potable

Comme le montre ce diagramme, dans le modèle, le pas de temps annuel est découpé en deux saisons, au cours desquelles :

- les exploitants décident des échanges fonciers à effectuer pour l'année puis procèdent à des stratégies saisonnières (choix de l'assolement, de la surface à irriguer, diversification des revenus);
- l'ensemble de ces actions se répercute à la fin de chaque saison sur la demande en eau au niveau des points d'accès à la nappe, entraînant un prélèvement et l'abaissement subséquent de chaque zone de la nappe, ce qui donne lieu à des transferts entre zones, immédiatement répercutés sur le niveau piézométrique et sur la profondeur de la nappe ;
- l'abaissement se répercute à son tour sur le coût d'extraction de l'eau et de construction des puits ; de plus, au début de chaque saison agricole, si la profondeur de la nappe excède celle du puits, celui-ci est approfondi, si les conditions économiques et familiales de l'exploitant le permettent ;
- à la fin de l'année, l'exploitant établit le bilan de ses moyens et par rapport à ses objectifs, s'engage dans un investissement, attend un moment plus favorable, ou décapitalise son exploitation.

Le modèle comporte finalement plusieurs échelles de temps, gérées par une horloge exogène : celle des échanges fonciers, qui correspond à l'année, celle des stratégies d'assolement et d'irrigation, et de la réaction de la nappe, qui correspond à la saison, enfin celle des stratégies à long terme, également rythmée par les bilans annuels.

Les simplifications et suppositions mentionnées dans cette partie suffisent à dresser un premier bilan des limites du modèle :

- les processus humains ont été analysés de manière déterministe et les singularités des comportements, lorsqu'elles paraissaient d'intérêt mineur, ont été gommées au profit d'une représentation moyenne, tout en respectant la diversité des règles d'action. Cependant ces comportements correspondent à des observations de terrain, et se justifient par l'existence d'un contexte commun au système agraire. D'autre part, l'uniformité des objectifs et des possibilités d'action n'empêche pas une forte diversité du comportement des agents individuels, chacun étant caractérisé par une situation et un environnement local différent ;
- les fluctuations du marché ne sont pas représentées (ce qui revient à supposer que les prix ne sont pas modifiés par la dynamique interne du modèle, et que leur variation a un impact négligeable sur les choix cultureux et les résultats) et le choix des cultures s'effectue selon des règles homogènes sur la zone (poids des habitudes, inertie des choix) ;
- des processus importants sur le long terme, tels que l'évolution de la famille et l'héritage n'ont pas été pris en compte, malgré le fait que le morcellement des terres induit par l'héritage a un impact évident sur la dynamique d'apparition des puits, cependant les simulations ne sont censées porter que sur une génération d'agriculteurs ;
- certains paramètres spatiaux n'ont pas pu être pris en compte : l'exploitation agricole n'est pas située dans l'espace par rapport à ses parcelles, en outre le dessin des parcelles recréées sur la grille spatiale est parfois peu réaliste (trop découpé) et peut induire un grand nombre de voisins, les échanges fonciers ont été restreints au voisinage tertiaire ;
- Rouchier *et al.* (2001) soulignent l'importance de la familiarité et des réseaux de connaissance en contexte d'actions répétées (comme le sont dans SINUSE les échanges en FVI) ; les enquêtes menées ici n'ont peut-être pas suffisamment interrogé les agriculteurs sur l'existence de tels réseaux, leurs interactions paraissant plutôt découler de leur proximité spatiale.

Malgré ces interrogations, le modèle SINUSE demeure, à ce stade de l'étude, un effort d'explicitation des processus, support tangible des discussions à développer sur le comportement des usagers, entre les différents acteurs du système. Certes, d'autres études telles que celles de Harzli et Elloumi (1996), Aubry *et al.* (1988), Daoud (1996), en milieu

tunisien, font déjà cet effort d'analyse des comportements stratégiques et des transformations des exploitations en relation avec leur milieu. Mais au-delà d'une description figée des processus, la construction d'un modèle multi-agents suscite des questions sur les liens dynamiques susceptibles de faire émerger une situation globale à partir de la description des actions décentralisées des agents.

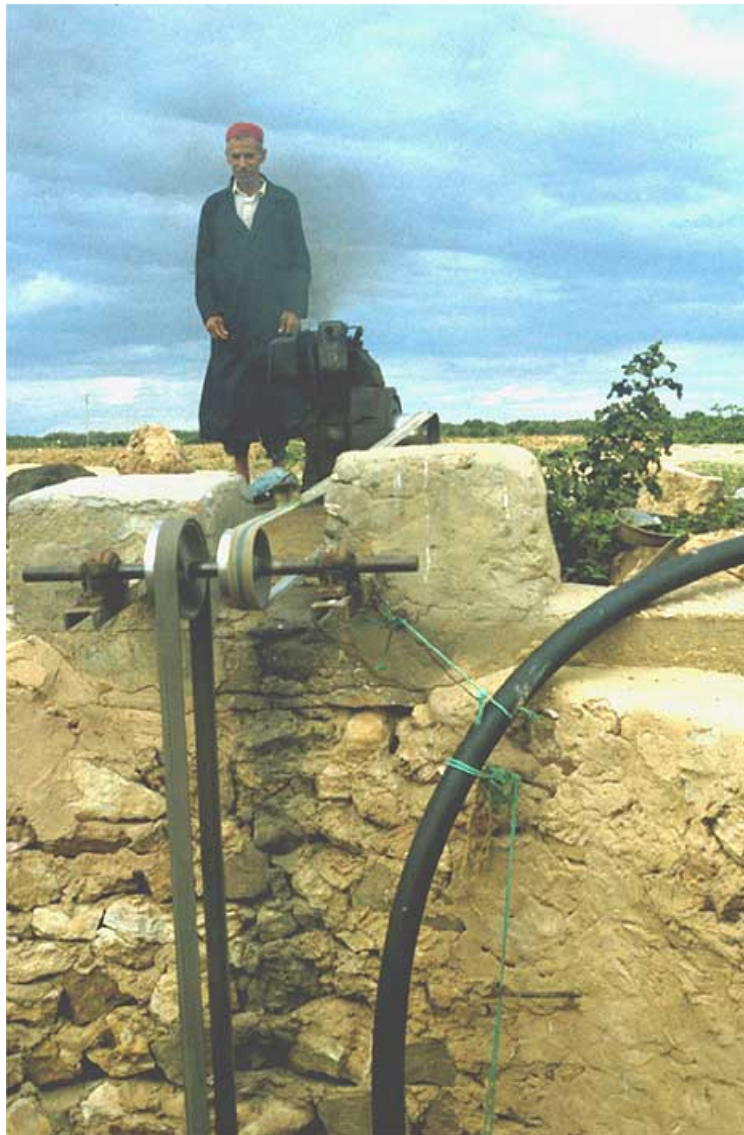
Parmi les stratégies de réaction à l'abaissement de la nappe évoquées lors des enquêtes et observées dans le travail de Ben Hamouda (1999) sur une zone voisine, certaines ont été intégrées dans le comportement actuel des exploitants *via* des paramètres techniques ou économiques (comme l'abandon d'un puits, sa « location », la culture de céréales en irrigation d'appoint). D'autres, très rarement observées ne l'ont pas été (comme l'adoption de la micro-irrigation⁹², la spécialisation en arboriculture fruitière, la réaction à un prix de l'eau spécifique aux céréales⁹³...). Pourtant parmi ces dernières stratégies, certaines sont en cours d'apparition dans la zone (c'est le cas de la micro-irrigation, suite à des subventions massives du Ministère de l'Agriculture) ; elles pourront donc être prises en compte dans la conception de scénarios de simulation alternatifs. C'est ce qui sera présenté dans la troisième partie, après une comparaison des sorties du modèle avec la dynamique globale du système, et une discussion sur la confiance qui peut être accordée au modèle.

⁹² aucun des agriculteurs interrogés par le sondage ne pratique la micro-irrigation ; la surface plantée irriguée par les puits construits avant 1990 ne diffère pas de la moyenne (30% de la parcelle) ; sur les 39 puits antérieurs à 1990, les $\frac{3}{4}$ irriguent des parcelles plantées à moins de 40% d'arbres, et le résultat est le même pour les puits construits après 1990.

⁹³ Un décret présidentiel en 1999 a entraîné la diminution par deux du prix de l'eau destiné à l'irrigation des céréales dans les PPI (règle suivie dans certains GIC).

TROISIÈME PARTIE

EXPLORATION DU SYSTÈME PAR LA SIMULATION



Photographie n°3: Un fellah près de son puits dans la plaine de Kairouan (Cliché. Feuillette, 2000).

La deuxième partie a permis de décrire et de justifier la structure et le fonctionnement du modèle SINUSE. Comme on l'a vu, la construction de ce modèle a d'abord impliqué une formalisation du système d'après les connaissances acquises.

Cette étape de la recherche permet déjà de distinguer des facteurs dont le rôle dans la dynamique du système semble important, et d'en imaginer l'évolution, avant même d'aborder la phase d'exploration par la simulation, et donc sans tenir compte des liens complexes entre variables. **C'est ce qui fait l'objet du premier chapitre, où une analyse "à froid" des facteurs clefs est comparée aux sorties de simulation du scénario de référence.** La capacité du modèle à rendre compte d'un phénomène global à partir de processus locaux est discutée à cette occasion.

Reproduction réduite et simplifiée du système étudié, le modèle SINUSE constitue un laboratoire artificiel pour l'exploration des interactions en jeu et l'expérimentation de nouvelles situations, difficiles à tester dans la réalité au risque de causer des effets négatifs sur le système. Mais avant de procéder à de simuler des interventions de gestion telles que celles décrites en première partie, se pose la question de la confiance qui peut être accordée aux sorties du modèle. **Dans le deuxième chapitre, on cherche à accréditer le modèle par des procédures de vérification et de validation adaptées à sa complexité ;** cette phase de la recherche permet également d'explorer le comportement d'ensemble du modèle dans sa configuration actuelle.

Le troisième chapitre, phase de simulation de scénarios d'intervention, donne lieu à des interprétations et permet en dernier lieu de discuter la portée du modèle et la démarche adoptée.

1. Evolution de quelques facteurs clefs : prévisions hors modèle et sorties de simulation

Avant d'aborder les simulations du modèle complexe, les connaissances acquises sur la structure du système, lors de la construction du modèle, permettent-elles déjà de prévoir l'évolution des principaux facteurs, c'est-à-dire des variables qui semblent *a priori* les plus influentes sur la dynamique du système ?

1.1. Les facteurs clefs du système et leur évolution probable

D'après les données de terrain, l'évolution du système semble en partie attribuable à la dynamique d'apparition des puits (cf. deuxième partie, § 2.7).

Elle devrait donc être influencée par tout ce qui affecte l'épargne des exploitants : la marge brute des cultures, les revenus extra-agricoles, les aléas sur l'épargne, les dépenses familiales... Ceci conduit à s'interroger sur l'impact de l'abaissement de la nappe sur les coûts supportés par les exploitants, *via* les coûts d'exhaure de l'eau et de construction des puits, et les conséquences possibles en terme de comportement. En effet, on a vu lors de l'explicitation des processus d'irrigation, en deuxième partie, que l'exploitant change radicalement de stratégie lorsqu'il est trop endetté ou lorsque les marges brutes qu'il espère tirer de son puits deviennent négatives. Une détérioration des marges brutes et un endettement des exploitants, dus à l'abaissement de la nappe pourraient donc entraîner une baisse de la demande en eau. De plus, des résultats économiques moins bons pourraient freiner le processus d'imitation. On peut imaginer dans cette situation que les agriculteurs suffisamment riches "profitent" de ces impacts économiques pour acheter des parcelles aux plus endettés.

Cependant, les données de terrain indiquent que jusqu'alors les irriguants ont été peu sensibles à l'abaissement de la nappe en termes de stratégies d'assolement et d'investissement. Ceci peut s'expliquer par l'impact de l'abaissement de la nappe sur le coût moyen de construction d'un puits et la marge brute moyenne des cultures modélisées, comme le montre la figure 34.

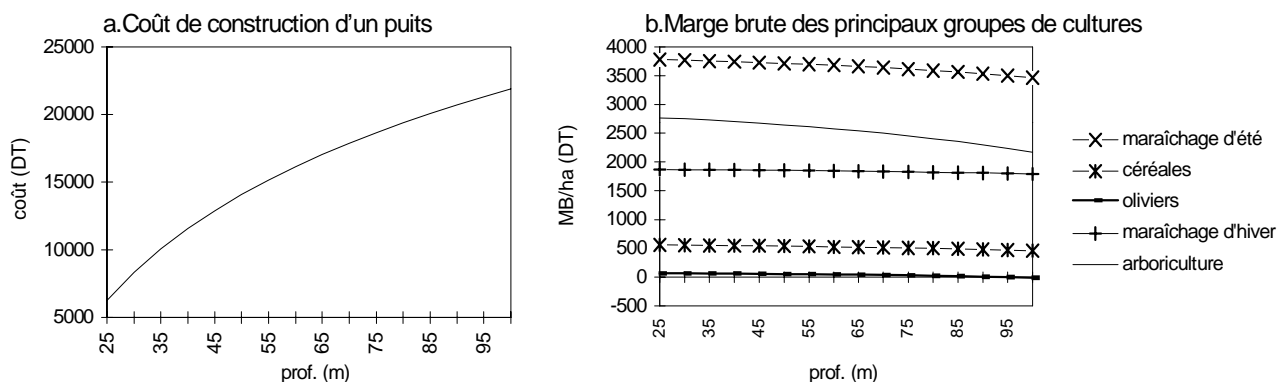


Fig. 34 : Variation du coût moyen de construction d'un puits et de la marge brute moyenne des principaux groupes de cultures, en fonction de la profondeur de la nappe. La marge brute moyenne correspond à une pluviométrie moyenne et l'absence d'aléas sur la production maraîchère. Source des fonctions coût-profondeur : données de terrain (cf. annexe 3.f) ; source des produits bruts et charges des cultures : normes régionales ajustées au terrain (cf. annexe 3.h).

Concernant l'impact de l'abaissement sur les coûts de construction (graphe a), un exploitant initialement situé sur une parcelle dont l'accès à la nappe se trouve à environ 40 mètres doit réaliser un investissement de 13 000 DT pour construire un puits. Au bout de 30 ans, si la nappe suit linéairement la tendance actuelle, elle se trouve à 60 m de profondeur, et l'exploitant doit déboursier 17 000 DT, soit 30% de plus qu'initialement. Un ralentissement de la dynamique de construction par rapport à une situation sans approfondissement est donc plausible, sans être certain. A l'inverse, les marges brutes moyennes des cultures (graphe b) sont peu affectées par l'abaissement de la nappe. Hormis pour l'olivier, elles demeurent largement positives, même pour une profondeur d'exhaure de 100 m. Ces considérations conduisent à penser que l'abaissement de la nappe a peu d'impact sur le revenu et par conséquent sur le comportement des exploitants, surtout du point de vue de l'utilisation des puits. Le système ne suit donc pas une dynamique d'autorégulation induite par l'abaissement de la nappe.

Cependant, il existe des limites techniques en terme de profondeur à la construction des puits d'une part, fixée à 70 mètres dans la version actuelle du modèle, et à leur approfondissement d'autre part, fixée à 90 mètres¹. Ces limites sont approximativement connues des agriculteurs, mais la profondeur de l'eau n'est pas perceptible, sauf à l'aide des expériences vécues dans le voisinage. Lorsqu'elles sont atteintes, un phénomène d'abandon des puits survient massivement, dont les conséquences sur le revenu des exploitants, sur le

¹ L'écart entre ces deux seuils techniques peut poser question. Il correspond aux dires des agriculteurs et entrepreneurs : il serait plus facile d'approfondir un puits à des profondeurs prohibitives que de construire un puits jusqu'à ces profondeurs, même si dans les deux cas il semble nécessaire d'avoir atteint le niveau piézométrique pour pouvoir effectuer un forage manuel (lors de l'approfondissement, un faux puits est creusé à l'intérieur du puits d'origine jusqu'à atteindre l'eau).

processus d'imitation, donc l'apparition des puits, et sur la dynamique de la nappe, sont sans mesure comparées à l'évolution des marges brutes des cultures et du coût de construction des puits.

De même, les aléas qui affectent les cultures maraîchères d'été et l'épargne, ont un impact vraisemblablement plus important sur les revenus et donc sur la dynamique, que celui de l'approfondissement.

Enfin, d'après la formalisation des processus, la combinaison du nombre d'actifs familiaux, des revenus extra-agricoles, du parcellaire et de l'accès à l'eau devrait avoir des conséquences importantes sur le revenu, susceptibles de conduire les exploitants vers des situations d'accumulation de l'épargne, ou au contraire de déficit.

Par ailleurs, comment sont amenés à évoluer les volumes prélevés et par conséquent la profondeur de la nappe ?

Les observations de terrain indiquent une augmentation accélérée du nombre de puits ces dernières années. La tendance exponentielle observée peut-elle se poursuivre, ou le nombre de puits est-il au contraire amené à se stabiliser ? Plusieurs phénomènes jouent sur l'apparition des puits, tels que la situation économique des exploitants, l'augmentation du coût de construction des puits, la saturation foncière, mais aussi le climat, les aléas sur les productions maraîchères, et sur le bétail, et les risques d'abandon des puits à la construction ou à l'approfondissement, liés à la structure lenticulaire de la nappe. La combinaison de ces facteurs permet difficilement d'établir des prévisions ; on peut néanmoins s'attendre à ce qu'elle provoque un ralentissement de la dynamique d'apparition des puits. Ce ralentissement surviendra-t-il rapidement ? Ou par paliers successifs ? Et, compte tenu des nombreuses combinaisons possibles, et des facteurs aléatoires en jeu, les simulations déboucheront-elles sur des tendances convergentes ?

Concernant l'évolution des prélèvements en PPI, on peut s'attendre à une légère baisse due à l'augmentation du prix de l'eau². Là encore, plusieurs facteurs influencent cette variable, comme les conditions économiques des exploitants, le climat, le nombre de parcelles en PPI occupées par des puits, l'augmentation du coût de construction des puits... Et, dans la réalité, la dégradation, ou au contraire la restauration des infrastructures, facteurs non pris en compte dans le modèle....

² Faute de données sur le seuil plafond de l'augmentation actuellement pratiquée sur le terrain, celui-ci est fixé dans le modèle SINUSE à $0,3 \text{ DT/m}^3$, et doit donc être atteint au bout de 12 ans environ.

A apports constants, l'évolution du niveau de la nappe est à la fois la conséquence du nombre de puits qui dépend des abandons, donc en partie de l'abaissement de la nappe, des prélèvements par puits, et, minoritairement, des prélèvements en PPI, ces derniers dépendant du nombre de puits, du climat, et des conditions économiques des exploitants.... Toutefois, on peut s'attendre, si la baisse de la nappe poursuit sa tendance linéaire, à ce que les premiers seuils techniques de construction des puits soient atteints au bout d'une vingtaine d'années, dans les zones amont³. Selon l'importance des abandons, il se peut alors que les prélèvements sur la nappe diminuent, et que l'abaissement ralentisse...

Les conclusions de cet effort de projection dans le futur des tendances actuelles, qui, hormis quelques tendances simplement prévisibles, se heurtent rapidement à l'amplification des phénomènes, à leur complexité et à leur caractère aléatoire, conduisent à l'exploration du système par la simulation.

1.2. Evolution des principaux facteurs d'après la simulation

Chaque scénario a été simulé 20 fois de suite, afin de tenir compte de la variabilité des dynamiques, dans l'interprétation des résultats. En effet, plusieurs procédures ont recours à des tirages aléatoires induisant une variabilité au cours du déroulement d'une simulation mais aussi à l'initialisation du modèle (tab. 10).

Tab. 10 : Procédures aléatoires du modèle

Utilisées à l'initialisation	Appelées en cours de simulation
Distribution des parcelles	Aléa sur la valorisation de l'épargne
Distribution des exploitations	Aléa sur le produit brut du maraîchage
Distribution des puits initiaux	Diversification temporaire des revenus
Distribution des caractéristiques familiales	Construction de puits (choix de la parcelle)
Distribution des revenus extérieurs	Marché foncier (choix de la parcelle et du partenaire)
Distribution de l'épargne de départ	Associations (choix de la parcelle et du partenaire)
	Abandon puits (construction et approfondissement)
	Aversion au risque

D'autres paramètres évoluent selon des lois bien précises : par exemple, le climat suit une série de 20 années climatiques enregistrées, le prix de l'eau en PPI évolue de 15% par an (conformément au taux d'augmentation actuel, cf. deuxième partie)...

³ Dans la réalité, la zone de profondeur la plus forte (en amont) s'abaissant un peu moins vite que la zone aval (environ 0,3 m/an actuellement, contre près d'1 m en zone aval), et les profondeurs maximales étant de 60 m au départ (ce qui correspond à peu près à la situation actuelle du système), le premier seuil critique est atteint dans la zone amont au bout d'une trentaine d'années (si la courbe d'abaissement demeure linéaire), gagnant par la suite les zones aval.

D'autres encore demeurent fixes pendant la simulation, comme le marché, l'efficacité des PPI, le prix des intrants, du moins dans la configuration actuelle du modèle.

Il est possible à l'utilisateur du modèle de "photographier" un état initial à partir duquel plusieurs simulations peuvent être lancées successivement. D'autre part, un objet spatial configuré à l'initialisation peut être sauvé sous forme d'une carte, appelée lors des initialisations suivantes. Ainsi, dans ce travail, toutes les simulations ont été effectuées à partir du même parcellaire, de la même carte des PPI et de la même configuration spatiale de la nappe. D'autre part, même lorsque les simulations proviennent d'un même état initial, les tirages aléatoires effectués durant leur déroulement sont chaque fois différents.

Les simulations sont lancées sur 30 pas de temps : on suppose que les sorties ne peuvent être analysées au-delà d'une génération d'exploitants, estimée à une trentaine d'années au maximum, des bouleversements techniques, comportementaux, économiques ou politiques ayant toute chance de survenir, et le système devenant sensible au-delà de cette période à certains processus non pris en compte, comme le morcellement des parcelles par héritage.

La figure 35 donne l'évolution de plusieurs indicateurs sur un jeu de 20 simulations répétées à partir d'un même état initial, c'est-à-dire à partir d'une même configuration initiale des exploitations et d'une distribution initiale des puits identique.

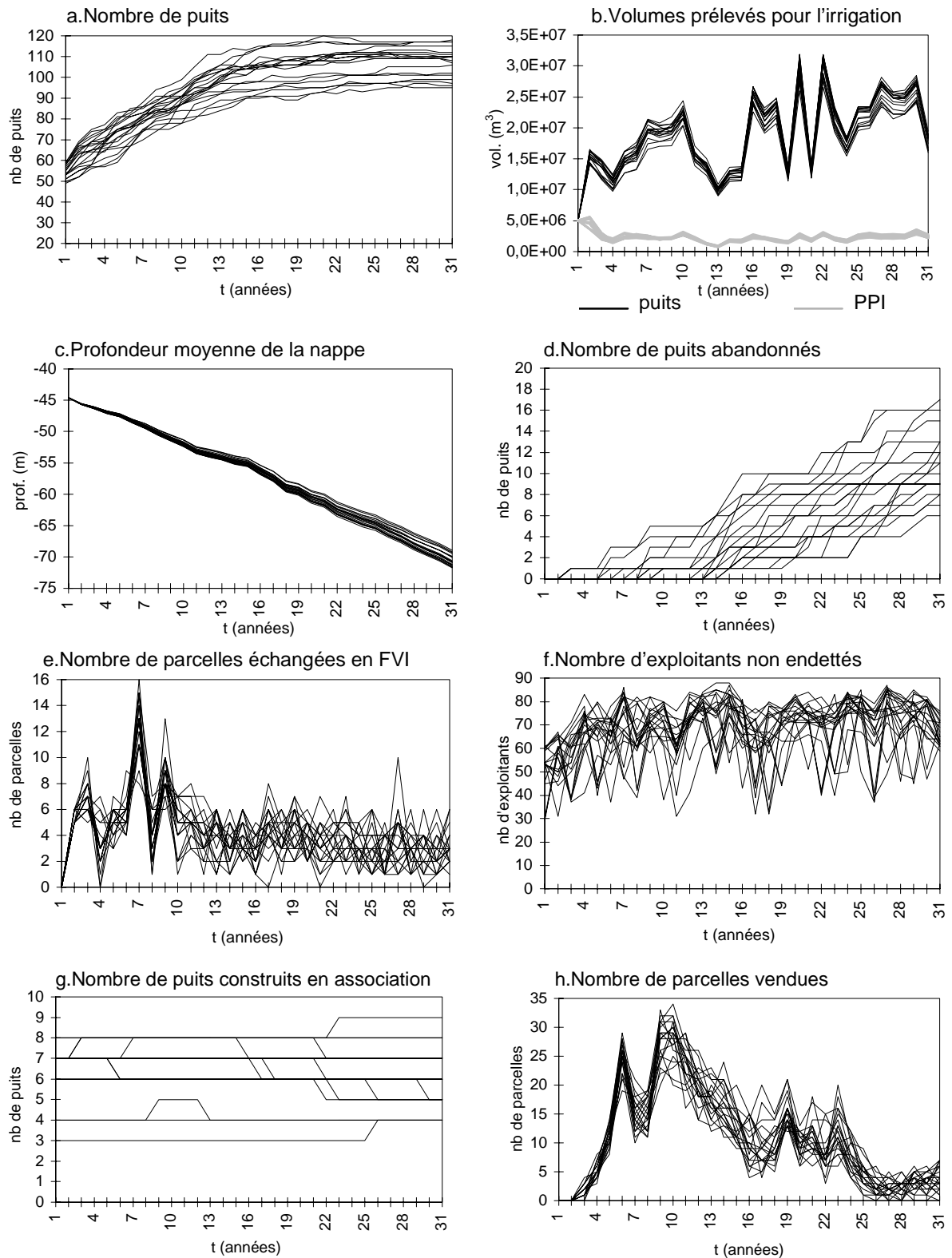


Fig. 35 : Evolution et variabilité de quelques indicateurs du modèle SINUSE. Exemple de 20 simulations répétées à partir d'un même état initial. Les courbes d'épaisseurs différentes en (g) résultent de la superposition de plusieurs courbes. FVI=faire-valoir indirect.

Examinons de plus près l'évolution de ces indicateurs.

- a) le nombre de puits augmente de manière presque linéaire jusqu'à un palier, comme l'analyse *ante* simulation l'avait laissé prévoir. La variabilité de cette évolution est peu importante compte tenu de la variabilité stochastique des processus. Ce palier est-il plutôt dû à l'augmentation du coût de construction, aux limites socio-économiques ou parcellaires des exploitants, ou encore à l'abandon des premiers puits ? Voyons si les indicateurs suivants apportent des éléments de réponse à cette interrogation ;
- b) le volume prélevé par les PPI est très faible comparé à celui que prélèvent les puits⁴. Globalement, le volume prélevé pour l'irrigation varie d'année en année, à peu près selon les mêmes tendances pour les puits et les PPI, avec un "creux" exceptionnel la 13^{ème} année, qui correspond à une année exceptionnellement pluvieuse. La baisse rapide du volume moyen prélevé par les PPI n'est pas seulement expliqué par le climat. En effet, au bout de la 6^{ème} année, la marge brute espérée de l'olivier en irrigué devient négative, du fait de l'augmentation du prix de l'eau, ce qui, dans le modèle, conduit les exploitants à arrêter l'irrigation des plantations d'olivier. Or, l'olivier représentant environ 30% de la surface du PPI, ce changement a un impact non négligeable sur le volume prélevé. Notons que l'hypothèse d'un arrêt de l'irrigation de l'olivier est discutable : la compensation permise par les cultures intercalaires, la nécessité de pérenniser la plantation, peut-être aussi une certaine valeur symbolique des arbres peuvent au contraire pousser l'agriculteur à maintenir l'irrigation malgré le déficit apparent causé... Quoi qu'il en soit elle n'est pas centrale, étant donnée la faiblesse des prélèvements en PPI, par rapport aux puits. Remarquons enfin que le volume prélevé par les puits est un indicateur redondant par rapport au nombre de puits ;
- c) la nappe s'abaisse de manière presque linéaire à raison de 0,7 m/an en moyenne, malgré la stabilisation du nombre de puits, ce qui signifie que les zones les plus profondes ont atteint le seuil technique de construction. On doit donc s'attendre à une augmentation marquée du nombre de puits abandonnés ;
- d) le nombre de puits abandonnés est très variable d'une simulation à l'autre mais va toujours en augmentant, surtout entre le 10^{ème} et le 20^{ème} pas de temps, ce qui est dû, comme on l'a envisagé auparavant, au fait que le premier seuil de profondeur au-delà duquel la construction est techniquement difficile dans le contexte actuel,

⁴ Le rôle des PPI, même s'il est mineur en terme de volume global, a une importance non négligeable dans la dynamique du système, les trajectoires individuelles des exploitants ayant des parcelles en PPI (30% de la totalité des exploitants) étant fortement influencée par la présence de ces parcelles, surtout en l'absence de puits.

est atteint dans les zones les plus profondes de la nappe. Le nombre de puits se stabilisant dans cette période également, il est légitime de s'interroger sur le lien entre la stabilisation du nombre de puits et seuil de construction (lequel est d'ailleurs susceptible d'évoluer avec les progrès techniques). Cependant, le nombre de puits abandonnés très faible dans certains cas, attribuable au fait que le nombre de puits "pionniers" construits dans les zones amont les plus profondes est petit, ne suffit pas à expliquer le palier systématiquement atteint en (a) ;

e) le nombre de parcelles échangées en FVI est également variable et oscille entre 2 et 8 en moyenne (sur 770 parcelles au total), du fait de la fluctuation de la trésorerie des donneurs et preneurs potentiels, comme le confirme le graphique f. Les 2 pics observés entre le 5^{ème} et le 10^{ème} pas de temps précèdent ceux de l'indicateur (h), signalant des exploitants en situation économique défavorable qui tentent de se rattraper en donnant leurs parcelles en FVI, puis se voient contraints à la vente de leur terre. Une analyse de l'évolution de la variances entre simulations montre que celle-ci est constante.

f) le nombre d'exploitants non endettés (dont la trésorerie et l'épargne sont positives) oscille irrégulièrement autour d'une cinquantaine (sur 336 exploitants), entre les mêmes bornes du début à la fin de la simulation (fig. 36).

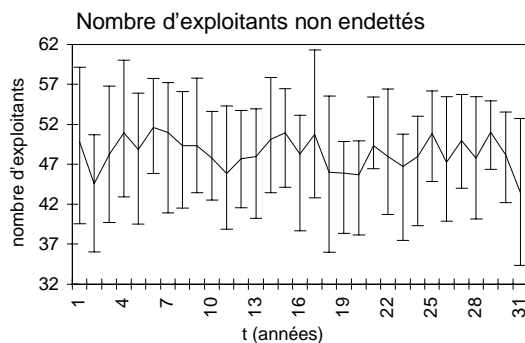


Fig. 36 : Moyenne et écarts-type du nombre d'exploitants non endettés. Ces chiffres proviennent de 20 simulations répétées à partir du même état initial.

La relative stabilité de la moyenne laisse supposer que l'impact de l'abaissement de la nappe sur les exploitants est faible, autrement dit que l'augmentation du coût de l'eau mais également celle du nombre de puits abandonnés se répercutent peu sur le niveau d'endettement de la population agricole. Quant aux oscillations, sont-elles attribuables aux variations climatiques ? Aux aléas ? Ces questions seront abordées par la suite.

g) le nombre de puits construits en association représente en moyenne 10% des puits. Cet indicateur est un révélateur des interactions locales, comme le marché foncier et le nombre de parcelles échangées en FVI. Les associations potentiellement réalisables entre voisins (identiques d'une simulation à l'autre, puisque l'état initial, donc le parcellaire, l'épargne et la situation des exploitants les uns par rapport aux autres, est identique) varient beaucoup d'une simulation à l'autre malgré le fait que l'état initial, donc la configuration spatiale et économique des exploitations, est la même, selon la trajectoire suivie par chacun, et le caractère aléatoire de certains

choix. Ces associations quand elles sont possibles sont vite réalisées ou ne le sont pas, comme l'indiquent la hausse rapide puis la stabilisation du nombre de puits en association ;

- h) le nombre de parcelles vendues par année augmente rapidement puis diminue : la plupart des ventes foncières ont lieu dans les 10 premiers pas de temps. Aucun impact de la baisse de la nappe n'étant réellement ressenti à ce moment-là (peu de puits sont abandonnés, les marges brutes des différentes cultures sont à peine touchées par l'abaissement de la nappe), l'ampleur de ce marché foncier est à attribuer aux conditions de départ des exploitants. Selon le rapport famille/surface, les revenus extérieurs, l'accès à l'eau, le parcellaire, les exploitants partent d'entrée de jeu sur une dynamique d'accumulation, ou au contraire d'endettement puis de décapitalisation. Les 2 pics successifs enregistrés par cet indicateur s'expliquent par le fait qu'une première vague de ventes a lieu, provoqué par l'endettement important d'un certain nombre d'exploitants, qui attendent ensuite un seuil d'endettement plancher avant de vendre leur dernière parcelle.

Les exercices de projection analytique et de simulations laissent donc supposer que la nappe va continuer de s'abaisser au même rythme dans les prochaines décennies, même avec les premières vagues d'abandon de puits dues à une profondeur excédant en certains endroits le seuil technique de construction des puits (un progrès technique abaissant ce seuil technique pourrait exacerber cette tendance). L'impact de cet abaissement sur le revenu et sur le taux d'endettement de la population semble mineur. Ces tendances, si elles s'avèrent plausibles, confirment la nécessité d'une intervention sur le système afin d'éviter une dégradation irréversible de la ressource. Elles conduisent également à conclure que **les interactions locales modélisées dans SINUSE permettent bien, comme on le recherchait, d'observer les propriétés globales du système réel.**

Enfin, cette expérience indique que le nombre de répétitions adopté est acceptable, compte tenu de la variabilité des indicateurs observés et du test statistique auquel seront soumises les sorties de simulation par la suite. Les expériences suivantes confirmeront cette position.

Mais avant d'aller plus loin dans l'usage exploratoire du modèle et de conclure sur son pouvoir explicatif, de quels moyens dispose-t-on pour accroître la confiance de l'utilisateur dans le modèle SINUSE, autrement dit, comment "accréditer" le modèle, et celui-ci répond-il bien à cet examen ?

2. Quelle confiance accorder au modèle SINUSE ?

2.1. De la validation des modèles complexes

Classiquement, la modélisation comporte toujours une étape de « vérification et validation » portant sur le modèle conceptuel comme sur le modèle de simulation, par laquelle le modélisateur démontre que dans son domaine d'application, le modèle fournit des résultats avec une précision suffisante par rapport aux intentions d'utilisation. Les procédures classiques de validation sont résumées dans l'encadré qui suit.

La phase de "validation et vérification" d'un modèle comporte classiquement les procédures suivantes (Rykiel, 1996 ; Lewis, 1993) :

- **la vérification du modèle conceptuel et du modèle de simulation**, qui consiste à démontrer que le formalisme du modèle est correct, et qui peut comporter distinctement le "débuggage mécanique" (veiller à ce que le modèle "tourne") et le "débuggage logique" (veiller à ce qu'il "tourne" correctement), plus subtil à mettre en œuvre ;
- **le calibrage ou calage**, par lequel on estime et on ajuste les paramètres et constantes du modèle (surtout lorsqu'il s'agit d'un modèle, ou de procédures de type « boîte noire ») pour améliorer l'accord entre les sorties du modèle et les données de terrain ;
- **la validation** qui peut comporter plusieurs tests comme détaillé ci-après ;
- **l'accréditation** par laquelle on montre que la validité du modèle est suffisante pour justifier son utilisation pour la recherche et pour la décision ;
- **la qualification** qui vise à définir le domaine d'utilisation du modèle.

Concernant la validation proprement dite, plusieurs procédures peuvent être combinées (Rykiel, *op. cit.* ; Law et Kelton, 1991 ; Hill, 1993), dont :

- le **test de validité apparente** par lequel des experts jugent si le modèle et son comportement ont l'air raisonnable (compte tenu de son objectif) ;
- le **test de visualisation ou de confrontation** par lequel modèle et terrain sont comparés sur la base de graphiques, de chroniques temporelles, et d'états de l'espace ;
- la **comparaison avec des modèles connus** (et validés) ;
- la **validation interne**, tests de sensibilité qui permettent d'étudier la variabilité des dynamiques issues du modèle et l'influence des différents paramètres ;
- la **validation sur la base d'événements spécifiques**, qui étudie la capacité du modèle à reproduire des relations entre variables et comportement dynamique sur des chroniques connues ;
- la **validation en conditions extrêmes** qui vérifie si le comportement du modèle est raisonnable en dehors des conditions normales ;
- le **traçage** qui consiste à suivre l'évolution de variables spécifiques ou d'entités pendant une exécution pour déterminer si la logique modèle est correcte et sa précision suffisante ;
- les **tests de sensibilité** permettant de retrouver des relations entre variables qui ont lieu dans la réalité et de déterminer les paramètres les plus influents, qui doivent être connus avec plus de précision ; classiquement ils sont effectués en faisant varier les paramètres un par un puis en combinant la variation des paramètres pour étudier l'effet de leurs interactions.

Par rapport à ces procédures, Rykiel (*op. cit.*) ou encore Lewis (*op. cit.*), insistent sur le fait qu'il n'existe pas une voie unique de validation, ni de validation totalement objective : le choix de tests qualitatifs ou au contraire de tests quantitatifs très précis dépend du type de simulation, du domaine d'application et des objectifs du modèle.

Dans le cas des modèles orientés-objets, les réflexions sur la validation en sont à leur début. Barreteau et Bousquet (1999) évoquent l'usage de langages de programmation spécifiques ou de réseaux de Petri pour faciliter la recherche d'incohérences, c'est-à-dire la vérification du modèle, au sens où on l'a définie.

Mais la question de la validation du modèle se pose de manière épineuse lorsque des comportements humains sont simulés. En effet, leur complexité et leur variabilité permet difficilement de comparer les actions simulées aux actions réelles. Tout au plus peut-on se contenter de discuter la formalisation des comportements avec les acteurs concernés. Pour faciliter cette démarche et "ouvrir la boîte noire" du modèle aux acteurs, Barreteau *et al.* (2000) proposent de coupler les SMA aux jeux de rôles, en faisant jouer aux acteurs une version simplifiée et réduite du modèle. En effet, les jeux de rôles permettraient d'une part d'explicitier de manière dynamique les hypothèses de fonctionnement retenues dans le modèle, d'autre part de pouvoir comparer les dynamiques d'évolution jouées et simulées. Cette méthode intéressante n'a pas pu être mise en œuvre dans ce travail, faute d'un retour sur le terrain. Cette question de la "validation sociale" sera rediscutée dans le troisième chapitre de cette partie.

Par ailleurs, lorsque ces modèles comportent un grand nombre de paramètres et d'interactions - ce qui est le cas de SINUSE, il est impossible de mener une analyse de sensibilité classique. Le recours à la définition de plans d'expériences permet de guider l'exploration du modèle par la simulation, d'orienter le questionnement du modèle, et ainsi de conduire une validation partielle et raisonnée.

Plusieurs démarches d'analyse de sensibilité partielle sont possibles dans le cas d'un modèle complexe comportant de nombreux paramètres, par exemple :

- Bart (1995) qui travaille sur des modèles individu-centrés, préconise de **n'étudier que les facteurs les plus importants, en n'en faisant varier qu'un à la fois** ;
- Law et Kelton (*op. cit.*) proposent d'étudier **les effets principaux et les effets croisés⁵ de facteurs agrégés**, constitués par le regroupement de plusieurs paramètres de même type, et de rechercher les paramètres importants par une démarche récursive, lorsque le modèle s'avère sensible à un facteur ;
- Pour analyser la sensibilité du modèle multi-agents SHADOC à ses nombreux paramètres, pour la plupart indépendants, Barreteau (1998) a choisi **de constituer cent scénarios au hasard en piochant dans l'espace des paramètres, et de les simuler 20 fois chacun afin de tenir compte de la variabilité des dynamiques issues du modèle.**

Pour conclure, la complexité du modèle SINUSE ne permettant pas de procéder aux méthodes classiques de vérification et de validation, et l'organisation du travail n'ayant pas permis de procéder à une "validation sociale", la démarche adoptée s'est inspirée des tests classiques et des exemples de procédures suivies pour la validation des modèles complexes, rencontrés dans la littérature.

2.2. Démarche retenue pour l'accréditation de SINUSE

L'objectif de ce modèle étant de pouvoir comparer des tendances d'évolution données par plusieurs scénarios, et non de fournir des chiffres précis dans l'absolu, il n'est pas nécessaire de procéder à une validation statistique poussée, et il n'est de toutes façons pas possible, comme on l'a déjà évoqué, de mener une analyse de sensibilité classique du fait du grand nombre de paramètres (une cinquantaine, cf. annexe 3.d, sans remettre en cause l'architecture du modèle, c'est-à-dire sa séquence de déroulement et la distribution de ses objets spatiaux).

On a vu auparavant que la dynamique globale qui émerge des interactions locales est réaliste. Nous cherchons maintenant à accréditer le modèle, c'est-à-dire à montrer qu'il représente fidèlement la réalité, qu'il tourne correctement, et à rechercher les paramètres

⁵ Tester l'effet principal d'un facteur ou d'un paramètre revient ici à fixer le facteur ou le paramètre en question à sa valeur haute ou basse, tout en laissant les autres paramètres à leur valeur normale. L'analyse des effets croisés revient à tester les interactions entre facteurs ou paramètres, en les étudiant toutes les combinaisons possibles des valeurs hautes et basses de ces facteurs ou paramètres.

auxquels il est le plus sensible, dans une perspective d'approfondissement de leur étude et de contrôle du système.

La validation conceptuelle du modèle a été menée au fur et à mesure de sa construction, et exposée en deuxième partie : la représentation du système, sa structure, sa logique, ses relations causales sont raisonnables, et les simplifications opérées ou les suppositions faites sur les mécanismes peu connus sont justifiées. Les paramètres non connus impliqués dans des procédures simples donnant lieu à des résultats intermédiaires faciles à interpréter, ont pu être ajustés par des simulations répétées en conditions moyennes (du point de vue du climat et du prix de l'eau). C'est le cas des paramètres rassemblés dans le tableau 11, calés en fonction d'observations de terrain :

Tab. 11 : Les paramètres ajustés à l'aide d'observations de terrain

Paramètres ajustés	Observations de terrain utilisées pour le calage
Probabilité d'échec de construction des puits	Nombre de puits abandonnés à la construction
Probabilité d'échec d'approfondissement des puits	Nombre de puits abandonnés à l'approfondissement
Aversion au risque des agriculteurs	Rythme d'apparition des puits pionniers
Stratégie d'irrigation en PPI	Nombre de parcelles non irriguées selon les saisons en PPI
Taux d'irrigation en PPI	Surfaces irriguées en PPI
Distance servant au calcul du gradient piézométrique entre les zones	Gradient piézométrique entre les zones pour des différences piézométriques similaires

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

- **en confrontant les indicateurs de la dynamique d'évolution aux tendances récentes d'évolution du système réel** pour vérifier que globalement le modèle d'action « tourne » bien ;
- **en répétant les simulations** de chaque scénario à partir de conditions initiales différentes et à partir des mêmes conditions initiales pour étudier **la variabilité des dynamiques issues du modèle** et repérer des combinaisons de paramètres et de processus susceptibles de provoquer une trajectoire originale du système ;
- **en procédant au traçage** de simulations (interruptions au début et à la fin de toutes les étapes importantes d'un pas de temps, et au sein même de certaines procédures) et de certaines trajectoires individuelles (durant un pas de temps et sur plusieurs pas de temps) pour **vérifier la cohérence du déroulement** ;
- **en parant la quasi-totalité des procédures du modèle de tests d'alerte en cas d'incohérence**, susceptibles d'arrêter une simulation en cours (les situations incohérentes, par exemple un volume prélevé négatif, étant repérées au fur et à

mesure de la construction et des simulations), **aide efficace au « débogage logique »** ;

- **en procédant à une analyse de sensibilité partielle du modèle pour repérer les variables importantes** et susceptibles d'être utilisées pour le contrôle du système.

Cette analyse de sensibilité est partielle dans le sens où seuls les effets principaux des paramètres clefs du modèle sont étudiés, et seulement sur une de leurs valeurs extrêmes. Ces paramètres, dotés de valeurs basses (-) et hautes (+) (ainsi que le préconisent Law et Kelton, 1991), bornes de leur plage de variation, sont répertoriés selon leur type par le tableau suivant ; certains, d'influence similaire, ont été regroupés en facteurs afin de réduire le nombre d'expériences à effectuer. Les paramètres choisis pour l'analyse de sensibilité sont répertoriés dans le tableau 12.

Tab. 12 : Paramètres choisis pour l'analyse de sensibilité partielle

facteurs	paramètre	valeur (-)	valeur (+)	valeur actuelle
<i>économiques</i>	Dépenses courantes	1/10 de la trésorerie	50% de la trésorerie	1/3 de la trésorerie
	emprunt long terme pour la construction du puits	30% de la valeur	50% de la valeur	entre 0 et 40%
	emprunt de campagne	-10000 en hiver et -10000 en été	0	-10000 en hiver et -5000 en été
	probabilité d'aversion au risque pour la construction de puits en zone pionnière	50%	95%	90%
	aléa sur la valorisation de l'épargne	0,5 en moyenne	1 en moyenne	[0,1-1] loi discrète
<i>sociaux</i>	seuil de réussite pour l'imitation	3000	0	1000
	processus d'imitation	aucune imitation	imitations	imitations
	échanges en FVI	aucun échange en FVI	FVI	FVI
	marché foncier	aucun marché foncier	marché foncier	marché foncier
	association entre voisins pour la construction d'un puits	aucune association	associations	associations
<i>techniques</i>	efficience de la distribution de l'eau à partir d'un puits	0,6	0,8	0,7
	profondeur limite de creusage	50	70	70
	capacité d'irrigation des puits (en surface)	4 ha	7 ha	6
<i>liés au milieu</i>	aléa sur le revenu du maraîchage d'été	0,5 en moyenne	1 en moyenne	[0,1-1] loi discrète
	transmissivité T_1 et T_2 des zones 1 et 2	5.10^{-3}	15.10^{-3}	$T_1=0,01$ $T_2=0,005$
	porosité s_1 et s_2 des zones 1 et 2	8%	20%	$s_1=15\%$ $s_2=10\%$
	apports des zones 1 et 2 (m^3)	zone 1 : 5.10^6 zone 2 : $0,5.10^6$	zone 1 : 7.10^6 zone 2 : 1.10^6	zone 1 : 5.10^6 zone 2 : $0,5.10^6$
	climat (explicité lors des tests de sensibilité)	constamment sec	constamment humide	moyen ou variable

La plupart de ces paramètres sont indépendants sauf :

- la capacité du puits, qui est en partie liée à l'efficacité de la distribution⁶ ;
- les apports de la nappe sont liés au climat. Cependant cette relation est mal connue : les apports sont liés en partie à la pluviométrie sur le bassin du Merguellil, tandis que le climat représenté dans le modèle est celui de la plaine de Kairouan, la transformation des pluies en débit au niveau des apports de surface est mal connue, enfin, le débit du sous-écoulement qui alimente la nappe par le seuil d'El Haouareb dépend en partie de la charge du barrage, elle-même dépendante de plusieurs facteurs, dont le débit d'entrée dans le barrage, l'évaporation... Il a donc paru plus simple dans un premier temps de représenter ces apports par une moyenne globale, indépendante du climat.

De plus, certains paramètres, comme les aléas sur la production maraîchère et sur l'épargne, l'efficacité de l'irrigation, la capacité du puits, les emprunts de campagne... devraient en toute rigueur varier, au moins dans une certaine mesure, au sein de la population. Dans l'ignorance de leur loi de distribution, une même valeur a été affectée à toutes entités concernées et l'analyse de sensibilité partielle menée ici porte sur la valeur de ces moyennes, non sur la distribution de ces paramètres au sein de la population, dont l'effet pourrait être étudié par la suite⁷.

Enfin, les paramètres sociaux permettront de tester l'hypothèse centrale de ce travail, qui porte sur le rôle important des interactions locales dans la dynamique globale du système.

⁶ En réalité, le débit délivré dépend de la profondeur, des caractéristiques techniques de la pompe, de son âge... La capacité du puits, exprimée ici en surface irrigable dépend de ces facteurs ainsi que de l'efficacité de distribution et des cultures irriguées. Dans le modèle la capacité des puits correspond à une surface observée en moyenne.

⁷ De la même manière, les apports à la nappe devraient varier d'une année à l'autre (faiblement tant qu'aucun lâcher n'est effectué) en accord avec la pluviométrie. Aucune donnée n'étant à disposition sur cette corrélation apports/pluviométrie (Y. Nazoumou, comm.pers.), les apports modélisés sont stables dans le temps, ce qui induit un biais marginal étant donné l'importance des prélèvements par rapport aux apports

2.3. Définition d'un plan d'expériences et choix des indicateurs de suivi

Une simulation de 30 pas de temps dure entre 5 et 10 minutes sur une station SUN UltraSparc 5 de 128 M de Ram, selon le type de scénario choisi (l'ensemble des 20 répétitions d'un même scénario dure 1 heure et 40 minutes au minimum).

Compte tenu de la contrainte de temps, le plan d'expériences a comporté les quatre phases suivantes, d'objectifs et de déroulements différents :

- **dans un premier temps, un ensemble de simulations effectuées sur le modèle SINUSE de référence permet d'appréhender son fonctionnement, sa cohérence par rapport aux données de terrain, la variabilité de ses dynamiques** et pose déjà quelques questions sur la prolongation des tendances actuelles (ce type de simulations a fait l'objet du § 1.2) ; les expériences suivantes seront comparées à ce scénario de référence ;
- **la deuxième phase constitue un ensemble de tests de vérification** : tout d'abord le scénario de référence est simulé sur 80 pas de temps, afin de vérifier que les sorties sont cohérentes sur le long terme, et d'explorer ces tendances, en dehors de tout rapprochement avec le système réel. Puis des scénarios basés sur l'introduction de perturbations importantes dans le système sont simulés et comparés aux sorties du modèle de référence, afin de vérifier que le modèle réagit correctement ;
- **la troisième phase du plan d'expérience concerne l'analyse de sensibilité partielle** : chacun des facteurs ou paramètres sélectionnés est testé sur sa valeur (+) ou (-) en conservant les autres paramètres à leur valeur moyenne, chaque expérience étant répétée 20 fois afin de pouvoir interpréter les écarts de sortie observés malgré la variabilité stochastique ; en cas de sensibilité significative à un facteur (ou à un regroupement de facteurs), chacun des paramètres du facteur est testé. Les tests croisés des différents paramètres choisis n'ont pas été effectués dans un premier temps, l'objectif de cette expérience étant de repérer une par une les variables à approfondir (et d'éventuelles variables de contrôle), plutôt que de démontrer que le modèle réagit peu aux variations des différents paramètres.
- enfin, **la quatrième phase de ce plan d'expérience correspond à la simulation de plusieurs scénarios d'intervention.**

Reste à choisir selon quels indicateurs les résultats de ces expériences peuvent être comparés. Les premières expériences de simulation ont été suivies à l'aide de nombreux

indicateurs. D'autres indicateurs encore auraient sûrement permis d'enrichir l'exploration du modèle et l'interprétation des simulations. Par la suite, pour des raisons de temps et de lourdeur des fichiers de sortie, les simulations ne sont plus suivies que sur un nombre restreint d'indicateurs, révélateurs de la dynamique et complémentaires sur les questions étudiées. **La profondeur de la nappe**, critère de durabilité environnementale, a bien entendu été retenue. Un indicateur socio-économique, critère complémentaire de durabilité du système, devait permettre d'estimer l'acceptabilité des mesures simulées. **Le nombre d'exploitants non endettés** a été sélectionné, du fait de son caractère plus flou que, par exemple, le niveau de revenu ou l'épargne, de son caractère symbolique et de son utilisation en tant que seuil dans les processus stratégiques des exploitants. Enfin, le choix d'un indicateur intermédiaire, explicatif par rapport à la dynamique, devait permettre d'enrichir l'interprétation des expériences. **Le nombre de puits**, qui révèle directement l'impact des scénarios simulés sur la stratégie d'investissement et semble pour une grande part responsable de la dynamique du système, a donc été retenu.

Le suivi de ces indicateurs ne peut être mené que de manière comparative entre simulations différentes et entre valeurs prises au cours d'une même simulation. Il est par ailleurs intéressant de les comparer aux résultats de la simulation qui sont attendus *a priori*. Ces 3 indicateurs ne donnent qu'une vision très partielle de la dynamique des simulations ; des indicateurs intermédiaires, moins intéressants par rapport au problème étudié, ont permis de vérifier leur cohérence et de comparer le comportement du système avec les observations de terrain (par exemple le nombre de puits abandonnés, le nombre de parcelles irriguées en PPI, le nombre de parcelles échangées en FVI, le nombre de parcelles vendues, les prélèvements totaux des PPI...); l'idéal eût été d'en suivre le maximum pour chaque scénario testé, ce qui n'a pas pu être le cas pour des raisons évidentes de temps. Ils seront présentés selon leur intérêt dans l'expérience.

L'évolution des indicateurs au cours du temps de la simulation constitue une source d'information beaucoup plus riche que leur valeur finale ou intermédiaire. De plus, on a vu auparavant que ces indicateurs sont étudiés en terme de comparaison, et qu'il faut en outre tenir compte de la variabilité stochastique de chaque scénario. Pour ces différentes raisons, l'interprétation des résultats de simulation sera basée sur des graphes figurant à la fois l'évolution des indicateurs sur les 30 pas de temps, les 20 répétitions effectuées, et le scénario de référence sur laquelle porte la comparaison. Le recours à un test de comparaison non paramétrique (afin de pouvoir comparer des échantillons de distribution non normale) permet de statuer sur la différence des deux scénarios, quand l'analyse

graphique laisse place au doute. Le test bilatéral de Wilcoxon-Mann Whitney⁸ est effectué sur les deux échantillons, constitués chacun par 20 simulations répétées du même scénario, sur une tranche de temps donnée, au 30^{ème} pas de temps en général. L'hypothèse principale H_0 de ce test correspond à la similitude des deux échantillons, l'hypothèse alternative H_1 , proposant au contraire leur distinction. La règle de décision correspond au seuil classique de 5% : Si H_1 est acceptée avec un risque d'erreur de 5% au plus, le test est considéré comme significatif⁹.

2.4. Cohérence du modèle et comparaison des sorties de simulation avec le terrain

Cette phase du plan d'expérience permet de discuter de la variabilité des dynamiques issues du modèle, de vérifier qu'il "tourne" correctement et que les écarts entre variables de sortie et observations de terrain sont acceptables par rapport aux objectifs du modèle. Ces expériences constituent également une première phase d'exploration du comportement d'ensemble du modèle.

2.4.1. La variabilité des dynamiques issues du modèle SINUSE

Cette variabilité provient de l'initialisation d'une part et des procédures de simulation d'autre part.

Par la suite, les scénarios testés sont comparés à un scénario de référence correspondant au prolongement des tendances actuelles répété à partir d'états initiaux différents, ou du même état que celui du scénario expérimenté. Il a semblé plus cohérent par exemple de tester les scénarios d'intervention sur un même état initial que le scénario de référence, le système réel correspondant lui-même à une configuration fixée des exploitations ; à l'inverse d'autres tests ont été menés à partir d'états initiaux différents, afin de tenir compte des variations induites par la procédure d'initialisation.

⁸ "Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney cherche à vérifier si les éléments de deux groupes, classés par ordre croissant sur une même échelle ordinale, occupent des positions (rangs) équivalentes, révélant ainsi la similitude des deux distributions." (Scherrer, 1984). Les tests de Wilcoxon et de Mann-Whitney sont identiques pour un nombre d'échantillons égal à 2. Le test bilatéral a été préféré au test unilatéral, car il teste l'hypothèse selon laquelle les 2 échantillons sont différents, sans *a priori* sur leur ordre.

⁹ Ce seuil de 5%, classiquement adopté en statistiques, est discutable. En effet, la modélisation permet justement de s'intéresser à des situations hautement improbables, surtout lorsqu'elles sont à éviter.

Analysons déjà la variabilité procédurale qui ressort des sorties de simulation présentées au §1.2 (répétitions à partir d'un même état initial) avant d'aborder sa comparaison avec la variabilité due à la fois aux procédures et à l'initialisation (répétitions à partir d'états initiaux différents).

Malgré le fait que plusieurs phénomènes peuvent donner lieu à amplification, comme la construction de puits suite à la "colonisation" d'une nouvelle zone par des puits "pionniers", ou l'abandon des puits, qui décourage les processus d'imitation dans son voisinage ou au pire entraîne l'abandon d'autres puits par cascade, les courbes des indicateurs ont des allures similaires d'une simulation à l'autre : la variabilité stochastique induite par les phénomènes aléatoires est acceptable. Certains indicateurs sont plus touchés que d'autres par la variabilité : c'est le cas par exemple du nombre de puits, des échanges fonciers, des associations et des abandons, qui comportent des facteurs aléatoires dans leurs procédures. A l'inverse, la profondeur de la nappe, bien qu'elle soit liée aux indicateurs qui viennent d'être cités, connaît une variabilité réduite : de quelques mètres seulement au bout de 30 pas de temps, par rapport à une baisse généralisée de plusieurs dizaines de mètres. D'autre part, la variabilité de certains indicateurs croît avec le temps, du fait de processus cumulatifs (c'est le cas du nombre de puits, du nombre de puits abandonnés, de la profondeur de la nappe), tandis que d'autres indicateurs ont une variance similaire d'un pas de temps à l'autre, correspondant à des résultats indépendants dans le temps.

La figure 37, qui compare la variabilité stochastique due aux seules procédures à la variabilité stochastique cumulée des procédures et de l'initialisation sur la base de deux jeux de simulations, montre clairement les tendances cumulatives ou au contraire indépendantes des variances.

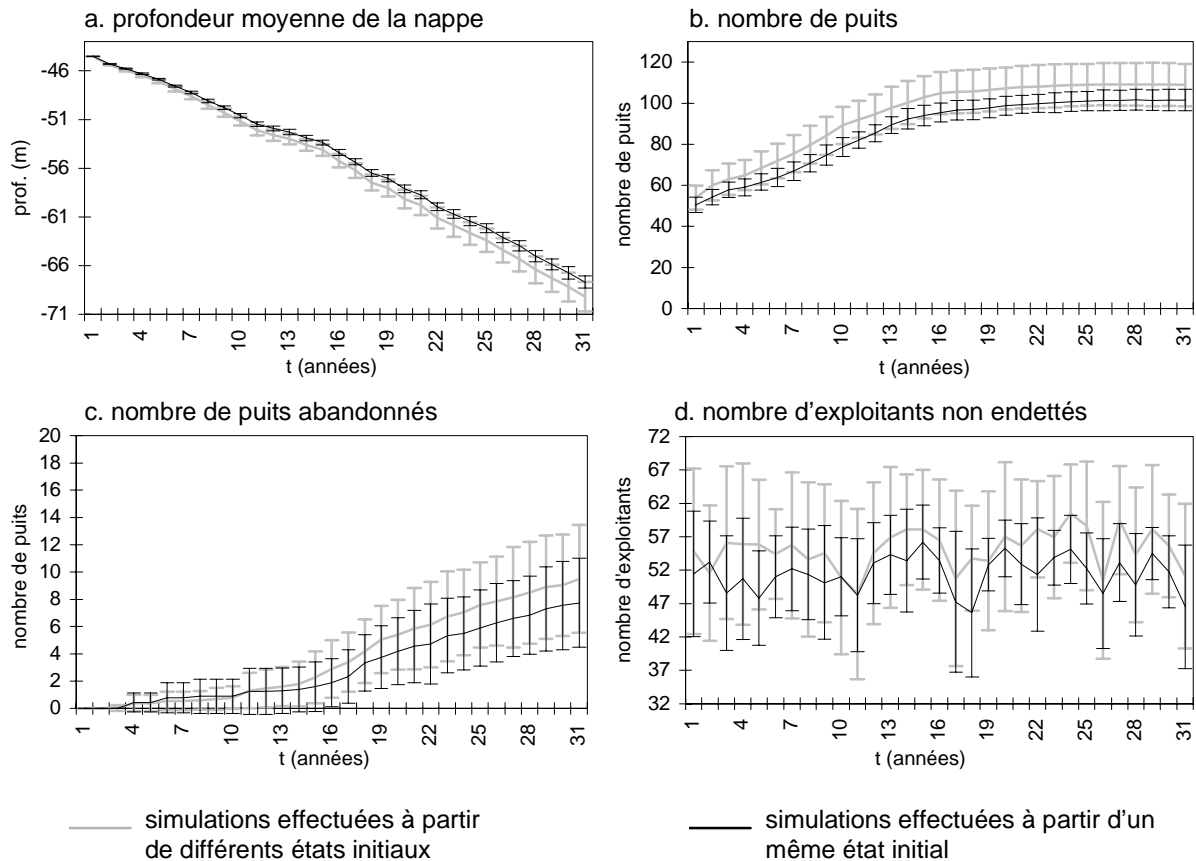


Fig. 37 : Comparaison des tendances d'évolution, à partir d'un même état initial et à partir de différents états initiaux. Moyennes et écarts types pour chaque pas de temps calculés à partir des 20 simulations répétées.

Comme on pouvait s'y attendre, tout en étant acceptable par rapport aux tendances d'évolution, la variabilité est plus forte lorsque les états initiaux sont différents : en effet, la configuration des exploitations (en termes de famille, de revenus, de parcellaire, d'accès à l'eau), différente pour chaque simulation, se répercute sur toutes les interactions de voisinage (échanges fonciers, imitation...). Ceci conduit à conclure que pour une population de mêmes caractéristiques globales, la distribution locale des paramètres n'est pas sans influence sur la dynamique du système, confirmant l'hypothèse initiale d'importance des interactions locales. A titre d'exemple, un puits entouré d'exploitants sans moyens (économiques, parcellaires, familiaux...) ne donne pas lieu à l'apparition d'autres puits par imitation. Cependant, même si la distribution initiale des paramètres a un effet non négligeable sur l'évolution du système, l'allure des courbes figurées demeure la même quelle que soit la configuration initiale, ce qui permet d'apporter crédit à l'interprétation d'un jeu de simulations à partir d'une configuration donnée.

Le décalage observé entre les écarts-type des simulations effectuées à partir d'un même état initial et ceux des simulations effectuées à partir d'états initiaux différents est acceptable sur le plan statistique.

Ces comparaisons conduisent à opter préférentiellement, dans les plans d'expérience qui suivront, pour des simulations effectuées à partir d'un même état initial (à comparer avec un scénario issu du même état initial), afin de mieux distinguer la variabilité due à l'expérience de celle inhérente au modèle.

La mise à l'épreuve du modèle se poursuit maintenant par l'étude de ses tendances à long terme, au-delà du domaine temporel d'application initialement fixé, soit 30 pas de temps.

2.4.2. Quel comportement du modèle à plus long terme ?

Malgré le fait que les résultats ne sont pas exploitables au-delà d'une trentaine de pas de temps, une simulation sur 80 pas de temps du scénario de référence permet de vérifier si le fonctionnement du modèle sur le long terme reste cohérent, ou si des phénomènes inattendus apparaissent. Il s'agit à la fois d'un mode d'exploration du système et de vérification du modèle. Ces simulations sont répétées à partir du même état initial, et suivie par six indicateurs.

Compte tenu de l'exercice de projection analytique évoqués au § 1.1, on peut s'attendre à long terme à une augmentation importante du nombre de puits abandonnés du fait de la profondeur de la nappe, qui dépasse les seuils techniques de construction et d'approfondissement dans les zones aval puis amont, et en conséquence à un ralentissement de l'abaissement de la nappe. Les vagues successives d'abandon de puits peuvent également laisser prévoir une détérioration des conditions économiques des exploitants. Quant aux prélèvements : le nombre de puits diminuant, il est probable que le volume total prélevé par les puits diminuera aussi, tandis qu'en PPI, les conditions de distribution (prix de l'eau, efficience) demeurant constantes dans le modèle au-delà de 10 pas de temps pour le prix de l'eau, il est probable qu'ils continueront de varier de la même manière.

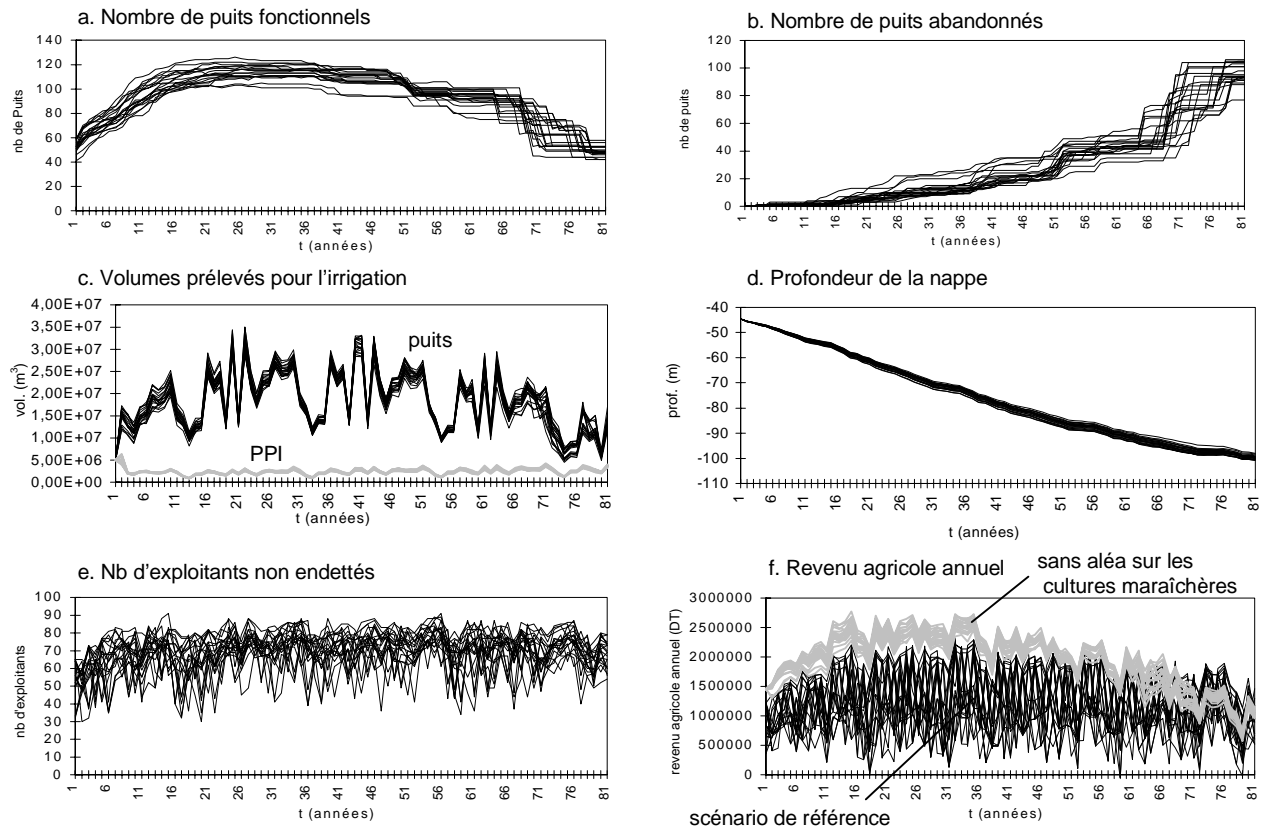


Fig. 38 : Poursuite des tendances à long terme. 20 simulations ont été répétées à partir d'un même état initial.

Si les graphes de la figure 38 vérifient la plupart des prévisions, ils apportent également des résultats surprenants.

Le nombre de puits (graphe a) commence à baisser aux environs du 30^{ème} pas de temps, puis connaît à nouveau une chute vers le 65^{ème} pas de temps, ce qui correspond aux deux phases d'augmentation des puits abandonnés (graphe b), les zones de profondeur différentes atteignant les seuils techniques de construction et d'approfondissement à des moments différents. On remarque qu'au bout de 80 pas de temps il subsiste néanmoins une cinquantaine de puits fonctionnels dans les zones les moins profondes.

Le caractère périodique des oscillations des prélèvements (sur 20 ans) permet de confirmer l'hypothèse posée au §1.2. : c'est bien le climat qui est principalement à l'origine de ces fluctuations, étant lui-même représenté dans le modèle par une série climatique de 20 ans (cf. annexe 3.h), 4 fois renouvelée pour couvrir les 80 pas de temps. Le volume prélevé par les puits diminue globalement, comme prévu, aux alentours du 60^{ème} pas de temps. Par ailleurs on observe une légère tendance à l'augmentation des prélèvements en PPI durant les dernières décennies, ce qui s'expliquerait par le fait que, dépourvus de puits, les exploitants se consacrent davantage à l'irrigation en PPI. Cependant, cette augmentation est loin de compenser la baisse du volume prélevé par les puits.

Au-delà du 60^{ème} pas de temps, on peut observer une stabilisation de l'abaissement de la nappe : le graphe d prend une courbure logarithmique, expliquée par la baisse des prélèvements par les puits. En effet, la même expérience, menée en modifiant les seuils techniques de construction des puits et d'approfondissement afin de limiter l'abandon des points d'eau, donne un abaissement continûment linéaire. **Malgré la baisse des prélèvements, ceux-ci demeurent beaucoup plus importants que les apports - 22 Mm³/an, en comprenant les prélèvements de la SONEDE, contre 5 Mm³/an d'apports en moyenne, dans le modèle, ce qui explique que la nappe ne se recharge pas.** Le "suivi individuel" des courbes montre deux grands types de tendances pour une même allure générale : soit le nombre de puits augmente rapidement pour chuter rapidement après une petite phase de stabilisation, soit il connaît une progression plus lente et reste stable pendant une longue période, avant de diminuer. La première configuration décrite correspond également aux baisses les plus fortes de la nappe observées en (graphe d). Quant aux légères « cassures » de la courbe d'abaissement de la nappe qui se produisent invariablement à la 13^{ème}, à la 33^{ème}, à la 53^{ème} et à la 73^{ème} année, elles correspondent à des années très humides survenant tous les 20 ans, du fait de la périodicité du climat en entrée, au cours desquelles les prélèvements pour l'irrigation sont très réduits.

La dynamique d'échange des parcelles en FVI, non figurée ici, demeure assez constante malgré les abandons de puits, ce qui signifie qu'elle augmente pour le peu de puits subsistant, ou pour les parcelles en PPI (les exploitants qui ont abandonné leurs puits concentrant leurs efforts sur l'irrigation en FVI, grâce à une épargne favorable, cumulée tant que le puits fonctionnait).

Étonnamment, le nombre d'exploitants non endettés (e) demeure très stable, malgré des oscillations irrégulières. La moyenne et l'écart type entre simulations conservent les mêmes valeurs durant la simulation. L'abaissement de la nappe, l'abandon d'une partie des puits, n'auraient-ils aucun effet sur le revenu des exploitants ? Non, puisque malgré des oscillations irrégulières, le suivi de la moyenne et de l'écart type du revenu agricole (f), montre bien une augmentation, suivie d'une stabilisation puis d'un déclin. Le même indicateur, suivi en supprimant l'aléa sur les cultures maraîchères, permet de confirmer ces tendances. De plus, cette comparaison permet d'attribuer le caractère irrégulier des oscillations et l'ampleur de l'écart-type à l'aléa sur les cultures maraîchères. Le taux d'endettement n'est donc pas synonyme d'une stabilité de l'état financier de la population. Il s'agit d'un indicateur flou (adopté précisément pour cette raison). Cependant, sa stabilité malgré l'abandon des puits paraît tout de même anormale, et pourrait être due à une accumulation excessive de l'épargne par les exploitants propriétaires de puits.

Les études de la variabilité et des tendances à long terme confèrent une certaine robustesse au modèle, malgré les limites évoquées pour l'indicateur *e*. En outre, le premier chapitre a permis de constater que les sorties des simulations correspondent globalement à ce qu'on peut attendre du modèle, et aux tendances d'évolution du système réel, ce qui constitue en soit une étape de la vérification. Approfondissons maintenant ce travail de vérification, en référence à des indicateurs plus précis.

2.4.3. Comparaison de quelques indicateurs avec les observations de terrain

On cherche ici à vérifier que les écarts entre les sorties du modèle et les observations de terrain sont acceptables par rapport aux objectifs d'utilisation du modèle.

2.4.3.1. L'évolution du nombre de puits suit une dynamique réaliste.

Dans le modèle, les puits apparaissent à un rythme moyen de 4 par an les deux premières années¹⁰ (proches des conditions actuelles de terrain) ce qui, compte tenu de l'échelle de réduction du modèle ressemble à la réalité de terrain, les enquêtes conduisant à supposer que ces dernières années ont vu apparaître une cinquantaine de puits par an en moyenne.

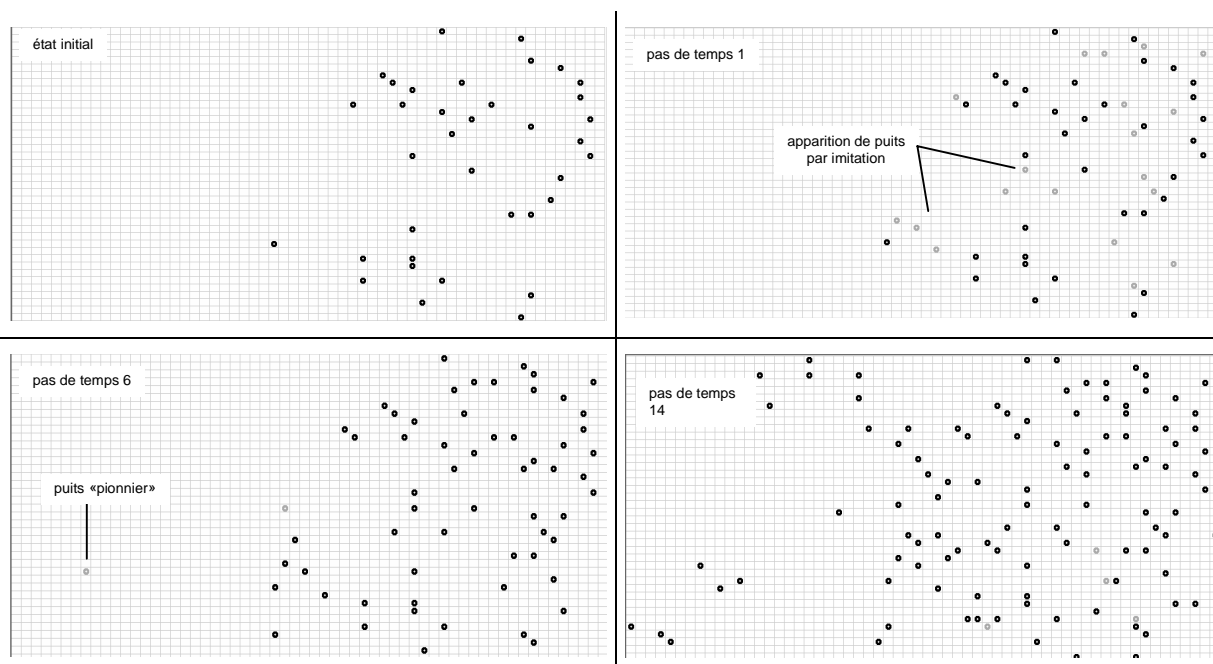


Fig. 39 : Visualisation de la dynamique d'apparition des puits sur l'interface spatiale de CORMAS. Les puits anciens figurent en noir, les nouveaux en grisé ; le fond de carte est neutre (la visualisation des objets spatialisés peut être consultée en annexe 3.c). Les images figurent 4 pas de temps non consécutifs.

¹⁰ Moyenne effectuée sur 20 répétitions à partir de conditions initiales différentes ; la moyenne est de 4,5 puits par an sur un jeu de simulations effectué à partir de différents états initiaux.

La construction des objets puits procède surtout par imitation et donne donc lieu à une densification des zones déjà occupées, plutôt qu'à une extension des zones occupées : le premier puits "pionnier" n'apparaît qu'au bout du 6^{ème} pas de temps (très vite imité dans son voisinage). Le rythme d'apparition des puits ralentit au fur et à mesure du temps du fait de contraintes parcellaires, économiques, en partie liées à la profondeur de la nappe.

Cette dynamique spatiale d'apparition des puits correspond à l'évolution observée sur la zone d'étude (densification des zones déjà colonisées, création de nouvelles zones autour de noyaux pionniers), ce qui est rassurant, les stratégies d'investissement modélisées reposant surtout sur un processus d'imitation du voisinage.

2.4.3.2. Le rythme d'abaissement de la nappe est proche des mesures piézométriques.

Dans le modèle, la nappe s'abaisse de 0,7 mètre par an en moyenne (0,4 à 0,9 mètre par an les cinq premières années), sur la base de 20 simulations à partir d'états initiaux différents ; or dans la réalité, la moyenne donnée par les mesures piézométriques disponibles est de 0,6 mètre d'abaissement par an pour les 3 dernières années.

2.4.3.3. La proportion des parcelles échangées en FVI est réaliste.

Dans le modèle, le nombre de parcelles échangées en FVI varie entre 1 et 2% du nombre de parcelles totales, alors que dans la réalité, 3% des parcelles sont données en FVI (8% sont prises en FVI, mais les terres sans propriétaires ne sont pas représentées, réservoirs de don en FVI sans doute à l'origine des 5% excessifs dans le bilan des échanges en FVI). Cet écart est acceptable.

2.4.3.4. L'évolution du volume prélevé par l'ensemble des PPI est retrouvée dans le système étudié.

Les données du terrain sur les volumes prélevés en PPI sont comparées aux sorties du modèle sur la période 1990-1996, la plus proche de l'état initial du scénario de référence. Sur le plan climatique, ces années correspondent aux pas de temps 13 à 19. La comparaison porte donc sur ces deux tranches temporelles. Par ailleurs, afin que les situations modélisées et réelles soient comparables, le nombre de puits et le prix de l'eau en PPI sont fixés dans le scénario simulé.

Les données disponibles sur les prélèvements annuels des PPI de la zone d'étude montrent d'une part que pour chaque PPI ceux-ci varient annuellement de manière similaire avec les variations du climat (ce qui correspond aux hypothèses posées au § 2.4.2) et d'autre part que la totalité des prélèvements dans la zone a oscillé entre 4 et plus de 6 millions entre

1990 et 1996, ce qui correspond approximativement aux valeurs données par les simulations lors des années climatiques correspondantes.

2.4.3.5. Les volumes prélevés par les puits sont proches de la réalité

Dans le modèle, les prélèvements par les puits donnés par le modèle varient entre 15 000 et 40 000 m³ par an, pour une moyenne d'environ 25 000 m³, ce qui correspond aux ordres de grandeur donnés par la reconstitution des volumes prélevés par puits sur la base des enquêtes.

Les études déjà présentées sur la variabilité, les tendances à long terme et la comparaison aux données de terrain, permettent déjà d'affirmer que le modèle SINUSE est cohérent. Les écarts des indicateurs observés avec la réalité paraissent acceptables. L'étape ultérieure de la vérification consiste à soumettre le modèle à des conditions extrêmes, afin de vérifier qu'il réagit correctement.

2.4.4. Réaction du modèle à plusieurs situations extrêmes

La simulation de fortes perturbations doit logiquement induire des répercussions prévisibles sur le système : la comparaison des répercussions observées avec les répercussions prévues constitue un test de cohérence du modèle. Ces perturbations permettent également d'enrichir l'interprétation de l'évolution de certains indicateurs. Les scénarios testés ci-après sont comparés à un scénario de référence dont la simulation est répétée 20 fois à partir de différents états initiaux.

2.4.4.1. Des revenus exceptionnellement forts

A l'initialisation du modèle, chaque exploitant est doté dans ce scénario d'une épargne de départ de 20 000 DT, et d'un revenu extra-agricole de 20 000 DT/an qui alimentera son budget tout le long de la simulation, alors que dans le scénario de référence, seulement 30% des agents ont des revenus extérieurs, compris entre 350 et 6000 DT/an par actif salarié, et que leur épargne de départ variant entre -5000 et 7000 DT suivant leurs conditions. Dans le contexte d'une agriculture familiale attachée à la terre ayant comme objectif principal la sécurisation et l'augmentation du revenu par l'accès à une irrigation privée, l'impact prévisible d'une introduction massive de capitaux est une forte augmentation du nombre de puits et par conséquent une baisse accrue de la nappe. Voyons si le modèle réagit comme tel.

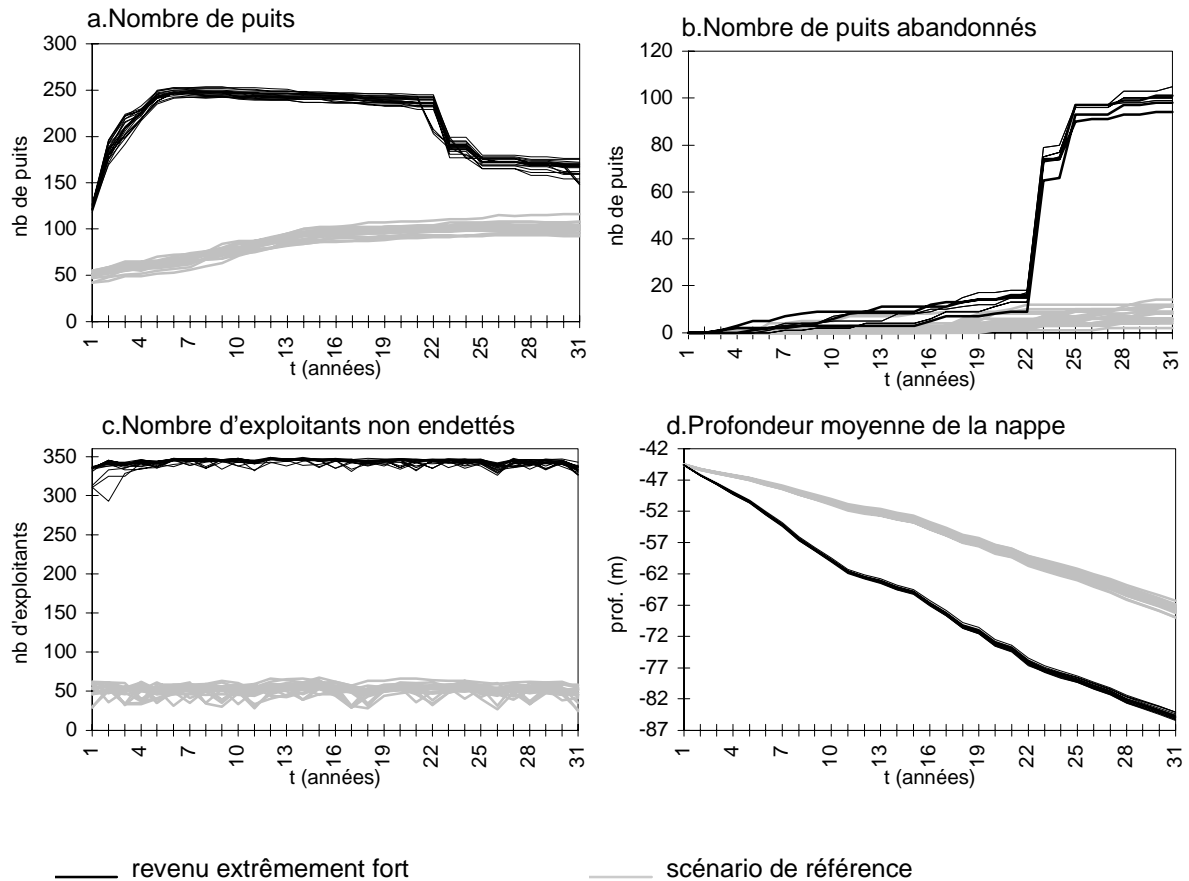


Fig. 40 : Test de cohérence du modèle en situation de revenus extrêmement forts

Le résultat de la perturbation introduite (cf. fig. 40) correspond non seulement aux prévisions logiques mais apporte des informations supplémentaires, à savoir :

- la situation économique des exploitants constitue une limite importante à la dynamique d'apparition des puits, ce qui répond en partie aux questions posées au § 1.2 sur l'origine du seuil d'augmentation des puits : celui-ci serait principalement dû aux limites économiques des exploitants, le "seuil" observé ici (a), étant attribuable à une saturation foncière ;
- l'accélération de l'approfondissement (d) due au grand nombre de puits entraîne de nombreux abandons correspondant aux seuils techniques, aux alentours du 20^{ème} pas de temps. Avant cette date, le nombre de puits abandonnés est supérieur au scénario de référence, du fait d'une probabilité d'échec accrue par le grand nombre de puits construits ;
- les prélèvements en PPI (non figurés ici), sont tout d'abord accrus par rapport au scénario de référence, ce qui est logique, les stratégies d'irrigation en PPI reposant en partie sur la situation économique des exploitants. Cependant, elles deviennent

rapidement inférieures à la tendance normale, ce qui s'explique par le fait que les agriculteurs ont tendance à délaissier leur accès au PPI au profit de leurs puits, quand ils en possèdent.

2.4.4.2. Une aversion au risque nulle

Au moment où ils prennent leurs décisions d'investissement, les exploitants passent en revue différentes possibilités dans un ordre donné de préférence. L'une d'elles consiste à construire un puits "pionnier" dans une région dépourvue de puits, ce qui comporte un certain risque. Hormis le fait qu'il leur faut posséder à la fois l'épargne et le parcellaire nécessaire à cette décision, tous ne sont pas prêts, *a priori*, à prendre ce risque. C'est au moment de ce choix qu'est introduite une probabilité d'aversion au risque, estimée dans la configuration actuelle du modèle à 90% de la population (confrontée au choix). La situation improbable d'une aversion au risque nulle est ici testée. Il faut donc s'attendre en toute logique à un accroissement du nombre de puits et par conséquent de la baisse de la nappe. Ceci confirmerait l'hypothèse posée au § 1.2, sur le fait que la variabilité du nombre de puits d'une simulation à l'autre est en partie liée à l'apparition aléatoire des puits pionniers.

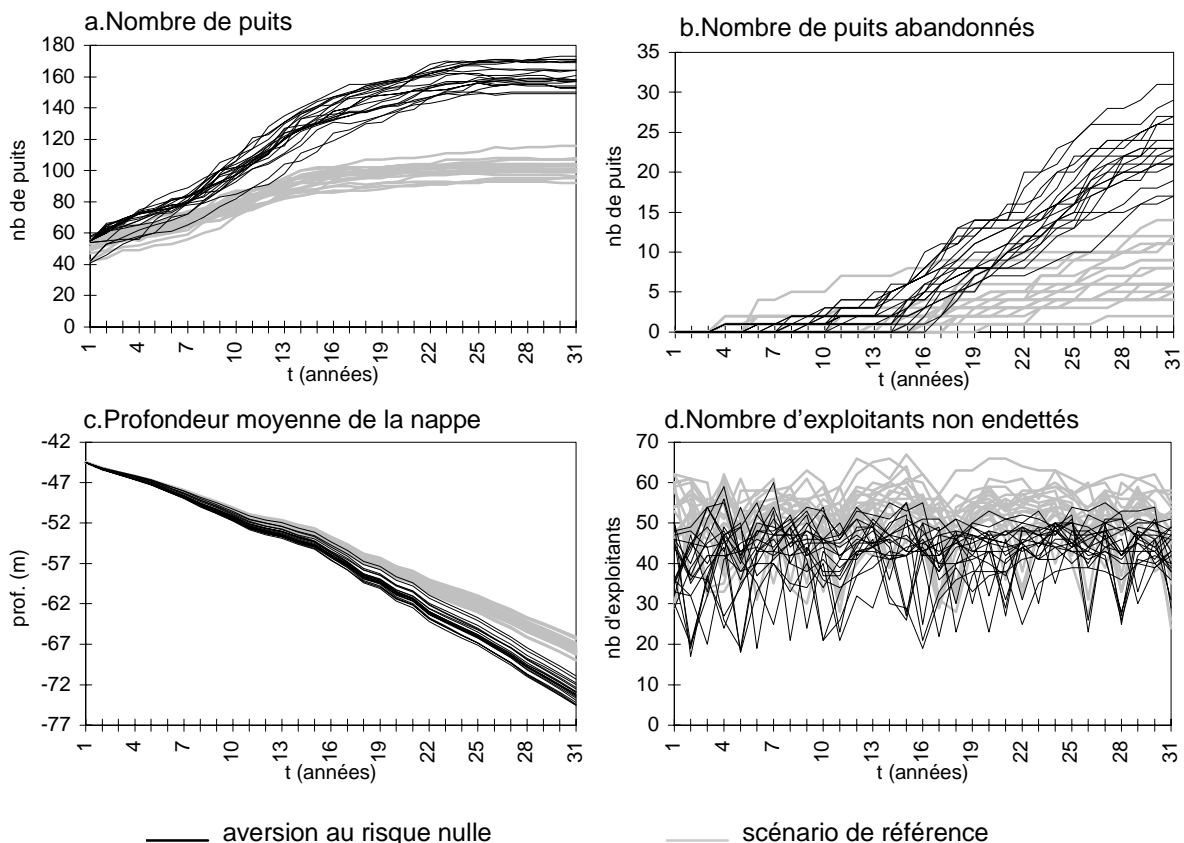


Fig. 41 : Test de cohérence du modèle en situation d'aversion au risque nulle

Le modèle réagit comme prévu (cf. fig. 41). En outre, les enseignements suivants peuvent être tirés de cette expérience :

- le palier observé dans l'évolution du nombre de puits est non seulement dû à la situation économique des exploitants, comme l'a montré l'expérience précédente, mais aussi à leur aversion au risque ;
- une situation de très faible aversion au risque entraîne un accroissement du nombre d'abandons (au 30^{ème} pas de temps, les échantillons de données issus des 2 scénarios sont significativement différents au seuil de 0,2%) du fait de constructions dans des zones où l'eau n'est parfois pas accessible (le nombre de puits en (a) ne comprenant pas le nombre de puits abandonnés, la dynamique de construction est plus forte encore que ne le laisse penser ce graphe) ;
- enfin, ce comportement risqué entraîne globalement une baisse du nombre d'exploitants non endettés (les échantillons de données issus des 2 scénarios sont significativement différents au seuil de 1%), ce qui peut s'expliquer par le fait qu'une construction de puits dans des conditions risquées aussitôt suivie d'un abandon entraîne très souvent une situation d'endettement.

2.4.4.3. Un fort taux d'abandon

Toute procédure de construction ou d'approfondissement de puits comporte un risque, exprimé dans le modèle actuel par une probabilité d'échec variant entre 0,5 et 5% selon les zones (au-delà d'un seuil de profondeur l'échec est systématique). Le test effectué ici porte sur une probabilité d'échec exagérée, de 50%. On doit donc s'attendre à un fort taux d'abandons, une diminution du nombre de puits construits et une baisse des exploitants non endettés.

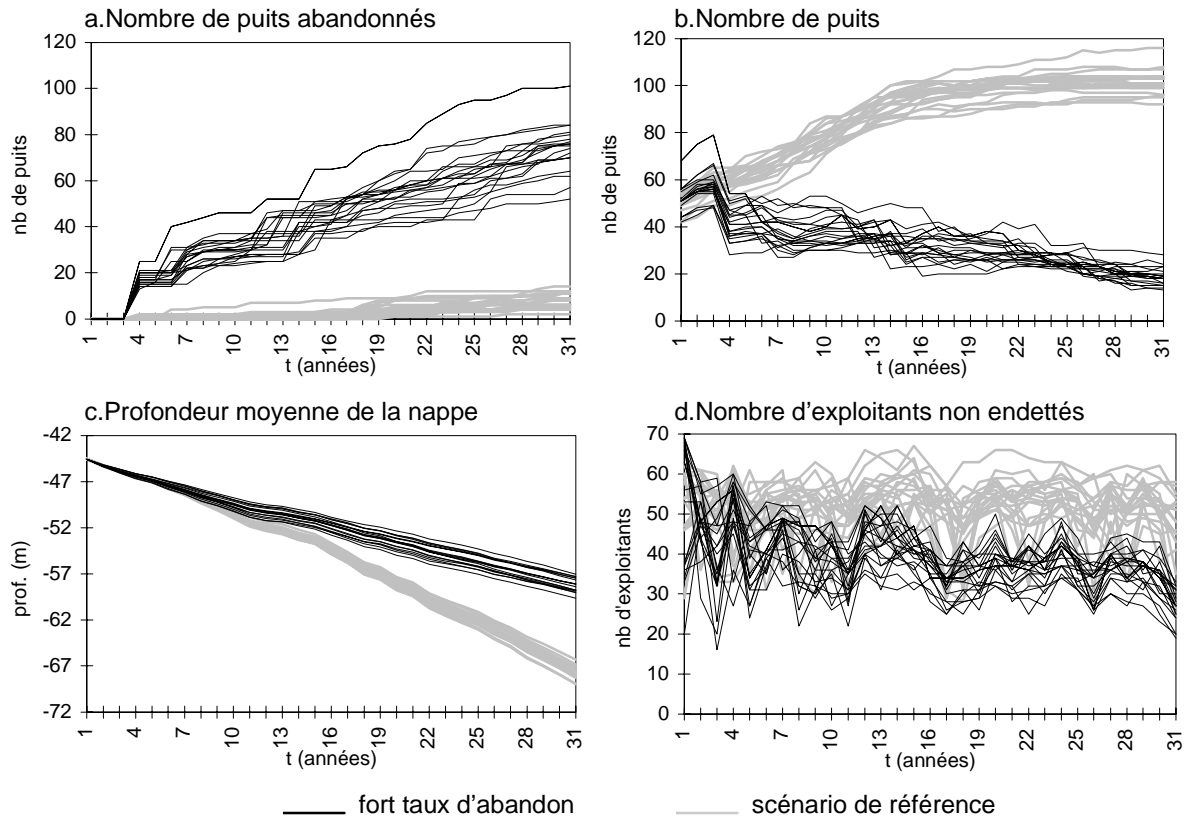


Fig. 42 : Test de cohérence du modèle à un fort taux d'abandon

Le modèle répond correctement à ce test. On voit même sur la figure 42 que le nombre de puits diminue au lieu de s'accroître (les abandons ne sont donc pas compensés par de nouvelles constructions réussies). Remarquons que l'indicateur socio-économique est affecté par ce fort taux d'abandon (e), ce qui semble à première vue contradictoire avec les conclusions énoncées au § 2.4.2, suite aux simulations effectuées sur le long terme. La comparaison de ces deux résultats vient confirmer les hypothèses sur l'explication de l'anormale stabilité du nombre d'exploitant endettés, même à long terme : ici, les exploitants se trouvent endettés car leur puits est abandonné dès sa construction (ou peu de temps après, à l'approfondissement), il n'a donc pas eu le temps de profiter de son puits et devient immédiatement endetté.

2.4.4.4. De très forts apports à la nappe

Les apports à la nappe ont été fixés à 6 millions de mètres cube par an dans le scénario de référence, ce qui correspond approximativement à la moyenne des apports réels de ces dernières années, aucun lâcher du barrage n'ayant été effectué. On teste ici un apport de 20 millions de mètres cube par an (ce qui est totalement irréaliste sur une telle durée même si des lâchers étaient effectués chaque année) ; les prélèvements pour l'irrigation variant entre

10 et 35 millions de mètres cube par an, l'abaissement de la nappe doit théoriquement être atténué par cet apport.

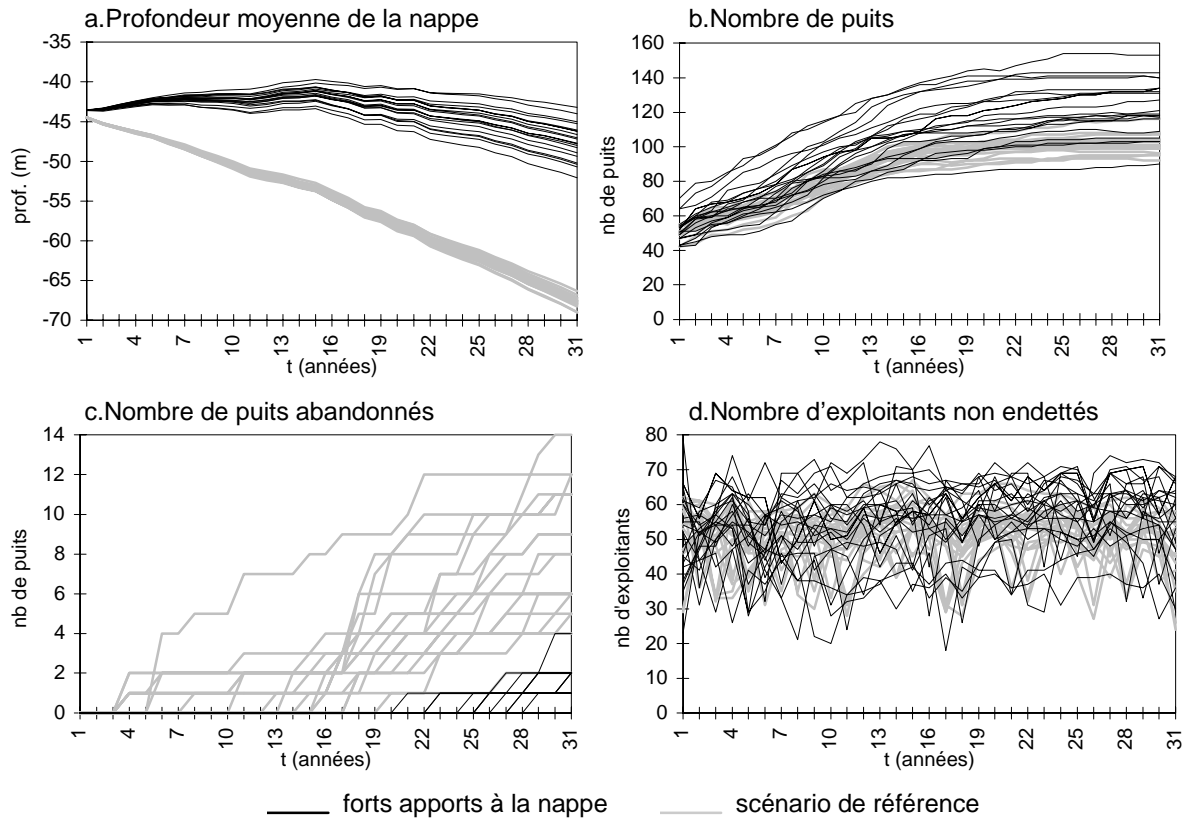


Fig. 43 : Test de cohérence du modèle à de très forts apports à la nappe

Au delà d'une atténuation de l'abaissement, cet apport fictif entraîne presque une tendance à la recharge dans un premier temps (cf. fig. 43). Mais le très faible taux d'abandon des puits (ce qui permet d'attribuer l'abandon dans une majeure partie à l'abaissement de la nappe), se traduit par un prélèvement global plus fort que la normale, provoquant l'abaissement du niveau de la nappe. Les échantillons de données issus des 2 scénarios sont significativement différents au seuil de 0,2% pour le nombre de puits, et de 1% pour le nombre d'exploitants non endettés.

2.4.4.5. Un climat très humide en permanence

Dans le scénario de référence, le climat correspond à la série temporelle des 20 dernières années climatiques, et se traduit par des coefficients affectés aux besoins en eau des plantes moyens. Le test porte ici sur un climat optimal qui satisfait entièrement les besoins en eau des plantes. On doit donc s'attendre à des prélèvements nuls au niveau des puits et en PPI. Aucun nouveau puits n'est construit, du fait de leur manque d'utilité.

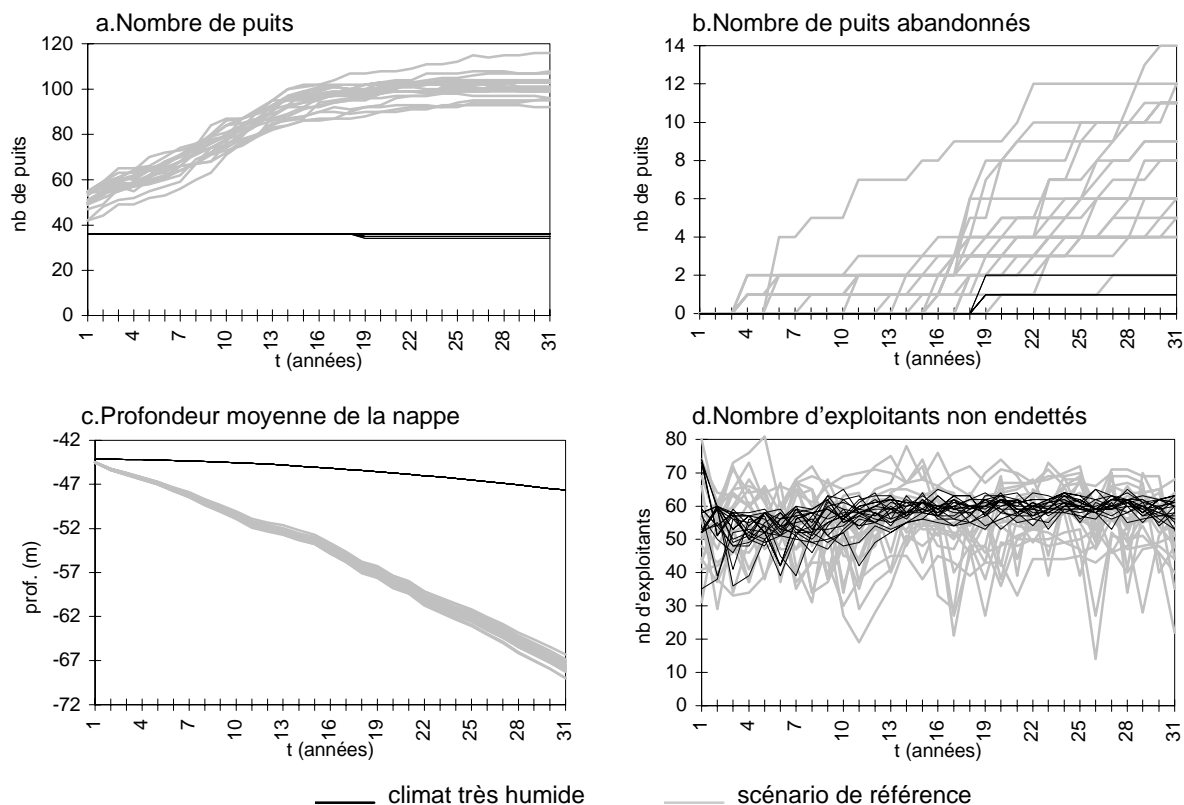


Fig. 44 : Test de cohérence à des prélèvements nuls pour l'irrigation

Le modèle réagit comme prévu (cf. fig. 44). Les prélèvements en eau potable étant fixés à 7 millions de mètres cube par an, et les apports étant de 6 millions de mètres cube par an¹¹, la nappe ne se recharge pas malgré l'arrêt des prélèvements pour l'irrigation, et amorce même une légère baisse, ce qui peut expliquer l'abandon de deux puits, liés à des échecs au moment de l'approfondissement, effectuées au moment de la baisse. Les tendances observées ici suite à un arrêt total des prélèvements pour l'irrigation permettent déjà de conclure que quelle que soit l'intervention de gestion qui sera testée en climat "normal", la nappe continuera de s'abaisser. Cette expérience permet également de remarquer que l'indicateurs socio-économique varie beaucoup moins que pour le scénario de référence : il est tentant de supposer que l'ampleur de ces fluctuations est attribuable aux variations du climat ; cependant comment expliquer l'irrégularité de ces fluctuations (comparé à celles des prélèvements) ? Les expériences suivantes permettront en partie de répondre à cette question.

¹¹ Un climat humide en permanence devrait néanmoins donner lieu à une augmentation des apports, selon le mode de gestion du barrage, et à un ralentissement de l'abaissement en aval de la zone d'étude, ce qui conduirait à une baisse des pertes par transfert horizontal vers l'aval.

2.4.4.6. En conclusion des tests de cohérence

L'ensemble de ces tests de cohérence donne des résultats très satisfaisants, et a permis de répondre en partie aux questions posées sur l'évolution des indicateurs. Ces résultats sont rassurants sur l'intérêt de l'indicateur social : malgré les distorsions dont il est l'objet, il se montre tout de même sensible à des changements de règles du jeu. Ils montrent également que certains phénomènes dépendent d'une combinaison de variables (le nombre de puits par exemple dépend à la fois des conditions économiques des exploitants, de leur aversion au risque, du taux d'abandons, du parcellaire...). Cette expérience pourrait être poursuivie tant elle est riche d'enseignements sur l'interprétation des sorties du modèle. L'objectif de cette phase d'expérience étant atteint (on a montré que globalement le modèle réagit correctement aux perturbations induites), passons à la phase suivante, l'analyse partielle de sensibilité, dont le but est non seulement de renforcer la confiance dans le modèle, mais surtout de repérer les variables dont la connaissance s'avère importante, et éventuellement les variables du système qui peuvent jouer dans le contrôle de la demande.

Voyons maintenant si les agents du modèle pris individuellement suivent des parcours réalistes.

2.4.5. Suivi de quelques individus types

Le suivi d'individus a été mené à différentes étapes de la construction du modèle, au moyen des méthodes classiques de traçage, dans un double objectif :

- d'une part **enrichir la démarche de vérification du modèle**, par la recherche de trajectoires réalistes ou au contraire aberrantes ;
- d'autre part **fournir des éléments de réponse à des questions précises sur la dynamique du modèle** : quels types d'individus construisent des puits ? Un individu qui démarre dans des conditions économiques peu favorables peut-il s'enrichir ou est-il destiné à perdre son capital ? Dans quelle mesure peuvent varier les attributs économiques et fonciers des exploitants ?

Le suivi désigne ici la comparaison d'un état d'arrivée à un état de départ, pour plusieurs individus, sur la base d'indicateurs susceptibles d'être modifiés par la dynamique.

Le grand nombre d'attributs qui joue de manière interactive dans l'évolution des individus (les caractéristiques parcellaires, économiques, familiales de leur exploitation, leur situation par rapport à la nappe et au voisinage) permet difficilement de constituer une typologie des différentes conditions de départ pour étudier les trajectoires possibles. Seules quelques

exemples de trajectoires d'individus "types" sont observées ici, en référence à la typologie préliminaire présentée dans la deuxième partie, au § 2.1, pour répondre aux questions susmentionnées. Dans cet exemple de suivi, six individus de types différents ont été sélectionnés. L'expérience est menée sur trois simulations différentes effectuées à partir du même état initial, afin d'appréhender la diversité des trajectoires individuelles. Par la suite, ce type d'expérience pourrait être mené de manière plus complète, auprès d'un échantillon représentatif de la population et sur une vingtaine de répétitions, afin de mesurer les variabilités des trajectoires. Le tableau 13 caractérise les exploitations suivies par quelques indicateurs, à l'état initial et à la fin de chacune des 3 simulations.

Tab. 13 : suivi de 6 individus, sur 3 simulations différentes. Init : caractérisation de l'exploitation à l'initialisation ; Sim1, 2, 3 : caractérisation de l'exploitation pour les simulations 1, 2 et 3, au bout de 30 pas de temps.

Indiv	état	surface	nb parcelles	épargne (DT)	trésorerie (DT)	puits	PPI	famille	revenus ext	localisation nappe
N°1	Init	9 ha	3	-1140	12600	1	0	6	0	zone 2
	<i>Sim1</i>	12 ha	5	12000	6000	1	0			
	<i>Sim2</i>	33 ha	13	34000	20000	4	0			
	<i>Sim3</i>	47 ha	15	200000	20000	5	0			
N°2	Init	16 ha	6	1220	3300	0	1	10	0	zone 2
	<i>Sim1</i>	13 ha	5	-500000	-10000	1	1			
	<i>Sim2</i>	13 ha	5	-500000	-10000	1	1			
	<i>Sim3</i>	12 ha	4	-500000	-10000	0	1			
N°3	Init	20 ha	2	-3000	23000	1	0	7	1*2000	zone 2
	<i>Sim1</i>	36 ha	8	300000	30000	4	0			
	<i>Sim2</i>	29 ha	6	91000	13000	3	0			
	<i>Sim3</i>	41 ha	10	300000	17000	4	0			
N°4	Init	1 ha	1	1900	-130	0	0	4	2*5000	zone 1
	<i>Sim1</i>	6 ha	3	130000	12000 DT	1	0			
	<i>Sim2</i>	6 ha	4	23000	3000 DT	0	0			
	<i>Sim3</i>	17 ha	8	130000	10000 DT	1	0			
N°5	Init	9 ha	2	2450	5700 DT	0	0	6	5*1500	zone 1
	<i>Sim1</i>	0 ha	0	-130000	-1000 DT	0	0			
	<i>Sim2</i>	0 ha	0	-130000	-1000 DT	0	0			
	<i>Sim3</i>	0 ha	0	-130000	-1000 DT	0	0			
N°6	Init	18 ha	11	12000	-5000 DT	0	1	6	5*1000	zone 1
	<i>Sim1</i>	12 ha	6	-130000	-3000 DT	0	0			
	<i>Sim2</i>	12 ha	6	-130000	-3000 DT	0	0			
	<i>Sim3</i>	12 ha	6	-130000	-3000 DT	0	0			

En terme de vérification, cette expérience permet de retrouver des trajectoires observées sur le terrain (à l'exception des valeurs absolues de la trésorerie et de l'épargne, mal connues dans la réalité). En réponse aux questions posées auparavant, cet exemple, si partiel soit-il, montre déjà que :

- une exploitation dotée de revenus extra-agricoles n'est pas forcément destinée à accumuler de l'épargne et à pouvoir remplir ses objectifs d'acquisition de l'irrigation (individus n° 5 et 6) ;

- un individu sans irrigation au départ et avec un parcellaire très modeste peut réussir à acquérir un puits (individu n°4) tout en se trouvant en zone 1 (la moins favorisée sur le plan de la profondeur de la nappe et des possibilités d'imitation) ;
- un individu peut acquérir un puits sans disposer de revenus extra-agricoles (individu n°2), et se retrouver très endetté en fin de simulation, malgré son puits ;
- une exploitation sans revenus extra-agricoles, avec une épargne de départ négative et un parcellaire moyen peut aboutir à une situation de très forte accumulation (individu n°1) ;
- les trajectoires peuvent varier sensiblement d'une simulation à une autre (individus n°1, 3 et 4). Cette variabilité dépend à la fois de la liberté offerte par la situation initiale de l'exploitant (les individus n°2, 5 et 6 suivent au contraire des trajectoires absolument identiques), et des aléas en cours de simulation. La 3^{ème} simulation est plus favorable aux individus n°1, 3 et 4, ce qui pourrait s'expliquer par un aléa moins pénalisant sur la valorisation de l'épargne et sur le maraîchage d'été.

La question de la stabilité du contexte global du système malgré la variabilité de ces trajectoires individuelles, pourrait donner lieu à une étude de traçage plus complète. Avec le peu d'éléments disponibles dans l'immédiat, on peut l'expliquer par le fait que malgré leurs trajectoires différentes, le nombre de puits des individus est peu variable, étant limité par le nombre d'actifs familiaux dans l'exploitation.

Par ailleurs, cette expérience de traçage révèle le caractère excessif des processus cumulatifs, et ce malgré l'introduction d'aléas sur la production maraîchère d'été et sur l'épargne et de réductions des dépenses en situation économique défavorable. **Ce constat est lourd de conséquence sur la dynamique du système modélisé**, la construction des puits étant très liée à l'épargne mobilisable par les exploitants. De plus, cette distorsion se traduit par un marché foncier excessivement dynamique, malgré les seuils d'endettement imposés dans le modèle pour la vente de parcelles, dans le but de refléter l'aversion des exploitants à la vente de leur terre. Ceci conduit remettre en cause certaines règles de comportement des exploitants, comme nous le verrons par la suite.

2.5. Analyse de sensibilité du modèle à quelques facteurs clefs

Chaque test de sensibilité donne lieu à un jeu de 20 simulations répétées à partir du même état initial afin de privilégier la variabilité stochastique des procédures par rapport à la variabilité induite par l'initialisation. Ces simulations, effectuées à partir d'un même état initial, sont comparées à un scénario de référence dont la simulation est répétée 20 fois à partir

d'états initiaux différents, afin de relativiser la variabilité induite sur une même image par le paramètre testé (ce type de comparaison ne permet pas de statuer sur les différences de variabilité).

2.5.1. Les facteurs de nature économique

2.5.1.1. Le minimum de "dépendances courantes"

Les enquêtes effectuées ne renseignent pas sur la manière dont les exploitants gèrent leur trésorerie et leur épargne. Hormis les charges de campagne, les dépenses familiales courantes et les éventuels investissements dans un puits ou dans une parcelle, les exploitants dépensent une partie de leur trésorerie en dépenses courantes ou en investissements divers destinés à l'exploitation et à la famille (augmentation du niveau de vie, mariage, construction d'une maison...), ou pour compenser des accidents éventuels. Ces dépenses sont supposées proportionnelles au revenu, et les sont fixées en moyenne à un tiers de la trésorerie, dans le scénario de référence. L'expérience menée ici teste la sensibilité du modèle à de très faibles dépenses exceptionnelles : un dixième seulement des excédents de trésorerie en moyenne. Bien évidemment, cette règle de dépense varie en réalité d'un exploitant à l'autre, et pour un même exploitant, d'une année à l'autre, suivant les besoins familiaux, les incidents subis, le renouvellement de l'équipement hors irrigation...

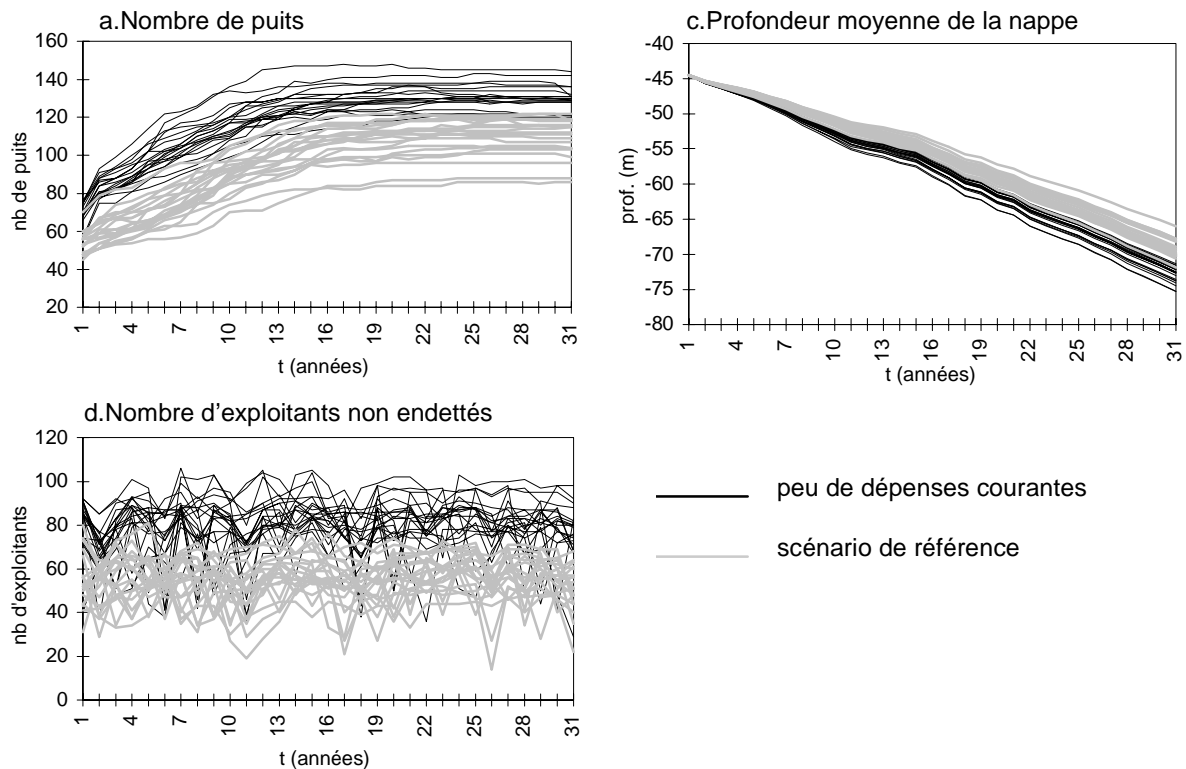


Fig. 45 : Sensibilité à une autre règle de dépense. Les dépenses courantes représentent 1/10 de la trésorerie (au lieu d'1/3).

Le test statistique mené sur les trois indicateurs confirme l'analyse graphique de la figure 45 : le modèle est effectivement sensible à de très faibles dépenses exceptionnelles. Au 30^{ème} pas de temps, les échantillons issus des 2 scénarios sont significativement différents au seuil de 0,2%, pour les 3 indicateurs présentés ici. Cette règle de dépense traduit un effort d'épargne consacré avant tout à l'accès à l'eau et à la terre : l'épargne est moins limitante (on retrouve dans une moindre mesure l'effet d'un très fort revenu testé au § 2.4.4.1), donc le nombre de puits construit est plus important (a), ce qui entraîne une accélération de l'abaissement de la nappe (b), ainsi qu'une augmentation du nombre d'exploitants non endettés (c). Cependant le rythme de progression des puits paraît moins réaliste que dans le premier cas, et les processus cumulatifs de l'épargne sont encore accrus, alors qu'ils sont déjà excessifs dans le scénario de référence.

2.5.1.2. Plus d'emprunts à long terme

Dans le modèle SINUSE, l'investissement dans un puits peut donner lieu à un emprunt à long terme, ce qui représente dans la réalité les emprunts effectués auprès de la famille, et les crédits fournisseur et "privés". L'exploitant doit néanmoins fournir une bonne part de l'apport, ce qui a été traduit, d'après des discussions informelles avec les agriculteurs, par un taux d'apport moyen de 60% au minimum, dans le scénario de référence. Le test porte ici sur un apport minimal de 40% en moyenne, qui constitue la borne inférieure de la plage de variation du taux moyen d'apport à fournir par l'exploitant (en réalité, ce taux d'apport varie bien entendu selon les individus et selon les années, du fait des conjonctures familiale et économique, des caractéristiques de l'exploitation...°).

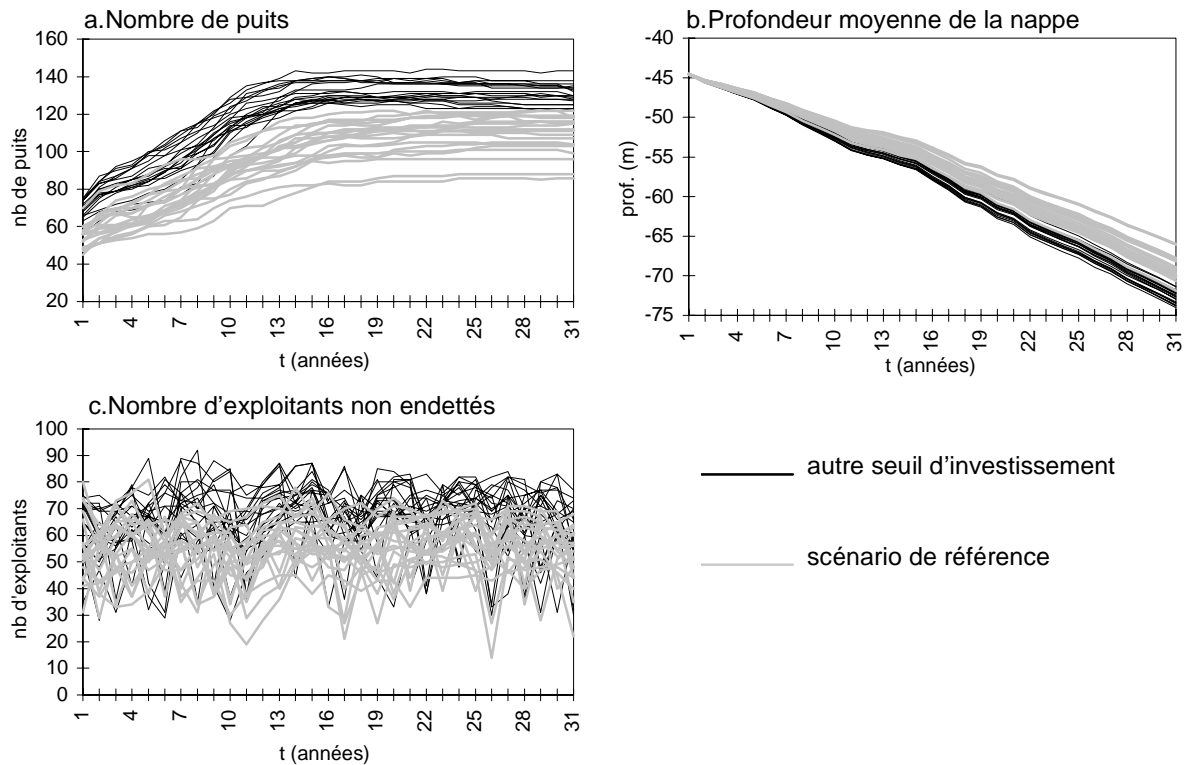


Fig. 46 : Sensibilité à un autre seuil d'investissement. Les exploitants peuvent investir dans un puits à partir du moment où ils apportent au moins 40% de la valeur de l'investissement (au lieu de 50%).

Ce changement de règle induit une différence significative sur le nombre de puits et la profondeur de la nappe (cf. fig. 46), confirmé par le test statistique, à moins de 1%. Cette information est importante à deux titres : la règle d'emprunt à long terme doit être mieux connue, et le recours aux crédits peut constituer une variable de contrôle du système. Elle confirme également le rôle clef des processus d'accumulation et de dépenses dans le modèle.

2.5.1.3. Minimiser les emprunts de campagne

Même si les agriculteurs de la plaine de Kairouan se disent assez réticents à emprunter de manière générale, les statistiques agricoles et les discussions informelles montrent qu'ils ont recours aux crédits de campagne. Ces informations ont été traduites dans le modèle par un seuil moyen de tolérance de l'endettement à court terme, au delà duquel l'exploitant cesse d'irriguer (mais également de prendre des terres en FVI et d'approfondir son puits), pour ne pas alourdir ses charges de campagne. Ces seuils ont été fixés dans le scénario de référence à -10 000 DT et -5000 DT respectivement pour les campagnes d'hiver et d'été, ce qui traduit la prudence des exploitants envers les risques supplémentaires induits par le maraîchage d'été. Le test porte ici sur une franche aversion aux emprunts de campagne, traduite par un arrêt de l'irrigation dès que la trésorerie est négative, en hiver comme en été.

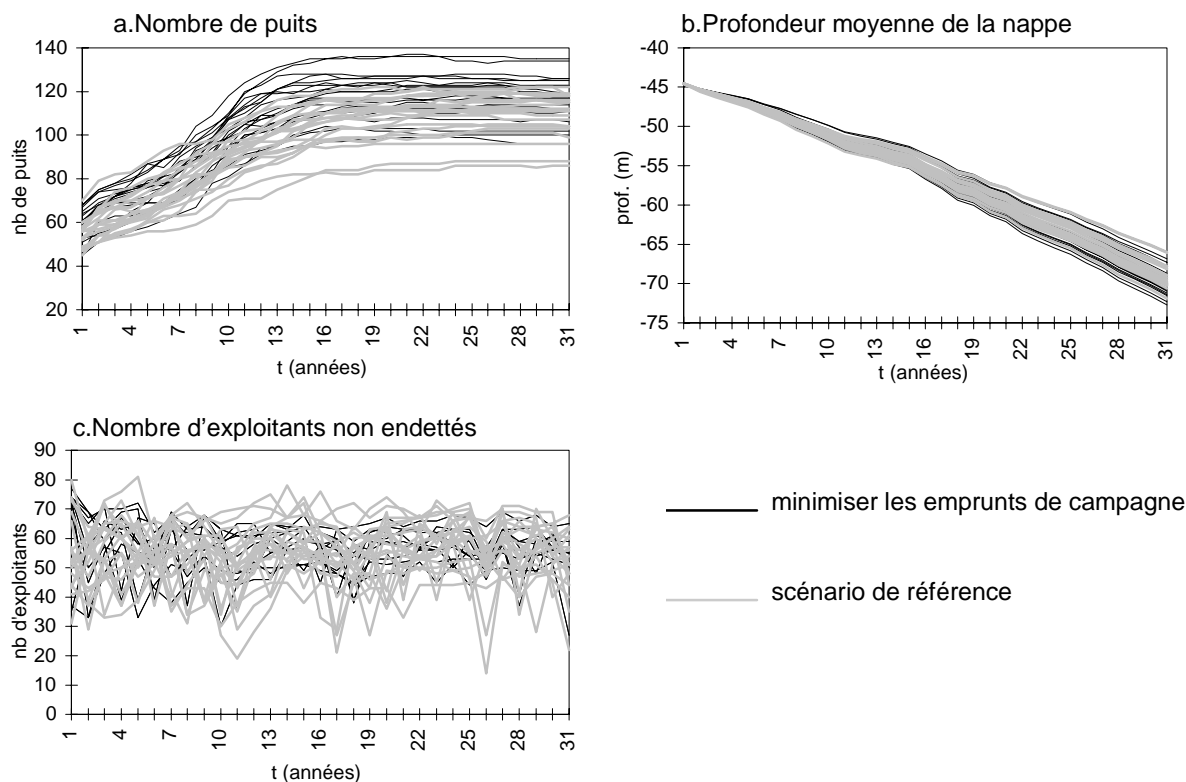


Fig. 47 : Sensibilité à une autre règle d'emprunt court terme. Les exploitants cessent d'irriguer dès que leur trésorerie est négative (au lieu de recourir à des emprunts de campagne).

Le test statistique conduit à accepter l'hypothèse de similitude des deux échantillons pour la profondeur de la nappe et le nombre d'exploitants non endettés. Par contre, il conduit à accepter l'hypothèse de différence significative au seuil de 1% pour le nombre de puits. Un plus grand nombre de puits et des prélèvements réduits en moyenne pourrait expliquer l'absence d'effet sur la nappe. Ce résultat pose question sur la formalisation actuelle des règles d'action : ne signifie-t-il pas qu'un certain nombre d'exploitants qui, dans le scénario de référence, s'endettent par des emprunt à court terme et ne peuvent construire de puits, ont les moyens, dans le scénario testé, d'investir dans un puits, du fait d'une meilleure gestion de leur irrigation au regard de leurs moyens ? Même si son incidence globale est faible, ce paramètre pourrait donner lieu à d'autres types d'expériences dans le but d'explorer des règles d'irrigation alternatives.

2.5.1.4. Un faible taux d'aversion au risque

Dans le scénario de référence, seulement 10% des exploitants confrontés au choix d'une construction pionnière (avant d'avoir comparé leur épargne au coût de l'investissement) tentent de passer à l'acte, soit une aversion au risque de 90% de la population exposée à la question, ce qui est cohérent avec l'importance de l'imitation dans les processus en jeu. L'aversion au risque testée ici est de 50%.

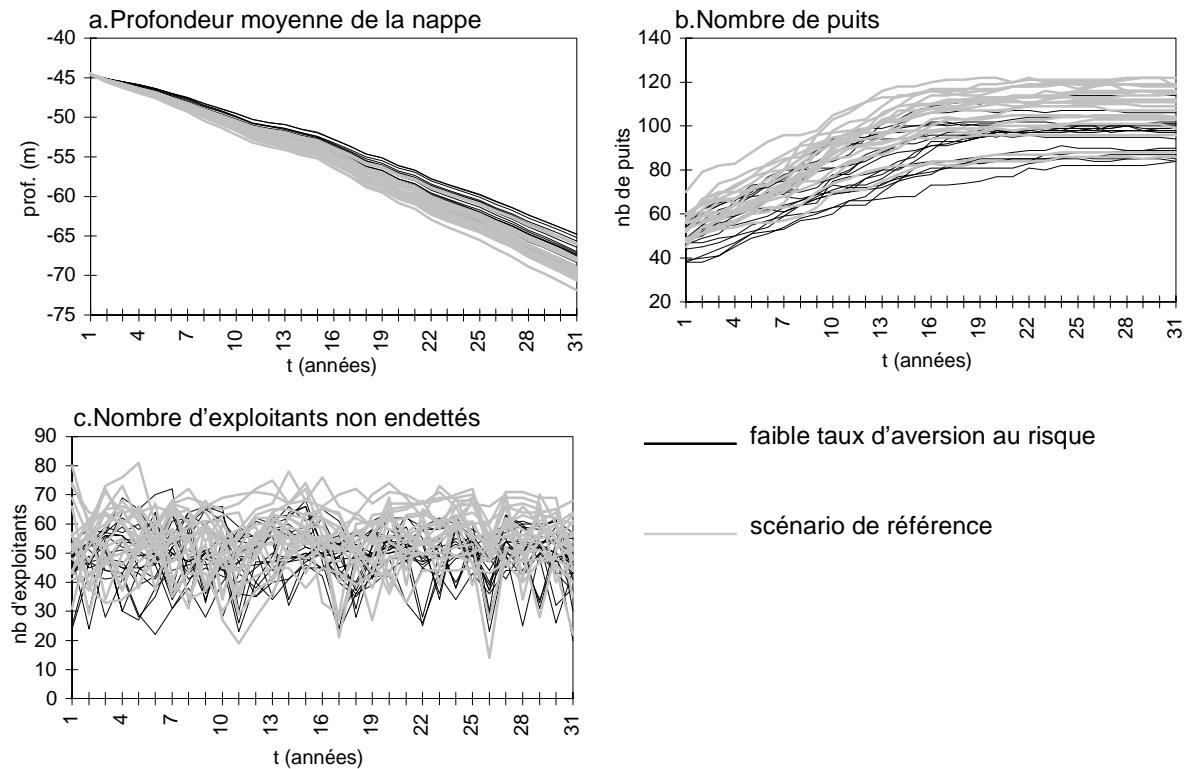


Fig. 48 : Sensibilité à une faible aversion au risque. Le taux de la population aversive au risque est fixé à 50% au lieu de 90%.

Le test statistique permet de trancher l'incertitude qui ressort de l'analyse graphique de la figure 48, en montrant que le modèle est sensible au taux d'aversion au risque de la population (à 0,2% pour les indicateurs a et b et à 1% pour l'indicateur c).

2.5.1.5. Aucun aléa sur la valorisation de l'épargne

Dans le scénario de référence, la valorisation annuelle de l'épargne, en majorité réalisée sous forme de bétail, est soumise chaque année à un risque de perte identique pour tous les exploitants (risque d'épidémie, chutes des prix...), représenté par un coefficient variant entre 1 et 0,1. Dans le scénario testé, le risque est uniformément nul au long des 30 pas de temps (de la même manière que le test précédent, celui-ci est effectué hors du domaine vraisemblable de variation du paramètre, qui est méconnu).

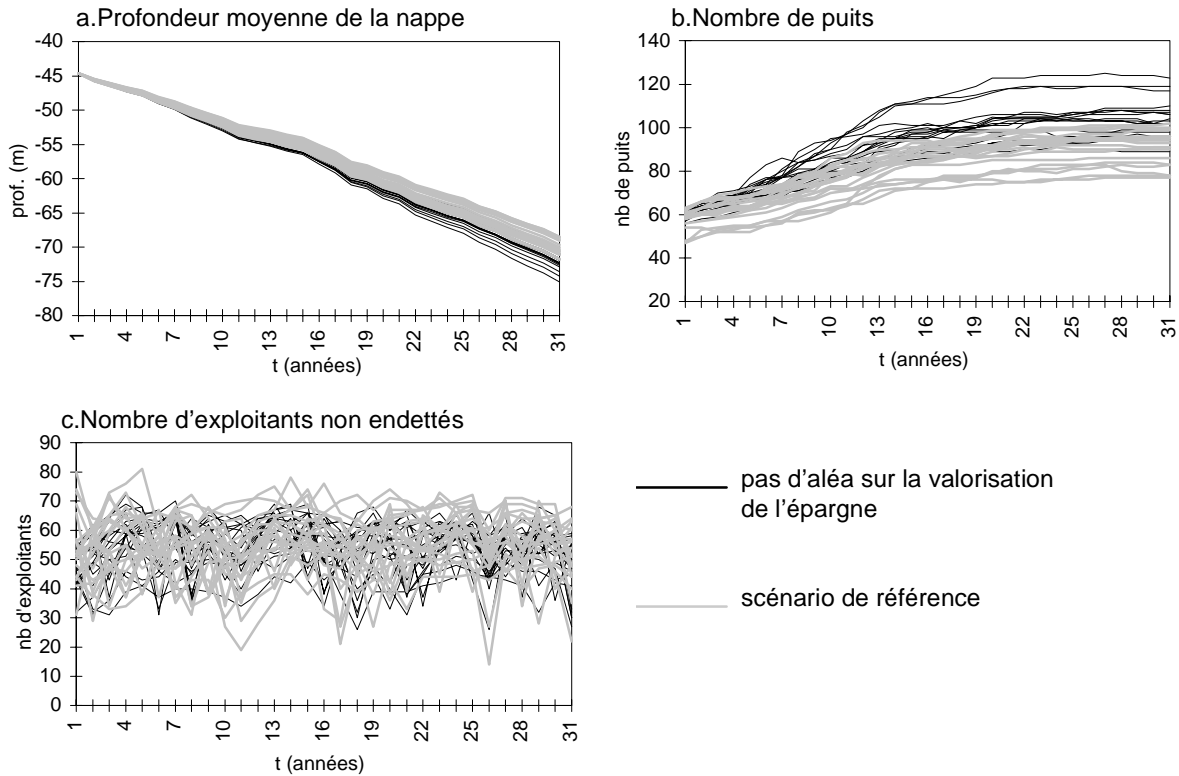


Fig. 49 : Sensibilité à l'aléa sur la valorisation de l'épargne. Le scénario porte sur un aléa sur l'épargne nul.

Le scénario testé traduit une orientation préférentielle de l'épargne vers l'accès à l'eau (cf. fig. 49). En effet, le nombre de puits, et par conséquent la profondeur de la nappe, sont sensiblement différents (respectivement à 0,2%, 1% et 0,2%), alors que l'absence de risque sur la valorisation de l'épargne ne modifie pas le nombre moyen d'exploitants endettés. Ce résultat est surprenant étant donné que l'épargne des exploitants devrait au contraire être touchée en premier lieu, les autres indicateurs évoqués l'étant seulement indirectement. En l'absence d'aléa, l'épargne des exploitants atteint un niveau moyen supérieur à celui du scénario de référence, favorisant l'investissement et l'irrigation, mais autant d'exploitants qu'avant sont endettés, ce qui signifie que ce taux d'endettement est à déconnecter de l'investissement dans les puits et de l'irrigation d'une part, et de l'aléa sur la valorisation de l'épargne, d'autre part.

2.5.2. Les facteurs d'interaction sociale

La phase exploratoire du plan d'expériences menée ici est également l'occasion de s'interroger sur la pertinence des hypothèses centrales du modèle : les interactions locales entre exploitants ont-elles un rôle important dans la dynamique globale du modèle, comme supposé initialement ?

2.5.2.1. Une règle d'imitation plus forte

On a vu en deuxième partie que l'apparition des puits repose préférentiellement sur un processus d'imitation : la présence de puits fonctionnels dont le propriétaire réussit vraisemblablement (selon un indicateur économique, la trésorerie) dans le voisinage de la parcelle, indique que la nappe est accessible et que l'investissement dans un puits est rentable. Dans le scénario de référence, l'indicateur de réussite sur laquelle est basée l'imitation est fixé à 1000 DT. Le test porte ici sur une règle d'imitation basée sur une trésorerie positive, ce qui paraît être le seuil minimal pouvant motiver l'imitation.

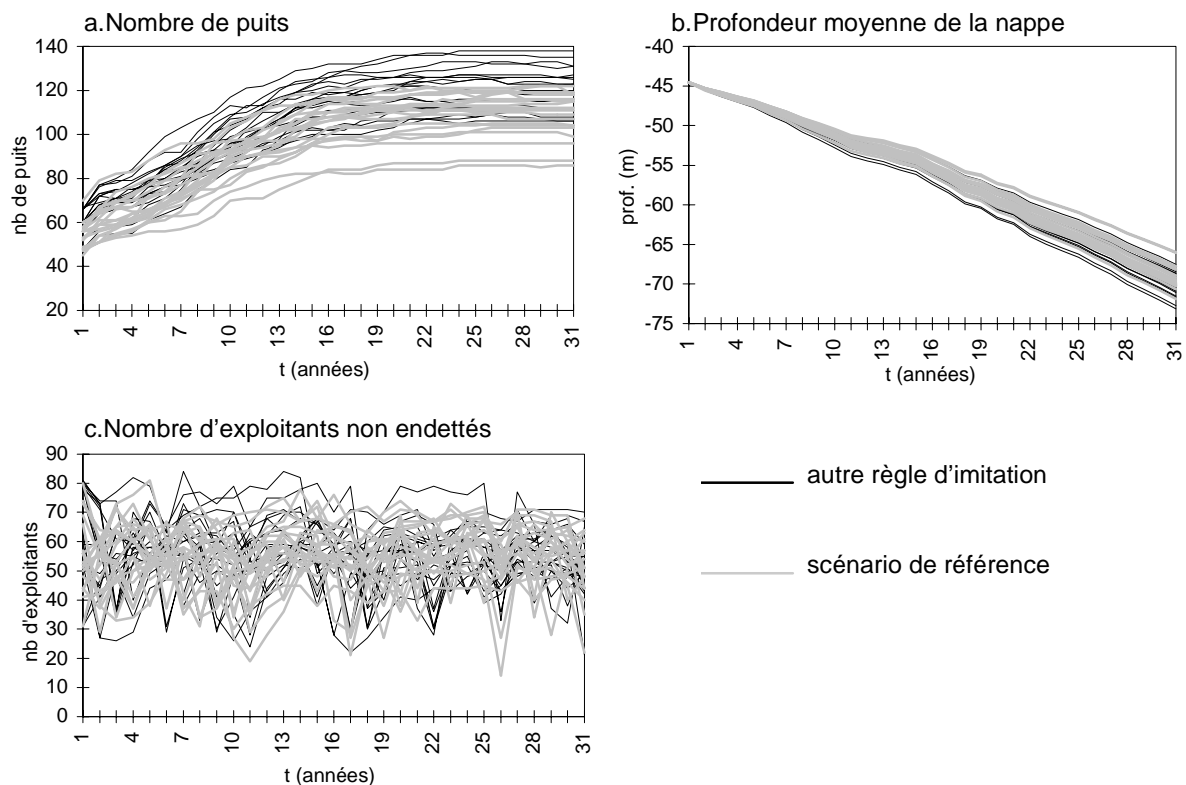


Fig. 50 : Sensibilité à une autre règle d'imitation. L'exemple de l'investissement dans un puits est suivi à partir du moment où la trésorerie du voisin est positive.

Si le test de Wilcoxon Mann Whitney effectué sur le nombre de puits conduit à différencier les résultats du dernier pas de temps (à 0,2%), le même test mené sur la profondeur de la nappe et sur le nombre d'exploitants non endettés confirme le résultat graphique issu de la figure 50 selon lequel il n'y a pas de différence significative entre les deux jeux d'observation.

2.5.2.2. Sensibilité à l'imitation

Le premier scénario teste l'importance de deux types d'interactions : les échanges de parcelles en faire-valoir indirect et le rôle de l'imitation dans la construction des puits. Ainsi, dans ce scénario, aucun échange en FVI n'a lieu, et les puits sont seulement construits selon les procédures "faitUnPuitsRisque" ou "faitUnAutrePuitsRisque", les agents ne tenant pas compte des informations apportées par le voisinage.

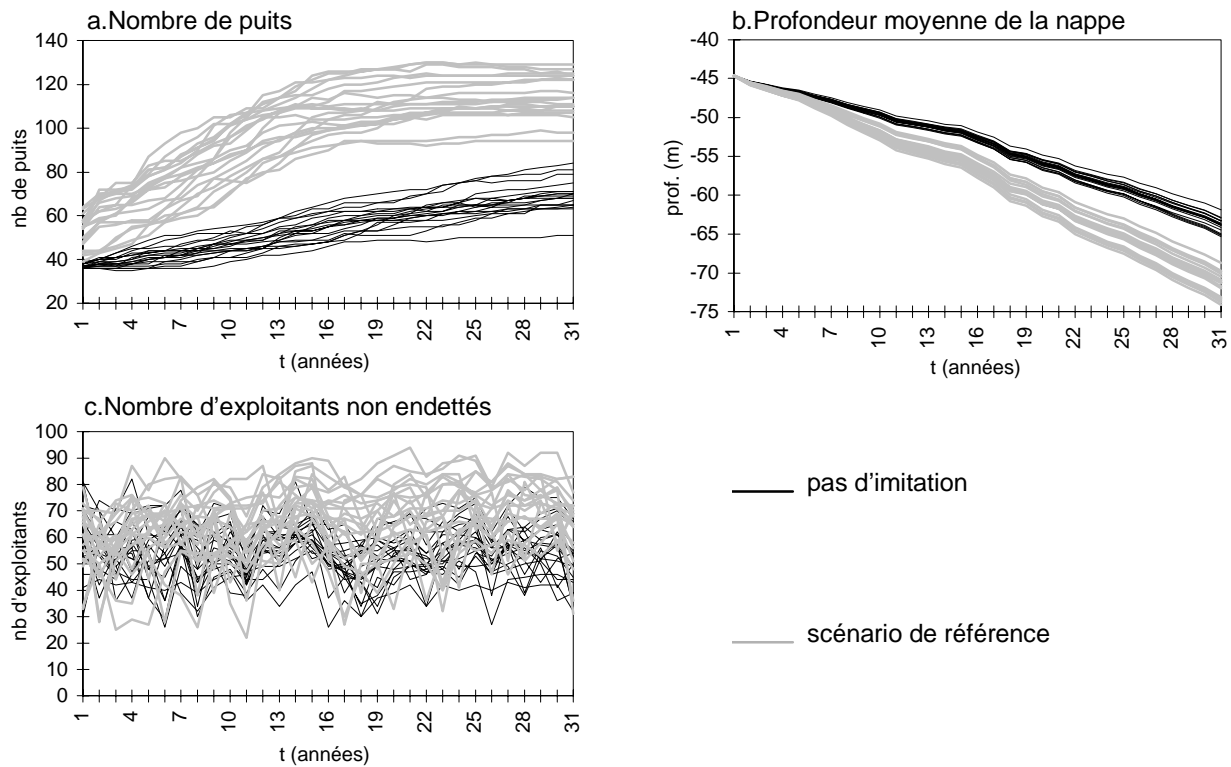


Fig. 51 : Sensibilité au processus d'imitation.

Le graphe (a) de la figure 51 montre que le nombre de puits construits est très réduit par rapport au scénario de référence ; il n'atteint même pas le palier des limites économiques, ce qui se répercute à la fois sur le nombre d'exploitants non endettés en (c) (significativement différent du scénario de référence au 30^{ème} pas de temps au seuil de 0,2 %), et sur la nappe en (b), dont l'abaissement est très ralenti.

2.5.2.3. Sensibilité au faire-valoir indirect

Dans le scénario testé ici, les exploitants ne procèdent plus à aucun échange en faire-valoir indirect.

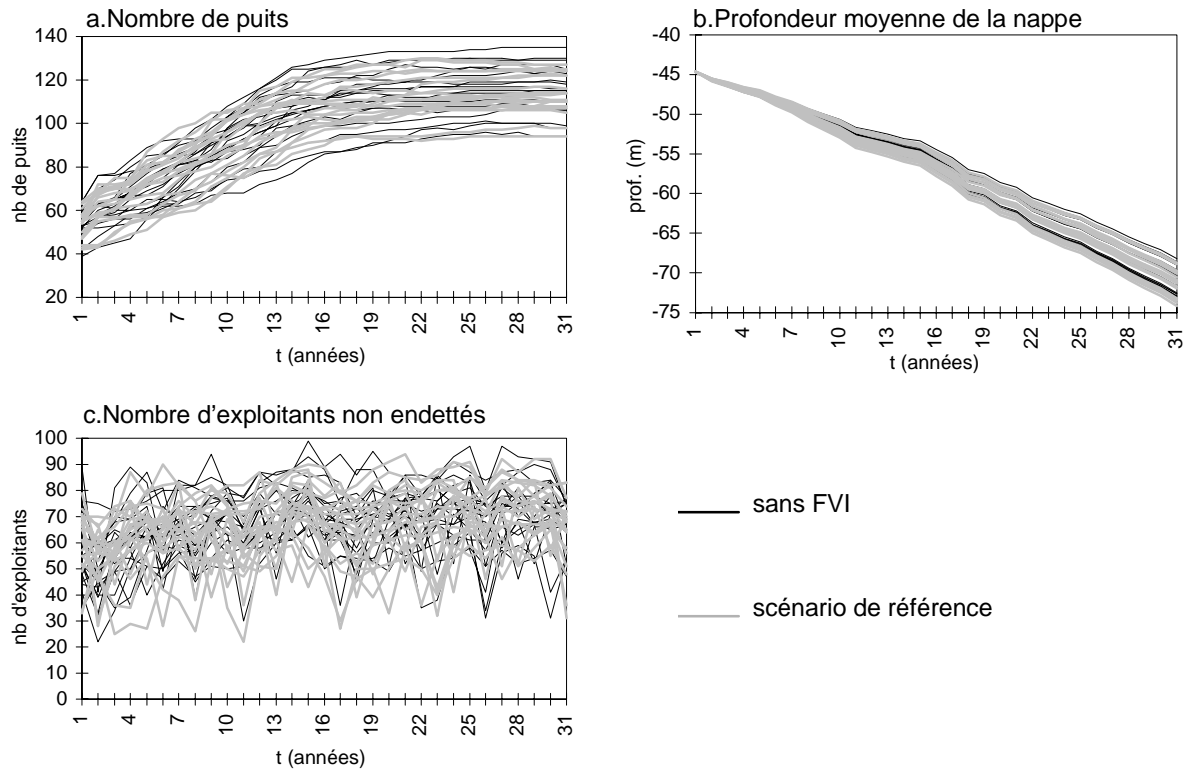


Fig. 52 : Sensibilité au faire-valoir indirect

Le test statistique mené sur le dernier pas de temps confirme l'analyse graphique de la figure 52 : les résultats de deux jeux de simulation ne sont pas significativement différents, quel que soit l'indicateur considéré. Ceci conduit à infirmer l'hypothèse de départ sur l'importance de ce type d'interaction. Le modèle n'est pas sensible au faire-valoir indirect, ce qui peut laisser supposer que la dynamique du système réel lui-même n'est pas déterminée par ces échanges fonciers.

Voyons maintenant quel est le rôle du marché foncier dans la dynamique du modèle.

2.5.2.4. Sensibilité au marché foncier

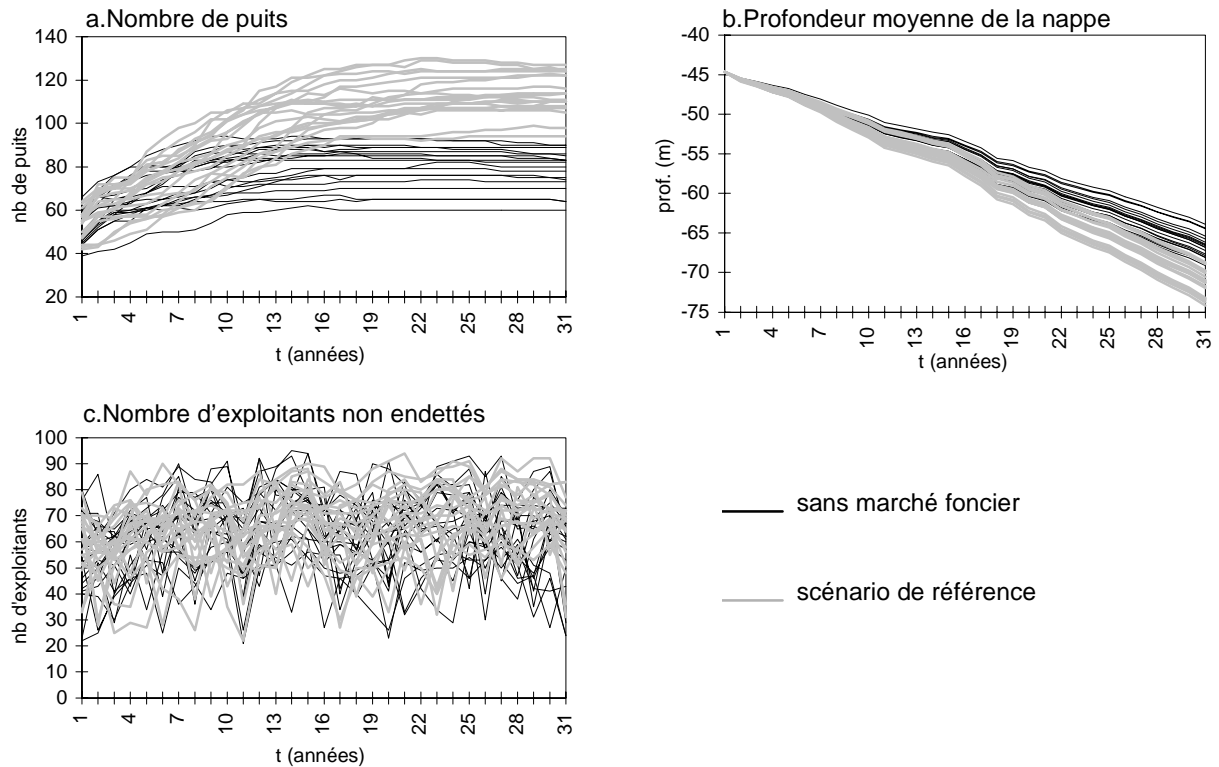


Fig. 53 : Sensibilité au marché foncier

Comme le laissait pressentir la figure 53, le test statistique mené sur le dernier pas de temps montre que les résultats sont significativement différents sur tous les indicateurs présentés ici, hormis le nombre d'exploitants non endettés, et ce au seuil de 0,2%. On remarque en particulier que l'effet est particulièrement important sur le nombre de puits (a) et sur la profondeur de la nappe (b). Ceci s'explique par le fait que les exploitants ayant les moyens financiers de construire un puits sont limités par leur parcellaire, faute de pouvoir étendre celui-ci *via* l'achat de nouvelles parcelles.

2.5.2.5. Sensibilité aux associations pour la construction des puits

Voyons maintenant en quoi les possibilités d'associations pour la construction des puits jouent sur leur dynamique d'apparition.

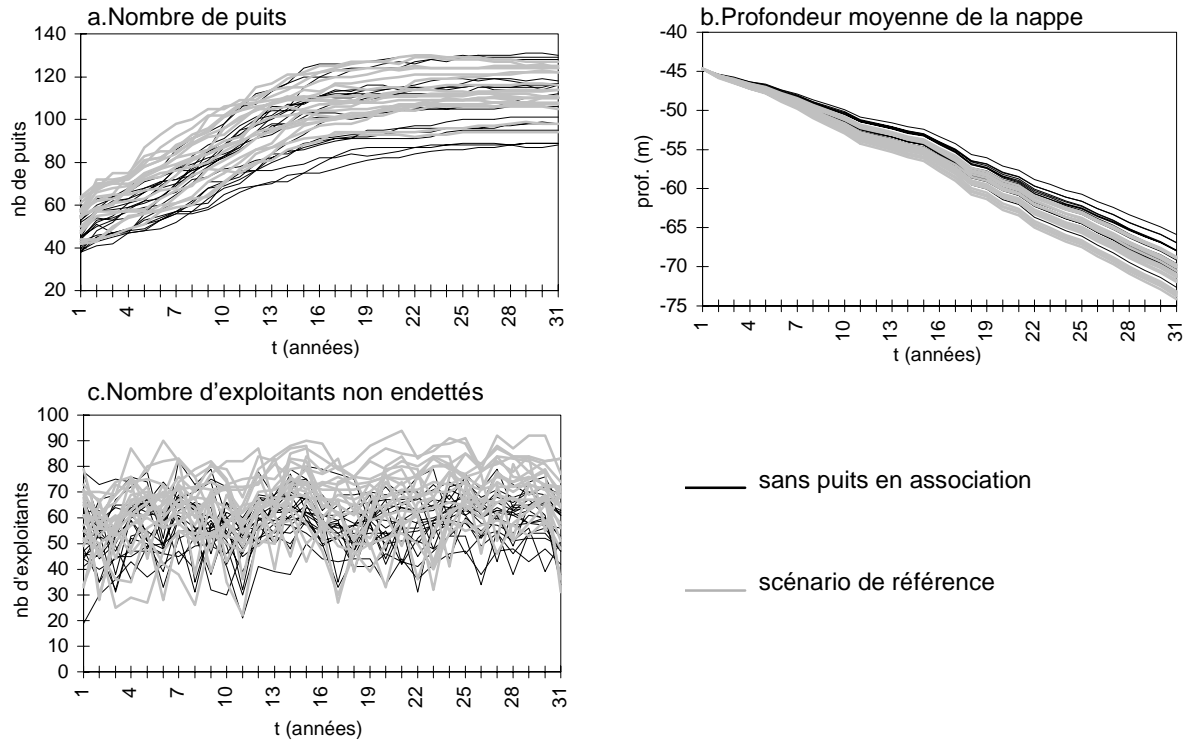


Fig. 54 : Sensibilité aux possibilités d'association pour la construction d'un puits. Ces interactions concernent : la construction d'un puits entre deux voisins, sur une parcelle prise en "mouzaraâ" pendant 4 ans, ou sur une petite parcelle, compte tenu de l'offre potentielle en FVI dans le voisinage proche.

Le test de Wilcoxon Mann-Whitney mené sur le dernier pas de temps confirme l'analyse graphique de la figure 54.a : le nombre de puits n'est pas significativement touché par ce type d'interactions. Par contre, il révèle, de manière assez inattendue, que la profondeur de la nappe et le nombre d'exploitants non endettés sont significativement différents dans les deux scénarios, au seuil de 0,2 %. La différence en (b) pourrait s'expliquer par le fait que les prélèvements par puits sont inférieurs à la situation de référence, du fait de l'absence de puits partagés, qui sont systématiquement suréquipés (ils sont dotés d'une pompe plus puissante et en terme de surface leur capacité d'irrigation est de 10 hectares au lieu de 6 hectares, ce qui, malgré leur faible nombre, peut expliquer leur importance). Tandis que la différence en (c) s'expliquerait par le fait que les exploitants pauvres, qui dans le scénario de référence pouvaient s'enrichir en construisant un puits en association ou sur une petite parcelle, ne le peuvent plus.

Pour conclure sur ces expériences de sensibilité aux interactions, le modèle indique un rôle inégal des différentes interactions : celui de l'imitation et celui du foncier sont prépondérants, tandis que celui du FVI est nul, et celui des associations pour la construction de puits, effectif, mais peu important. Cependant, concernant le rôle de l'imitation, il est à noter que l'aversion au risque n'a pas été modifiée dans le scénario testé, la dynamique d'apparition des puits est donc directement liée à l'aversion au risque. Or en l'absence de la pression sociale et des indicateurs visuels apportés par le voisinage, à la base du processus d'imitation, les agriculteurs ne sont-ils pas conduits à prendre un risque plus fort, poussés par la volonté de construire un puits pour pallier le risque climatique et s'enrichir ?

Ces expériences sur la sensibilité du système modélisé aux interactions locales confirment en partie l'hypothèse centrale de ce travail sur l'importance de ces interactions dans la dynamique globale. En effet, si le rôle du FVI est remis en question - ce qui peut conduire à simplifier le modèle, ces processus étant responsables pour une grande part de la complexité actuelle du modèle - en revanche, ceux de l'imitation et du marché foncier sont confirmés. Certes, le marché foncier paraît exagérément dynamique dans le modèle, par rapport à la réalité. Tant que les comportements représentés ne sont pas soumis à la critique d'experts locaux, en particulier celle des fellahs eux-mêmes, pour être validés, la question de leur importance demeure.

2.5.3. Les facteurs de nature technique

2.5.3.1. Une efficacité de distribution minimale

L'efficacité moyenne de distribution de l'eau d'irrigation à partir des puits est fixée à sa valeur minimale, c'est à dire à 60% (au lieu de 70% dans le scénario de référence).

Le test statistique montre que les deux scénarios sont significativement différents, au moins sur l'indicateur "social" (à 1%) et sur la profondeur de la nappe (à 0,2%), contrairement à ce que pourrait laisser croire l'analyse graphique de la figure 55 : l'impact d'une faible efficacité moyenne sur les indicateurs de la dynamique du modèle est significatif. Cependant il demeure faible : cette expérience laisse présager qu'une intervention technique sur le système allant dans le sens d'une meilleure efficacité aura peu d'effet, la marge de manoeuvre étant assez limitée. Ce type d'intervention est prévu pour la 3^{ème} phase du plan d'expériences.

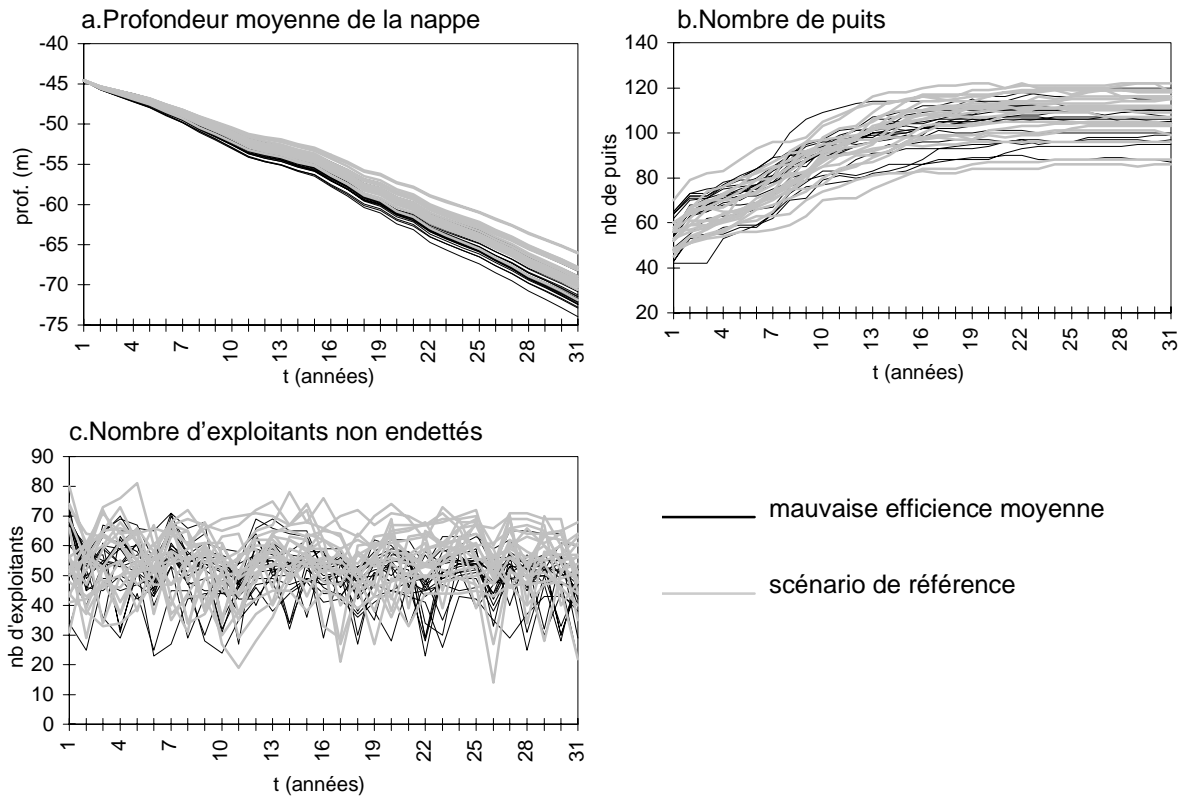


Fig. 55 : Sensibilité à une faible efficacité de distribution de l'eau à partir des puits. L'efficacité testée est de 60% au lieu de 70%.

2.5.3.2. Un seuil de profondeur plus limitant pour la construction des puits

La profondeur maximale de construction des puits, due à l'accroissement des risques pris par les ouvriers et à la fragilisation des parois au-delà d'une certaine profondeur, a été initialement fixée à 70 mètres dans le scénario de référence, du fait de l'existence, signalée par plusieurs agriculteurs différents, de puits de 70 mètres de profondeur dans la zone. Toutefois, une profondeur maximale de 50 mètres est ressortie d'une entrevue avec un constructeur de puits. C'est le seuil qui a été testé ici.

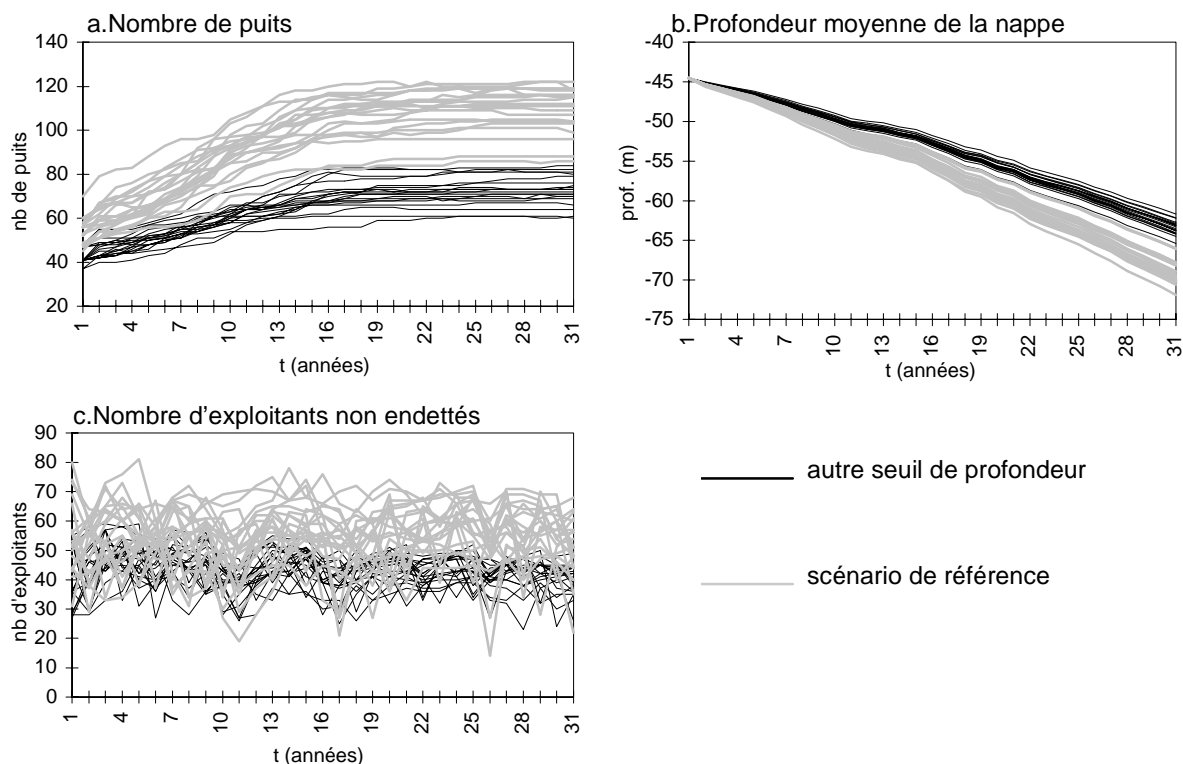


Fig. 56 : Sensibilité à un seuil de profondeur plus faible. Les puits ne peuvent pas être construits au delà d'une profondeur de 50 m (au lieu de 70 m).

L'analyse graphique de la figure 56, confirmée par le test de statistique, conduit à conclure que ce seuil technique a un impact significatif sur la dynamique d'évolution des principaux indicateurs. Le nombre de puits est réduit par rapport au scénario de référence, les exploitants ne pouvant construire de puits, dès les premiers pas de temps, dans les zones de plus de 50 m de profondeur. Par conséquent, la baisse de la nappe est amortie, et le nombre d'exploitants non endettés est globalement inférieur à la situation "normale". Ces résultats entraînent deux conclusions : d'une part il importe de mieux connaître le seuil technique de profondeur pour la construction des puits, d'autre part, une modification de ce seuil par l'introduction de nouvelles techniques de creusage peut avoir un impact significatif sur la dynamique du système à terme.

2.5.3.3. Une plus forte capacité d'irrigation des puits en moyenne

Les observations de terrain ont révélé une certaine variabilité de la capacité d'irrigation des puits, due à la profondeur de captage, à la puissance des pompes, à leur âge, à la vitesse de rotation choisie par l'agriculteur. De plus, cette capacité en débit a été traduite en terme de surface irrigable par simplification : cette dernière varie bien évidemment en fonction de l'assolement à irriguer. Toutefois le sondage a montré que si la surface irriguée par les puits est de 6 hectares en moyenne (la moyenne a été choisie dans le modèle plutôt que la valeur

maximale, en raison des surestimations probables en terme de surface) les trois quarts des puits irriguent une surface inférieure à 7 ha. Le scénario teste ici l'effet du seuil maximal.

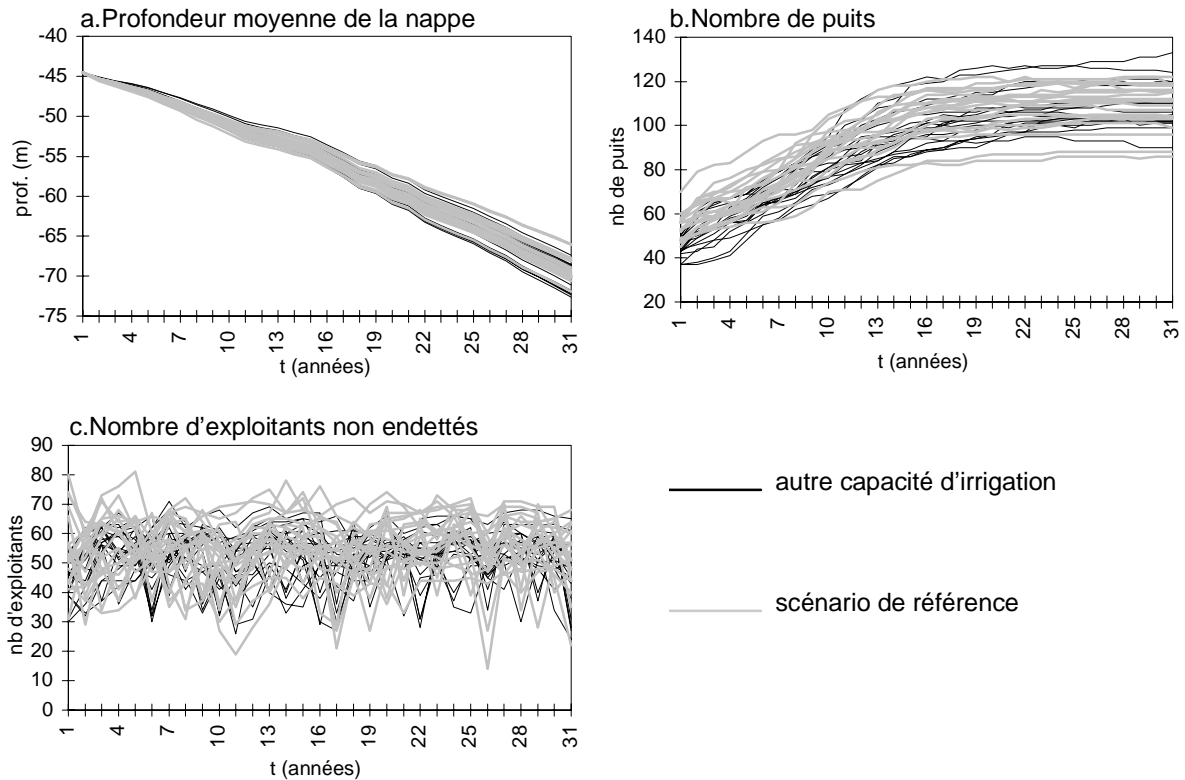


Fig. 57 : Sensibilité à une forte capacité d'irrigation. Les puits peuvent irriguer 7 hectares au maximum au lieu de 6.

Les analyses graphiques issue de la figure 57 et statistique de ce test montre que le modèle n'est pas sensible à la valeur haute de la capacité maximale d'irrigation.

2.5.4. Les facteurs liés au milieu

2.5.4.1. Aucun aléa sur les cultures maraîchères

Dans le scénario de référence, chaque année est soumise à un aléa sur la production maraîchère (lié au sirocco, à une maladie, une mauvaise qualité des semences, un marché défavorable...), représenté par un coefficient affecté à la production variant de 1 à 0,1 selon une probabilité décroissante. La méconnaissance de ce type d'aléa a conduit à tester son existence plutôt que différentes valeurs ou modes de variations. Dans ce scénario, la production maraîchère d'été n'est soumise à aucun aléa (ignorant la distribution de ce paramètre, ce test est effectué hors de son domaine vraisemblable de variation).

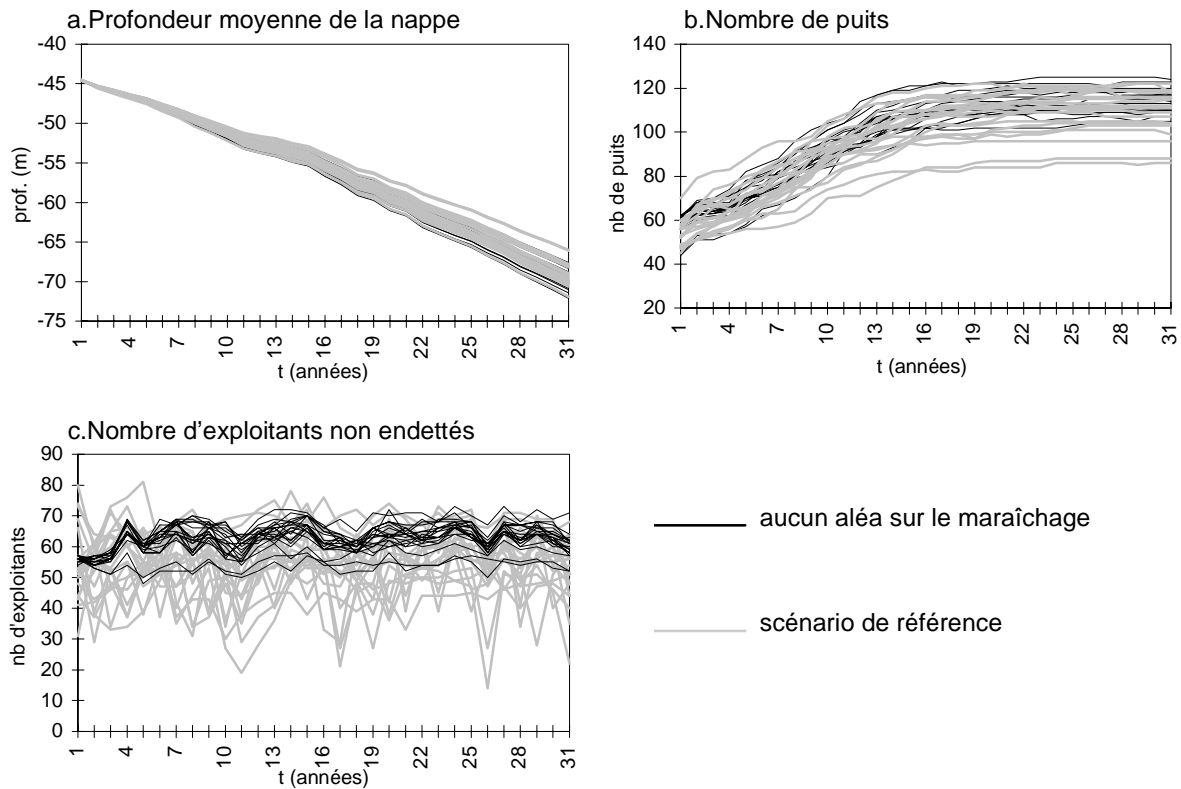


Fig. 58 : Sensibilité à l'aléa sur les cultures maraîchères. Le test porte sur un aléa nul.

L'analyse graphique de la figure 58, confirmée par le test de Wilcoxon-Mann Whitney, conduit à conclure que l'impact de l'aléa sur les productions maraîchères, sur la dynamique d'abaissement et sur l'apparition des puits n'est pas significatif. Par contre l'évolution du nombre d'exploitants non endettés est sensiblement différente (à 0,2%). En outre, l'allure de la courbe d'évolution de cet indicateur est affectée par le scénario testé : en absence de variabilité non maîtrisée de la production ou de sa commercialisation, l'évolution du nombre d'exploitants non endettés est moins chaotique que dans la situation de référence. Ceci permet de répondre au moins en partie à la question posée au § sur les facteurs expliquant les oscillations de cet indicateur social dans le scénario de référence, affecté par un certain aléa sur la production maraîchère : une mauvaise récolte ou des faibles gains sur la vente entraînant rapidement une trésorerie déficitaire.

2.5.4.2. Une nappe moins réactive

Comme on l'a vu en deuxième partie, les diverses études sur la nappe donnent des données différentes dans une certaine plage de variation, en termes de paramètres hydrogéologiques. La transmissivité et la porosité constituant des paramètres dépendants pour chaque zone de la nappe et relativement à l'autre zone, leur choix a été effectué sur la base d'une comparaison entre bilan volumétrique et déstockage annuel (cf. deuxième partie).

Dans ce test, la zone 1 est caractérisée par une transmissivité moyenne $T_1=15.10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et une porosité moyenne $s_1=20\%$ (au lieu de $T_1=10.10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et $s_1=15\%$) et la zone 2 par $T_2=10.10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et $s_2=8\%$ (au lieu de $T_2=5.10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et $s_2=10\%$).

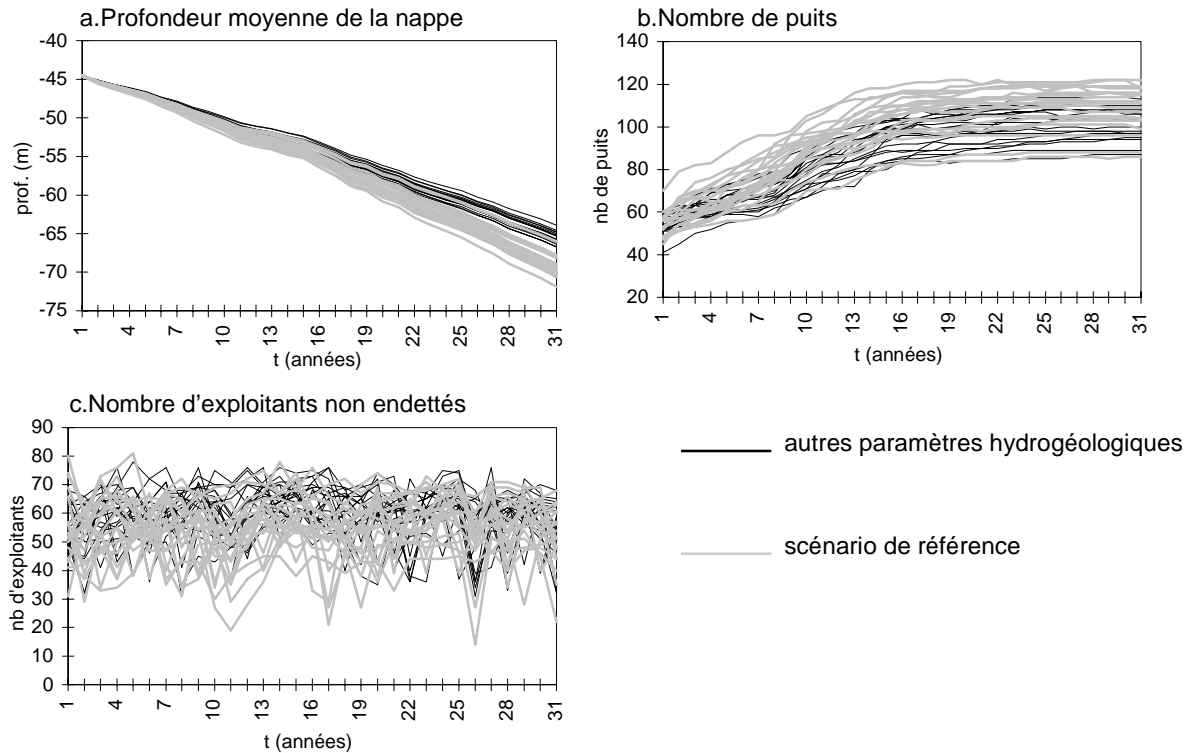


Fig. 59 : Sensibilité à un autre jeu de paramètres hydrogéologiques

D'après la figure 59, l'impact de ce changement sur la profondeur de la nappe est significatif, comme le confirme le test statistique, à 0,2 %. Par contre, il ne l'est pas pour les 2 autres indicateurs. En effet, la nappe étant plus transmissive, l'aquifère contenant plus d'eau, elle est globalement moins sensible aux mêmes volumes prélevés.

2.5.4.3. Des apports plus forts à la nappe

Les apports à la nappe sont susceptibles de varier surtout au niveau de la première zone. Dans le scénario de référence, ils sont fixés à 5 millions de mètres cube au niveau de la zone 1, ce qui peut être considéré comme une valeur minimale. L'apport testé est ici de 7 millions de mètres cube par an, ce qui peut être considéré comme une valeur maximale en dehors des années exceptionnellement humides et des lâchers de barrage.

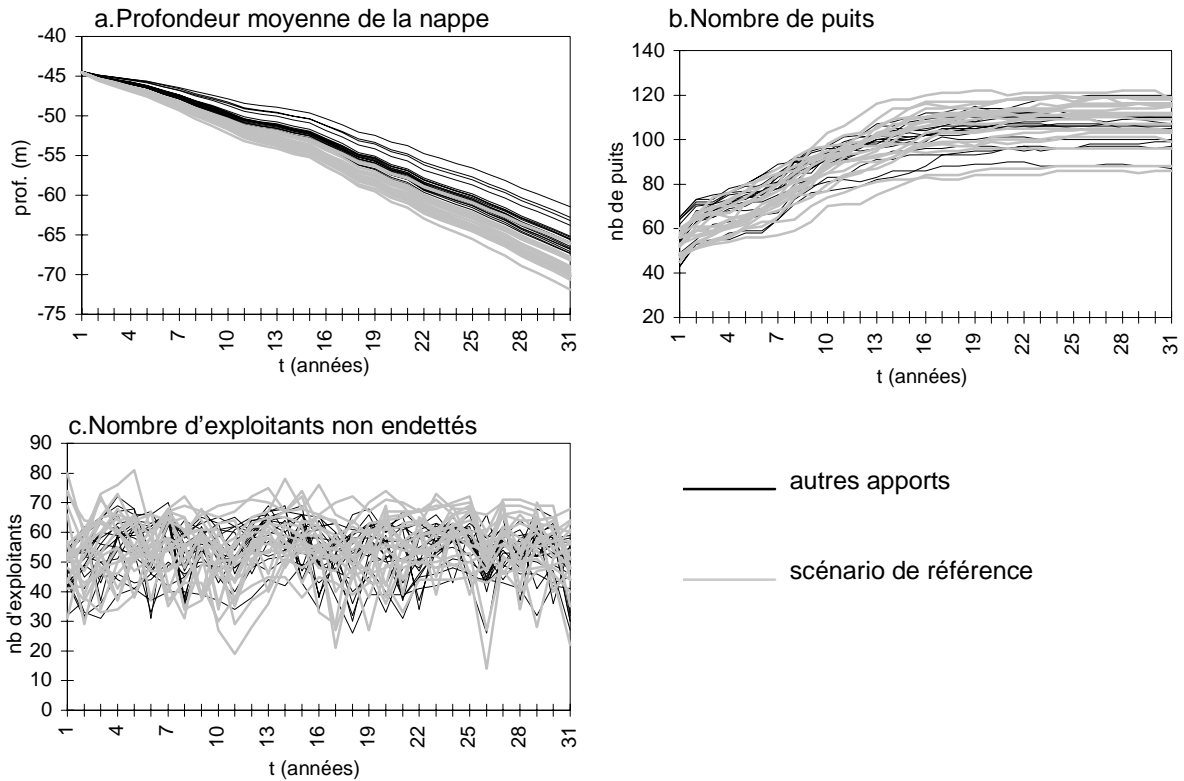


Fig. 60 : Sensibilité aux apports à la nappe. Les apports moyens à la nappe sont portés à 8 au lieu de 6 millions de mètres cube par an.

D'après la figure 60, le nombre de puits et le taux d'exploitants non endettés ne sont pas sensibles à la variable apport, comme le confirme le test statistique. Par contre, l'abaissement de la nappe réagit de manière significative à la modification (à 0,2 %), ce qui signifie que ce paramètre doit être mieux connu.

2.5.4.4. Un climat uniformément moyen, sec ou humide

La série temporelle des 20 dernières années climatiques simulée dans le scénario de référence du modèle est remplacée ici par un climat uniforme correspondant à l'année pluviométrique moyenne (1994) : le test porte sur l'impact de la variabilité climatique sur le modèle.

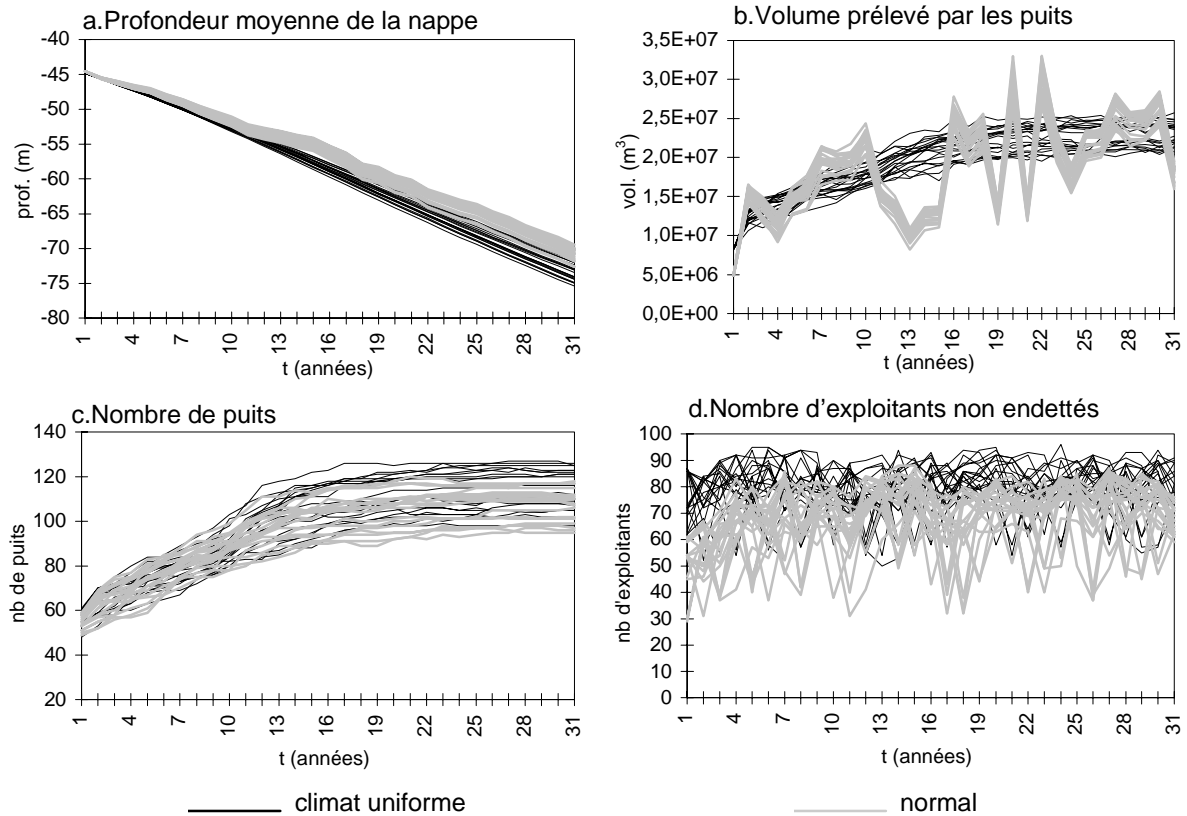


Fig. 61 : Sensibilité au climat. La série temporelle des 20 dernières années climatiques est remplacée par un climat uniforme moyen, répété chaque année.

Comme le montre la figure 61, le volume prélevé par les puits (b) (et celui prélevé par les PPI, non figuré ici) est sensible à la variation climatique : l'allure quasi linéaire obtenue dans ce scénario confirme l'hypothèse attribuant l'origine des oscillations de cet indicateur aux variations climatiques. Ceci est en accord avec le rôle tampon à accorder à la nappe dans un modèle de gestion de nappe, en climat semi-aride. Le test statistique confirme également l'effet significatif de cette expérience sur la profondeur de la nappe (a), sur le nombre de puits (c) et sur le nombre d'exploitants non endettés (d) Menons le même type d'expérience en testant cette fois l'effet d'un climat constamment sec, pour répondre à des préoccupations à l'ordre du jour, dans un contexte d'interrogation sur les changements climatiques. Le scénario climatique testé ici obligerait les agriculteurs à multiplier leurs apports en eau par 1,5 en moyenne, pour satisfaire les besoins en eau des plantes.

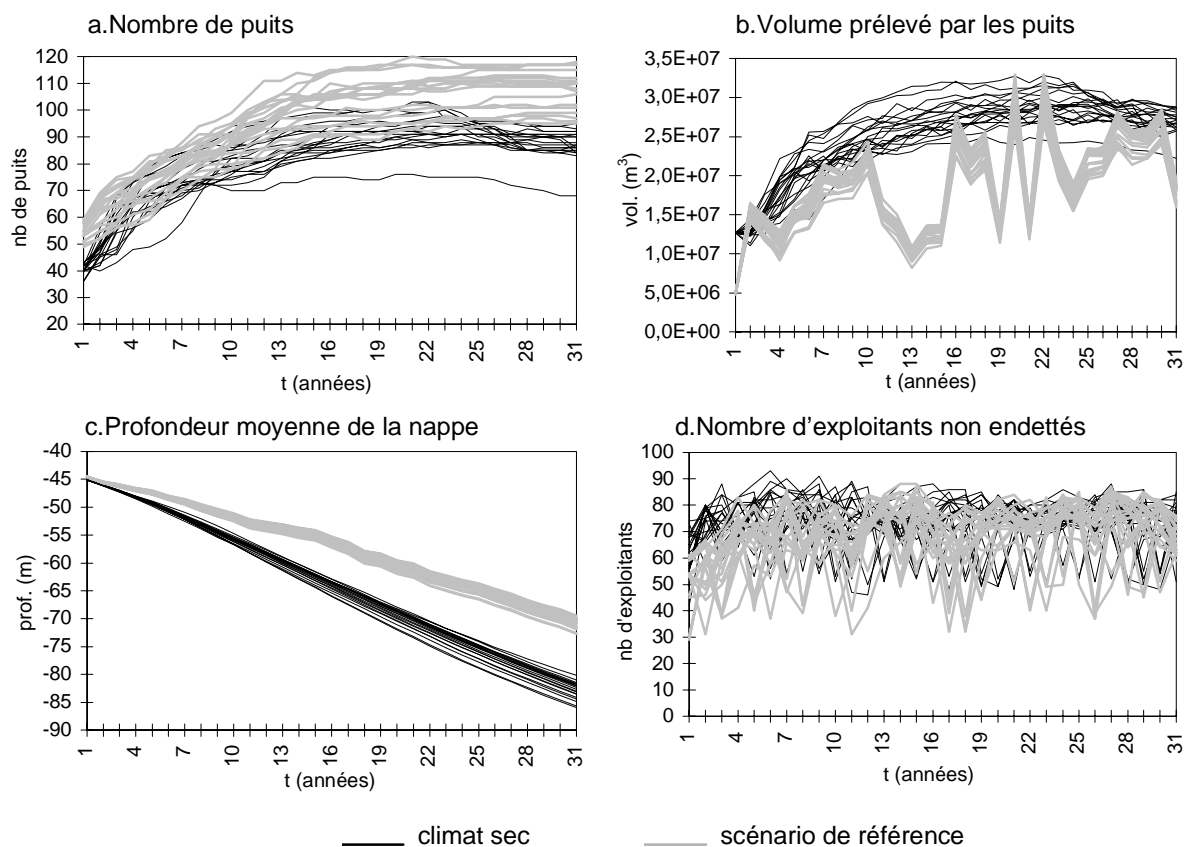


Fig. 62 : Simulation d'un climat constamment sec. Les exploitants sont contraints de multiplier les apports en eau par 1,5 pour satisfaire les besoins en eau des cultures.

Comme le montre la figure 62, le scénario climatique induit logiquement une augmentation des prélèvements, qui conduit à une forte accélération de la baisse de la nappe, à l'origine d'un nombre de puits construits moins important que dans le scénario de référence (du fait de leur coût plus élevé), et à une vague d'abandons précoces, le seuil technique de profondeur étant atteint plus tôt. Par ailleurs, l'impact de ce climat sec sur le nombre d'exploitants non endettés, significatif, est faible mais va dans le sens d'une *augmentation*, alors qu'on se serait attendu à la situation contraire. Ce résultat pour le moins inattendu est-il attribuable au fait que moins d'exploitants se lancent dans la construction d'un puits du fait du coût prohibitif de l'investissement, lié à la profondeur de la nappe, et donc contractent moins d'emprunts à long terme ? En effet, l'analyse du nombre d'exploitants endettés à long terme (sans tenir compte du caractère déficitaire ou excédentaire de la trésorerie), montre que le nombre d'exploitants ayant une épargne positive est supérieur dans le cas de ce scénario, par rapport au scénario de référence. Il se peut aussi que l'indicateur socio-économique choisi soit sensible au nombre d'exploitants qui ont un puits, qui affecte l'effectif des exploitants pratiquant le maraîchage d'été. Ceux-ci étant moins nombreux dans le scénario sec, la population est globalement moins sensible à l'aléa sur ce type de culture, et contracte moins d'emprunts de campagne.

Ces interrogations conduisent à **considérer ces résultats avec prudence**, mettant l'accent sur **d'éventuels changements stratégiques induits par ce type de scénario, non prévus par le modèle**. Par exemple, en climat continûment sec, il se peut que les agriculteurs aient plus tendance à prendre des risques pour construction un puits, face au risque climatique. D'autre part, la marge brute espérée sur laquelle reposent les stratégies d'irrigation devrait tenir compte du changement climatique, alors qu'elle est actuellement calculée sur la base d'un climat moyen. Il se peut également que dans un contexte de climat sec, le prix des cultures évolue. Enfin, si la représentation actuelle des apports en terme de moyenne est acceptable compte tenu du climat variable, elle devrait être revue à la hausse ou à la baisse dans le contexte des changements climatiques simulés.

L'expérimentation d'un scénario contraire, où le climat est constamment favorable (les agriculteurs peuvent se contenter d'apporter environ un tiers des apports moyens pour satisfaire les besoins en eau des plantes), vient compléter cette étude de l'effet climatique, et permet en outre de répondre à une hypothèse concernant le dynamisme trop fort du marché foncier :

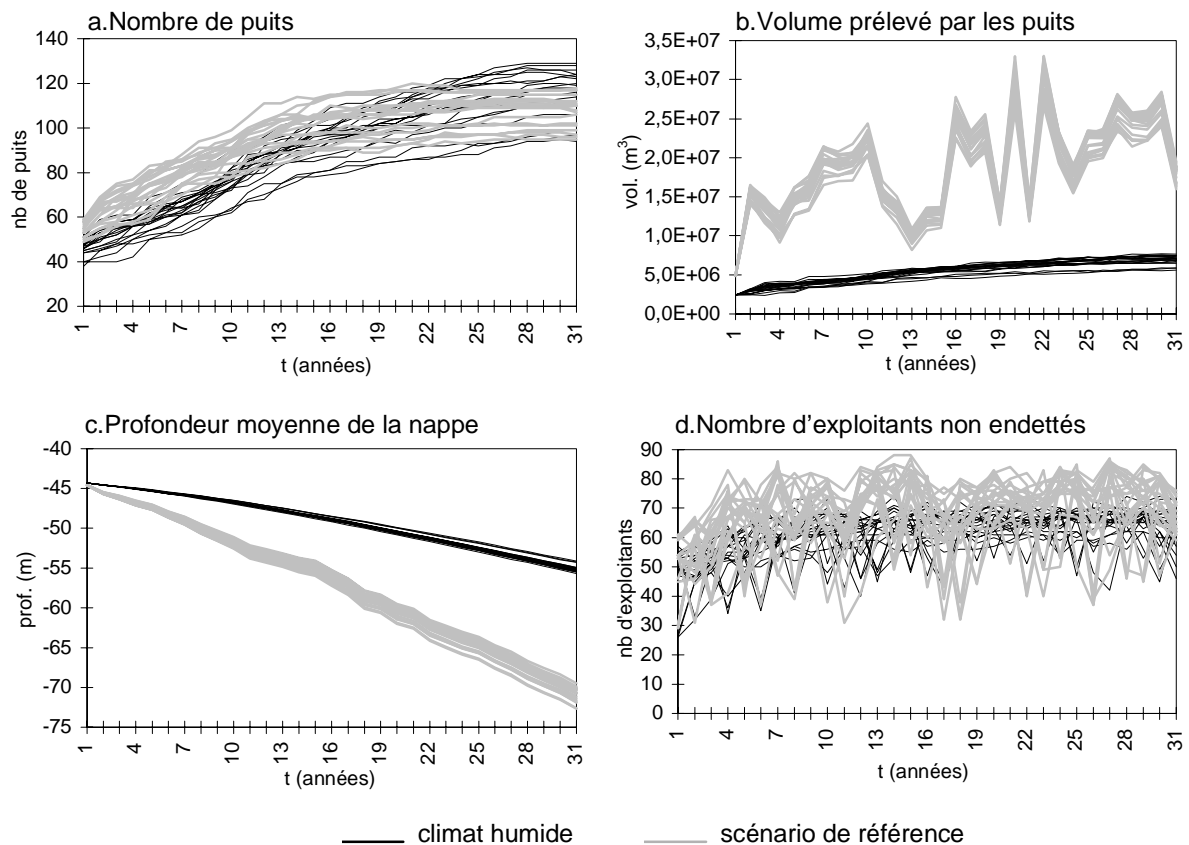


Fig. 63 : Simulation d'un climat constamment humide. Le scénario expérimenté et le scénario de référence sont simulés 20 fois à partir d'états initiaux différents.

D'après la figure 63, le modèle réagit comme prévu à cette expérience : les prélèvements sont linéaires et très faibles. Le nombre de puits est significativement supérieur au scénario

de référence. La nappe s'abaisse beaucoup moins vite. Par contre, le nombre d'exploitants non endettés n'est pas significativement différent du scénario de référence. De même, la dynamique du marché foncier demeure inchangée, ce qui permet de confirmer le fait que *dans le modèle*, celle-ci n'est pas due à un appauvrissement conséquent à la baisse de la nappe, mais bien aux conditions intrinsèques des exploitations, définies à l'initialisation. Certaines exploitations sont dès le départ dans une situation défavorable et les comportements modélisés ne leur permettent pas de s'y adapter, si bien qu'ils se trouvent contraints à force d'endettement de céder leurs parcelles à la vente. Un retour sur le terrain permettrait d'étudier plus particulièrement le comportement des exploitations peu favorisées, pour repérer d'éventuelles méthodes d'adaptation qui auraient échappé aux enquêtes réalisées jusque là.

2.5.5. Conclusions sur l'analyse partielle de sensibilité

L'analyse de sensibilité a permis d'identifier les paramètres les plus importants par rapport à l'évolution de la nappe et du nombre d'exploitants non endettés. Parmi les facteurs économiques étudiés, il s'agit de l'accès aux crédits à long terme, de la manière dont les exploitants gèrent leur revenu, de l'aversion au risque et de l'aléa sur la valorisation de l'épargne. Parmi les facteurs sociaux, il s'agit en premier lieu de l'imitation, du marché foncier, puis de la construction en association. Sur le plan technique, il s'agit de l'efficacité de distribution de l'eau et de la profondeur limite de construction des puits. Enfin, parmi les facteurs liés au milieu, la transmissivité et la porosité de la nappe, les apports qu'elle reçoit annuellement, les aléas sur le maraîchage et le climat ont été identifiés comme importants. Certains paramètres peuvent être en partie maîtrisés : c'est le cas du seuil de profondeur¹², de l'efficacité de distribution, de l'accès au crédit¹³, des apports à la nappe ...

Les interprétations des scénarios d'intervention simulés par la suite devront tenir compte de ces variables sensibles : par exemple une faible réaction de la nappe peut amortir les efforts consentis sur la demande, ou une faible aversion au risque, étouffer les efforts consentis sur la demande, un changement climatique peut également réduire les gains potentiels sur la ressource permis par la gestion de la demande... De plus, certains de ces paramètres, comme l'aversion au risque, considérés comme fixes dans le modèle ne sont-ils pas être évolutifs dans la réalité ? En effet, un exploitant qui a vécu un échec ne devient-il pas plus

¹² D'une certaine manière, ce paramètre est déjà l'objet d'une tentative de contrôle puisque les puits ne sont pas censés dépasser les 50 mètres de profondeur...

¹³ dans la mesure où cet accès est totalement contrôlé par l'Etat, ce qui n'est pas le cas comme on l'a vu auparavant.

averse un risque ? Les paramètres sensibles du modèle pourraient faire l'objet d'études approfondies, afin de mieux connaître la dynamique du système.

Les hypothèses du modèle influencent cette analyse partielle de sensibilité. On a supposé que la diversité des pratiques et des modes de conduite et de gestion des exploitations était peu influente sur la demande en eau par exploitation du fait de l'homogénéité de la zone agraire, des habitudes, de l'imitation et que la demande en eau dépendait finalement beaucoup plus de la taille et de la composition de la sole irriguée. On voit que cette hypothèse attribue une part importante de la demande en eau au climat, ce qui n'eût pas forcément été le cas sous d'autres hypothèses (par exemple, une forte inertie des pratiques d'irrigation et un mauvais suivi de l'état hydrique peut conduire les agriculteurs à apporter plus d'eau que nécessaire en climat humide et moins que nécessaire en climat sec).

Par ailleurs, l'incidence d'autres paramètres pourrait être testée dans un second temps, comme le taux d'intérêt des emprunts et des "placements" (sous forme de bétail), les prix et rendements des cultures ainsi que les prix et doses des intrants, les prix des parcelles, la forme du parcellaire¹⁴... Les valeurs non testées des paramètres clefs analysés dans ce chapitre pourraient également faire l'objet de scénarios orientés. Par exemple, un accroissement des dépenses courantes avec le revenu, symbolisant une pression sociale forte pour des dépenses hors exploitation, et plus d'investissements dans l'exploitation, permettrait d'étudier la question de l'accumulation excessive de l'épargne. D'autre part, il serait intéressant d'étudier l'effet d'un progrès technologique chez les constructeurs de puits, confrontés à une demande de construction de puits de plus en plus profonds, en testant un fort approfondissement du seuil technique.

2.6. Le modèle est-il "accrédité" ?

Les différentes expériences présentées dans ce chapitre conduisent-elles finalement à accréditer le modèle, et donc à interpréter avec confiance les résultats des simulations d'intervention menées par la suite ?

Le modèle paraît globalement fidèle au système réel :

- les tendances globales émergent des processus locaux simulés correspondent bien aux dynamiques actuellement observées sur le terrain, du moins en ce qui concerne l'abaissement de la nappe et l'apparition des puits ;
- les ordres de grandeur des paramètres intermédiaires testés sont réalistes ;

¹⁴ toutes les expériences ont été menées ici sur le même parcellaire, constitué automatiquement à partir d'un ensemble de contraintes sur la taille et la dispersion des parcelles ; la sensibilité du système à la forme du parcellaire pourrait constituer un test important ultérieurement.

- les résultats issus de simulations répétées à partir d'états initiaux différents ou identiques varient peu, malgré la variabilité des dynamiques issues du modèle, et notamment les effets d'amplification provenant du caractère probabiliste de la création de puits dans des conditions risquées ;
- le modèle réagit comme prévu sur le long terme, ainsi qu'à plusieurs situations extrêmes ;
- quelques expériences de traçage indiquent que les trajectoires individuelles ne sont pas aberrantes.

Par ailleurs, les explorations menées grâce aux simulations ont permis de mieux comprendre certains liens (par exemple la principale cause du ralentissement du nombre de puits, ou le lien entre volume prélevé en PPI et puits, entre apparition des puits et niveau d'endettement), et d'aller plus loin dans la définition des variables moteurs (rôle des revenus extérieurs, des aléas, de l'efficience..).

Cependant, ces expériences ont également révélé plusieurs limites à l'utilisation de la version actuelle du modèle :

- le modèle est sensible à plusieurs paramètres totalement inconnus, comme les aléas sur la valorisation de l'épargne et sur le maraîchage ;
- les processus d'accumulation de l'épargne et d'endettement des exploitants sont peu réalistes.

Ce dernier point est à l'origine d'un marché foncier excessivement dynamique dans le modèle, comme on l'a vu. En effet, un nombre important d'agents exploitants sont contraints de vendre toutes leurs parcelles (les parcelles étant vendues une par une du fait d'un très fort endettement à long terme), au bout du 5^{ème} pas de temps environs, pour atteindre 50% de la population en moyenne dans ce cas, après 20 pas de temps. Ce dynamisme du marché foncier n'est pas conforme aux observations actuelles : la vente et l'achat de parcelles jouent un rôle tampon dans le modèle, révélateur des mouvements excessifs de l'épargne, lesquels s'expliquent par le peu de données disponibles sur les modes de gestion de l'épargne et de la trésorerie, et les incertitudes sur certains facteurs impliqués dans les calculs économiques, comme les rendements et le niveau des charges. Cette limite sera rediscutée plus tard.

Les résultats des scénarios d'intervention simulés par la suite devront être interprétés avec prudence : s'ils provoquent des questions sur des impacts inattendus des interventions simulées, ils peuvent difficilement constituer la base de réflexions sur la gestion du système

réel, du moins tant que les variables sensibles ne sont pas mieux connues, et la représentation des comportements, entérinée ou remise en cause *via* une restitution aux acteurs impliqués. De plus, l'étude d'autres indicateurs par la suite permettrait de compléter quelque peu le travail de vérification mené jusqu'ici.

3. Des interventions en laboratoire virtuel

3.1. Choix de quatre scénarios d'intervention

Par rapport aux phases successives de déséquilibres entre offre et demande en eau, inhérentes à tout processus de développement (cf. introduction, § 1.3), on peut faire l'hypothèse que le système étudié traverse actuellement une période de surexploitation. La société n'est pas prête à assumer un changement économique radical, car elle n'en voit pas l'intérêt pour son compte, l'abaissement actuel de la nappe n'ayant pas d'impact trop important sur ses conditions de vie. L'exploitation des ressources en eau pour l'irrigation se poursuit, jusqu'à ce qu'une nouvelle solution émerge ou qu'une crise advienne. Mais comme on l'a vu au début de cette partie (§ 1), le système ne tend pas vers une autorégulation qui serait induite par une restriction spontanée des prélèvements aux usages les plus valorisants : d'une part, ce phénomène de restriction n'a pas lieu, d'autre part, même réduits aux prélèvements pour l'eau potable, le bilan entre ressource et usages demeure déficitaire. L'abaissement de la nappe est au contraire amené à se poursuivre longtemps au même rythme. Il est donc nécessaire d'intervenir en vue de limiter la dynamique actuelle, compte tenu d'un risque de dégradation irréversible du système, en vertu du principe de précaution.

Mais peut-on pour autant espérer une inversion de la tendance, c'est à dire une recharge progressive de la nappe restaurant les anciens niveaux d'accès ? Le système étudié connaît un très fort déséquilibre entre les prélèvements et les apports, comme on l'a montré en deuxième partie. Les interventions sur la demande ne permettront pas de rétablir un équilibre, à moins d'une baisse radicale des prélèvements. Sans réduction drastique des usages agricoles de l'eau, les interventions ne pourront que ralentir une dégradation inéluctable. Mais une réduction drastique dès le court terme de l'irrigation risque d'être socialement inacceptable, une mesure impopulaire ayant tôt fait d'être détournée ou de sonner lieu à une crise institutionnelle et politique.

Dans ce contexte, une intervention sur la demande sera donc considérée "efficace" dans l'analyse menée ci-après aux deux conditions contradictoires suivantes :

- **si elle induit une diminution significative du rabattement** dans le but de retarder l'avènement d'une dégradation irréversible¹⁵ (dont le mécanisme doit impérativement être étudié et compris), qui devrait donner lieu à des mesures plus radicales. Le scénario d'intervention testé ne doit pas se contenter de donner des résultats significativement différents du scénario de référence, encore faut-il que cet écart soit important ;
- **tout en étant acceptable sur le plan social** (le nombre d'exploitants non endettés étant supposé indiquer l'acceptabilité sociale d'une mesure). A l'inverse du point précédent, l'écart entre scénario testé et scénario de référence doit être modéré, même s'il est significatif.

Les critères d'efficacité définis ici peuvent ne pas correspondre à ceux des décideurs dans la réalité. En effet la notion d'efficacité d'une intervention **implique ici une part de jugement subjectif** puisqu'elle demande un effort de pondération de l'importance des différents impacts de la mesure, qui correspond dans la réalité au choix du gestionnaire, voire à un choix politique (notamment celui d'un développement durable faible, fort, ou d'un développement viable, comme on l'a vu en première partie). En outre, cette notion d'efficacité dépend aussi du **scénario de référence** et d'autres alternatives non connues dans cette étude. Lorsque deux scénarios ont des impacts significativement différents sur un indicateur, le rapport R_{my} des moyennes des valeurs que prend cet indicateur au 30^{ème} pas de temps, respectivement pour le scénario testé et pour le scénario de référence, fournit un ordre de grandeur de cette différence.

D'un point de vue opératoire, la formalisation d'un scénario d'intervention passe par une modification des variables concernées, en prenant garde à ajuster les comportements des agents s'ils deviennent incohérents dans le contexte expérimenté¹⁶.

La recherche bibliographique présentée en première partie répertorie plusieurs types d'outils de gestion de la demande en tenant compte de leurs conditions d'efficacité et du contexte institutionnel de leur mise en œuvre. Sur cette base, et compte tenu des spécificités du terrain étudié (perception de l'eau, réticence à vendre l'eau, absence d'appropriation commune, taille de la nappe...), quatre modes de gestion de la demande reposant chaque

¹⁵ A moins de procéder à des injections de gros volumes d'eau douce...

¹⁶ Ces modifications sont directement apportées au code "en dur", la version actuelle du modèle ne présentant pas d'interface spécifique qui mettrait plusieurs choix à disposition de l'utilisateur.

fois sur un type d'outil différent¹⁷ ont été simulés, sans que les comportements stratégiques des exploitants soient remis en cause, sauf lorsqu'ils sont contradictoires avec les conséquences de l'intervention¹⁸ (d'autres scénarios pourraient au contraire porter sur une modification des règles de comportement, allant par exemple dans le sens d'une gestion collective impliquant d'autres formes d'interactions entre les agents) :

- **un scénario de type économique teste l'effet de l'instauration d'un prix unique de l'eau** au mètre cube consommé, en PPI et à partir des puits ;
- **un scénario de type technique teste l'effet d'une introduction généralisée de la micro-irrigation** ;
- **un deuxième scénario de type économique teste la mise en place d'un droit d'eau payant** au niveau des puits et des PPI ;
- **enfin un scénario de type réglementaire teste l'effet de la mise en place d'un quota volumétrique** destiné à l'irrigation, assorti de prix prohibitifs sur les dépassements (il s'agit donc de l'application simultanée de deux outils complémentaires : quota et tarification).

Ces quatre types d'intervention correspondent à des questions d'actualité dans le contexte étudié. Par la suite, les scénarios ultérieurs devraient être élaborés en concertation avec les décideurs du système, c'est-à-dire les directions techniques concernées du Ministère de l'Agriculture et les institutions locales de gestion comme le CRDA, le gouvernorat, la délégation...

Les deux premiers scénarios sont déjà évoqués et même amorcés par les autorités. Les troisième et quatrième scénarios sont retrouvés dans des propositions émanant d'études sur le secteur de l'eau. Par exemple, Bechtel International et Scet-Tunisie (1999) conseillent de fixer un volume annuel à extraire ; mais celui-ci est attribué à un nombre de bénéficiaires fixé, ne permettant pas la prise en compte de nouveaux irriguants. Il est conseillé par ailleurs de procéder à l'octroi de droits d'usages négociables, à un prix de cession permettant de couvrir les frais de mobilisation de l'autorité de l'eau.

Les interventions 1, 3 et 4 impliquent de pouvoir mesurer le volume consommé par chaque irriguant, ce qui peut être envisagé grâce à l'électrification systématique des puits, projet à l'ordre du jour dans les discussions des gestionnaires. De cette manière, le fournisseur

¹⁷ Le modèle pourrait également permettre de tester une combinaison de ces outils, et la mise en place de quotas ou de droits d'eau échangeables, ce qui impliquerait de définir les règles d'échange et de faire des hypothèses quant aux changements de règles d'action des exploitants. Il serait intéressant par la suite de s'intéresser à ce type d'intervention, actuellement débattu.

¹⁸ Par exemple, les exploitants cessent de cultiver leur parcelle en céréales irriguées s'ils risquent de devoir payer l'irrigation de complément à un prix très fort ; dans ce cas la procédure n'est modifiée que sur ce point précis.

d'électricité aurait accès à la consommation d'énergie des pompes à partir de laquelle une estimation du débit, intégrée sur le temps permettrait de déduire approximativement le volume consommé. Evidemment les exploitants réticents à ce genre d'intervention peuvent imaginer toutes sortes de subterfuges pour y échapper : blocage du compteur, installation cachée d'une pompe au gasoil... L'objet de cette étude n'est pas de discuter l'applicabilité et les conditions de mise en œuvre de cette mesure mais de réfléchir *a priori* à son efficacité, dans une configuration donnée du système. La formalisation de chacun des scénarios, basée sur les considérations développées en première partie, est décrite ci-après avant d'analyser les sorties de 20 simulations répétées à partir d'un même état initial, en comparaison à un scénario de référence également simulé 20 fois à partir de cet état initial.

3.2. Formalisation et résultats de simulation des scénarios d'intervention

3.2.1. Scénario 1 : plusieurs tarifications de l'eau

Un prix de l'eau unique au mètre cube est instauré sur toute la zone, dans les PPI et au niveau des puits. La formalisation de ce scénario repose sur les choix suivants :

- **les coûts d'équipement et de maintenance demeurent inchangés**, bien que le passage à un équipement électrique induise dans la réalité quelques changements, estimés ici équivalents aux incertitudes sur le coût d'exhaure de l'eau ;
- **l'olivier n'est plus irrigué** : en moyenne la marge brute de l'olivier en sec est de 93 DT/ha alors qu'elle devient négative en irrigué dès que le prix de l'eau est supérieur à 0,08 DT/m³. La production et les charges par hectare planté sont donc réduites par rapport au scénario de référence, et les rendements sont soumis à une variabilité liée au climat ;
- malgré cette hausse du prix de l'eau, **la composition de la sole irriguée demeure identique**, hormis les modifications signalées plus haut sur l'olivier. En effet, la valorisation marginale de l'eau est toujours très forte sur les cultures irriguées, en dehors de l'olivier¹⁹. Certaines dégagent une faible marge, mais sont faiblement consommatrices, comme les céréales cultivées "en sec" avec une irrigation de complément, qui demeurent rentables même lorsque le prix de l'eau est très fort et le climat, défavorable. D'autres sont fortement consommatrices mais aussi très rémunératrices (maraîchage d'été, arboriculture fruitière). Dans le cas d'une très

¹⁹ Cependant, les différents rapports potentiels entre volume global d'irrigation et rendement de l'olivier, compte tenu de doses-fréquences adaptées, pourrait conduire à moduler la valorisation marginale de l'eau et par conséquent, les stratégies d'irrigation de l'olivier.

forte augmentation du prix, une trop forte baisse du revenu ou de la marge brute espérée finit néanmoins par inciter l'exploitant à ne plus cultiver que des céréales (en irrigation de complément, en cas de pluviométrie insuffisante).

3.2.1.1. Un prix de l'eau doublé par rapport au prix moyen actuellement payé en PPI

Dans ce scénario, le prix de l'eau est fixé à $0,12 \text{ DT/m}^3$, soit le double du prix payé en PPI en 1997.

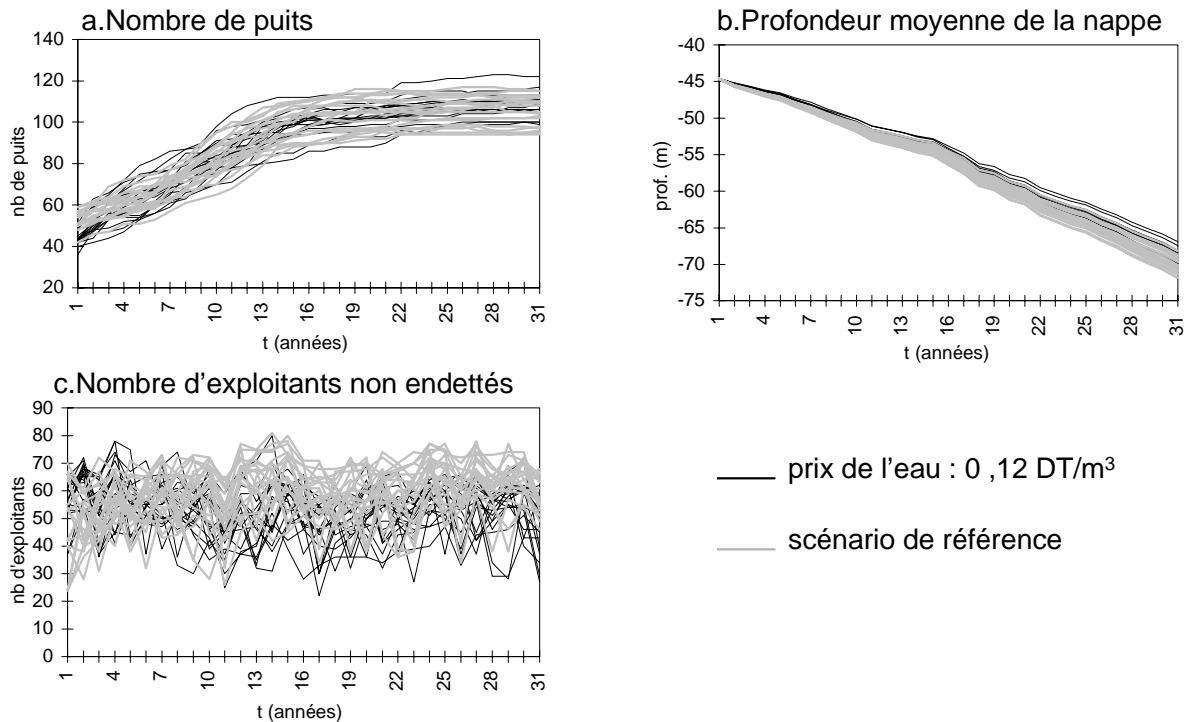


Fig. 64 : Tarification de l'eau à $0,12 \text{ DT/m}^3$ au niveau des puits et des PPI.

Si l'acceptabilité sociale de cette mesure est favorable d'après l'indicateur choisi, ni son impact sur le nombre de puits, ni celui sur l'abaissement de la nappe ne sont significatifs, comme le laissait penser l'analyse graphique de la figure 64. Ces résultats conduisent à tester un prix de l'eau plus fort.

3.2.1.2. Un prix de l'eau quintuplé par rapport le prix actuellement payé en PPI

Simulons la mise en place d'un tarif équivalent à cinq fois le prix actuellement payé en PPI.

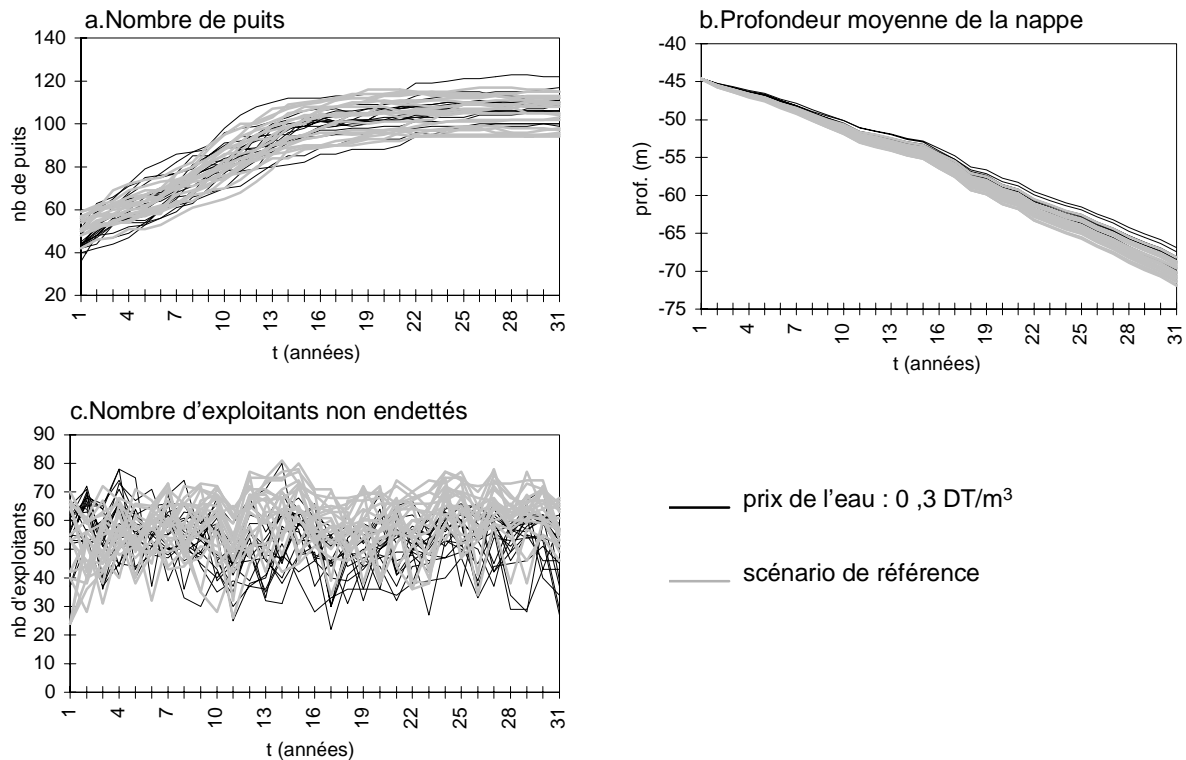


Fig. 65 : Tarification de l'eau à 0,3 DT/m³ au niveau des puits et des PPI.

Cette fois, contrairement à ce que pourrait laisser penser la figure 65, tous les indicateurs sont touchés de manière significative par l'intervention. Cependant l'impact de cette intervention sur la profondeur de la nappe demeure faible ($R_{my} = 0,94$), tandis que l'indicateur socio-économique est plus touché ($R_{my} = 0,38$).

Voyons donc si un prix de l'eau plus fort encore agit peut ralentir l'abaissement de la nappe.

3.2.1.3. Un prix de l'eau équivalent à environ sept fois le prix actuellement payé en PPI

L'instauration d'un prix de l'eau équivalent à sept fois le tarif actuellement payé en PPI est finalement testé, afin de voir dans quelle mesure ce tarif excessif permet de ralentir la surexploitation.

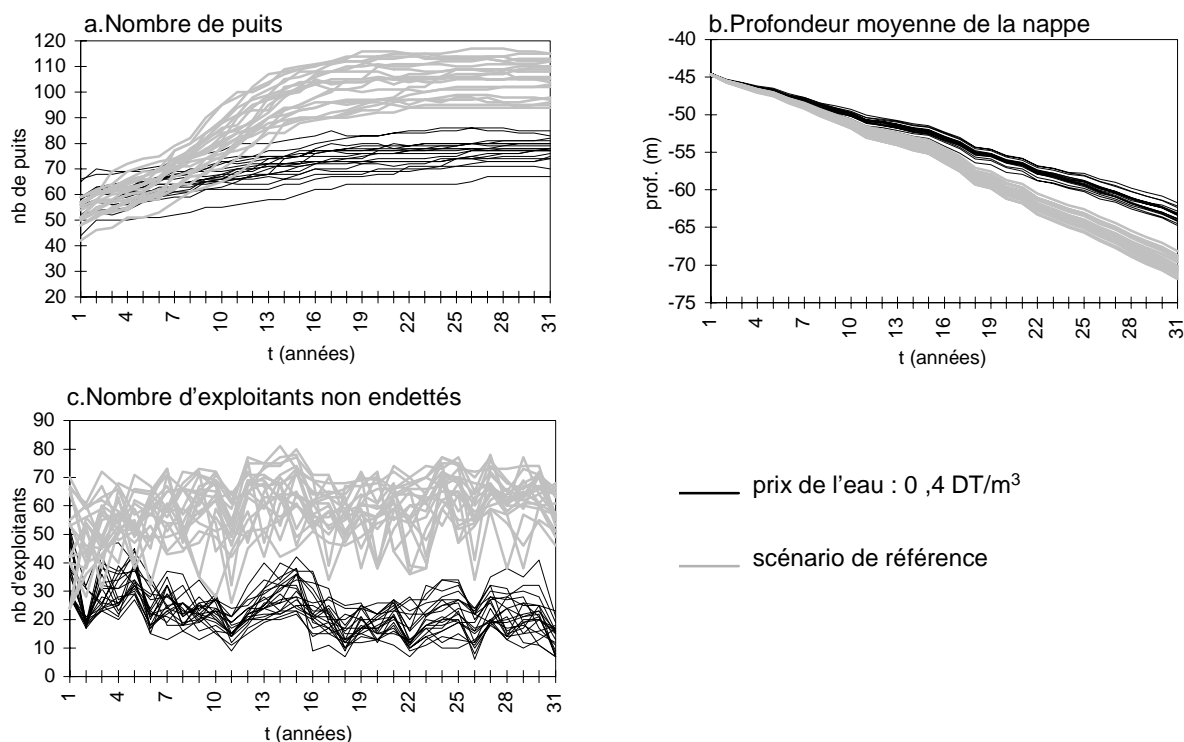


Fig. 66 : Tarification de l'eau à 0,4 DT/m³ au niveau des puits et des PPI.

D'après la figure 66, cette intervention a cette fois un impact important sur la profondeur de la nappe ($R_{my} = 0,9$). Cependant son efficacité est faible d'après les critères retenus, du fait de son impact important sur le nombre d'exploitants endettés ($R_{my} = 0,24$).

3.2.1.4. Conclusion sur la simulation d'une tarification

Une étude de traçage des simulations permet de constater que les prélèvements par puits sont sensibles à cet outil de gestion, du fait de l'arrêt de l'irrigation des oliviers. De fait, la baisse des prélèvements n'est pas attribuable à l'impact des tarifs introduits sur les marges brutes, dont les valeurs espérées demeurent positives : la marge brute à l'hectare d'une parcelle type passe de 1700 et 1052 DT respectivement en été et en hiver, pour un tarif de 0,12 DT/m³, à 114 et 600 DT pour les mêmes saisons, lorsque le tarif est de 0,4 DT/m³.

En conclusion, outre les questions posées par les scénarios de tarification en terme d'acceptation sociale, compte tenu de la perception qu'ont les usagers de l'eau, ces interventions ne sont pas très efficaces au sens des critères retenus, dans le contexte du modèle. Ceci est peu surprenant étant donnée la faible élasticité de la demande dans le Kairouanais, notamment sur les puits.

3.2.2.Scénario 2 : la généralisation de l'irrigation au goutte à goutte selon deux hypothèses

3.2.2.1. Premier jeu d'hypothèses : impact sur l'efficience

Dans ce scénario, tous les agriculteurs doivent s'équiper du goutte à goutte proportionnellement à la surface qu'ils irriguent en été, moyennant une aide publique importante. Pour simplifier, on suppose que toutes les parcelles sont équipées, y compris les plus petites, avec un coût de l'équipement proportionnel à la surface irrigable (sans tenir compte du seuil inférieur lié à la station de filtration, qui n'est rentable en réalité qu'à partir d'une certaine surface). Cet équipement n'est utilisé que pour l'irrigation du maraîchage d'été et de l'arboriculture fruitière, l'irrigation de l'olivier, des céréales et du maraîchage d'hiver de plein champ demeure traditionnelle (à la planche et à la raie). Le coût de l'équipement est répercuté sur l'épargne au premier pas de temps, grevé d'une subvention publique moyenne de 50% (en réalité les subventions varient entre 40 et 60% selon les caractéristiques des exploitations) et payable en une fois : comme pour l'investissement dans un puits, l'amortissement de cet équipement n'est pas répercuté sur le prix de l'eau. Dans le système réel, les agriculteurs ont droit à un crédit, réparti sur 7 ans, à raison d'un taux d'intérêt de 9%. Les connaissances acquises sur le terrain conduisent à supposer que le recours à ce type de crédit est faible : les exploitants cherchent à éviter un endettement et surtout des intérêts à payer, et lui préfèrent donc le crédit familial ou fournisseur. Sur le plan de la formalisation, cela se traduit, par simplification, à un déboursement immédiatement répercuté sur l'épargne, donnant lieu en cas d'endettement à un remboursement au taux d'intérêt du bétail. Le coût de l'investissement est estimé (hors subvention) à environ 1500 DT/ha²⁰ (dans un premier temps) et la durée de vie de l'équipement, à 15 ans au mieux (Tchamba, 2000), durée au terme de laquelle l'investissement est obligatoirement renouvelé (sans subvention cette fois). L'investissement dans un équipement goutte à goutte est réalisé chaque fois qu'un nouveau puits est créé, sauf lorsqu'il est construit sur une parcelle en PPI, auquel cas il bénéficie de l'équipement dont est déjà munie la parcelle (éventuellement complété, à hauteur de la différence entre portée d'irrigation du puits et taille de la parcelle en PPI). Le prix de construction d'un puits est donc augmenté de la valeur de l'investissement à réaliser, compte tenu de l'aide publique. Par simplification, l'équipement en goutte à goutte est supposé attaché à la parcelle et la "suit" lors des transactions foncières, ce qui se traduit par une modification du prix de la parcelle, augmenté du coût de l'équipement (hors subventions), déprécié en fonction de son âge. En

²⁰ 1100 DT/ha en moyenne pour les portes rampes et rampes, 160 DT par m³ de filtration/h pour la station de filtration. Cependant, une station de filtration n'est pas forcément utile pour une eau d'origine souterraine.

pratique, les puits sont dotés d'un nouvel attribut, "compteurPuits", qui permet de comptabiliser l'âge de l'équipement d'irrigation, afin de le déprécier en cas de vente de la parcelle, et de le renouveler au bout de 15 ans. Enfin, l'efficacité moyenne de la distribution de l'eau au goutte à goutte est estimée à 90% (en gravitaire elle est fixée à 70% en moyenne), ce qui se traduit par :

- **la modification de l'efficacité de la distribution en été** (seul le maraîchage d'été étant irrigué au goutte à goutte dans ce scénario) dans les parcelles en PPI et munies d'un puits (au niveau des PPI, l'efficacité de la distribution du forage à la plante incombant surtout aux canaux de distribution, celle-ci est peu perturbée par le changement²¹ technique) ;
- **l'augmentation de la capacité d'irrigation des puits en été** à hauteur de la consommation d'eau économisée par hectare (compte tenu de la conversion du volume gagné en surface, des pertes de charges, des pointes d'irrigation...).

D'autre part, les besoins en main d'œuvre sont sensiblement modifiés : la gestion de l'irrigation ne demande plus qu'une dizaine de jours de travail par hectare (temps d'installation des goutteurs et vérification de leur bon fonctionnement en cours de campagne), ce qui se répercute sur les charges du maraîchage d'été et de l'arboriculture fruitière, ainsi que sur les gains permis par le travail familial ; par contre les temps de semis et de récolte sont supposés inchangés. Enfin, le matériel d'irrigation donne lieu à un entretien annuel (nettoyages anti-dépôts...), dont le coût est estimé à 30 DT/ha/an (Tchamba, 2000). Hormis ces modifications, les règles d'action des exploitants demeurent inchangées.

²¹ on suppose que l'efficacité moyenne de distribution augmente de 10% en moyenne.

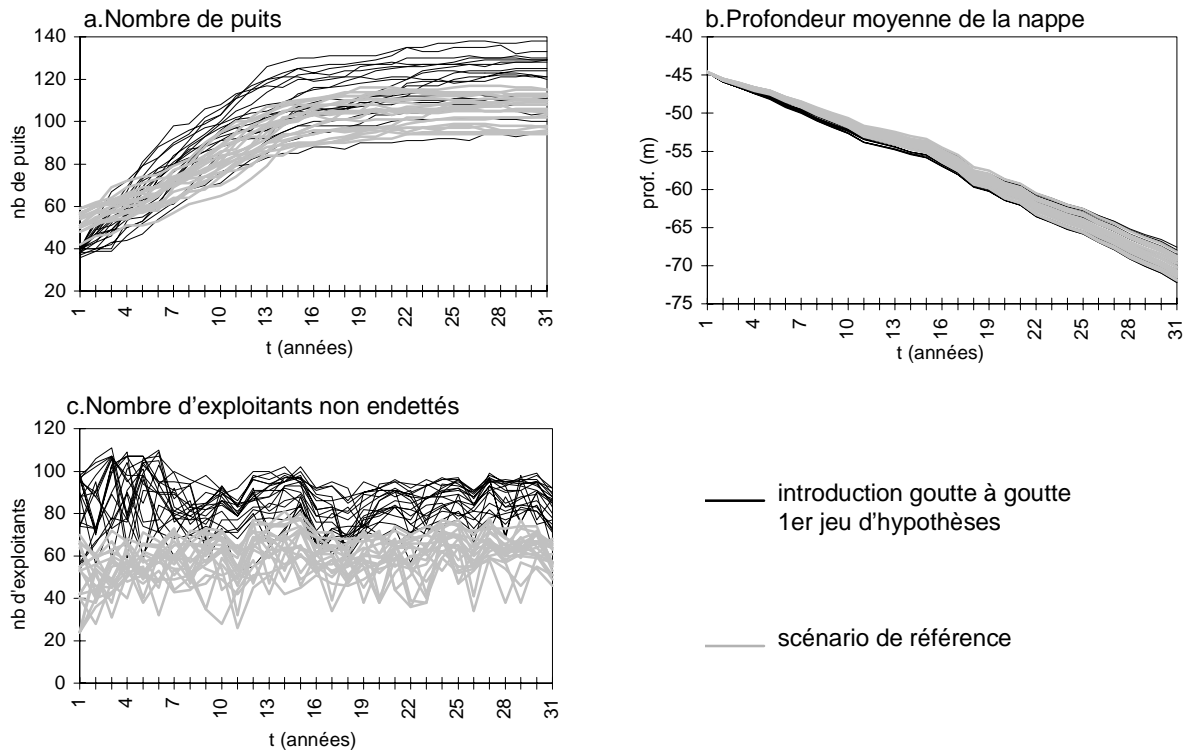


Fig. 67 : Introduction généralisée du goutte à goutte pour l'irrigation : 1^{er} jeu d'hypothèses.

Le prix de l'investissement dans le matériel d'irrigation ne freine pas la construction de nouveaux puits, au contraire, comme le montre la figure 67 : les échantillons des 2 scénarios sont significativement différents au seuil de 0,2 %, et le graphe (a) montre que le nombre de puits est plus élevé dans le scénario d'intervention (ce qui peut s'expliquer par le fait que les marges brutes du maraîchage d'été, plus fortes, améliorent les conditions socio-économiques des exploitants). Par contre l'impact de cette mesure d'intervention sur la profondeur de la nappe est nul : le test statistique confirme que les échantillons issus des 2 scénarios ne sont pas significativement différents au 30^{ème} pas de temps. Ceci s'explique par le fait que le gain en efficacité au niveau des puits est compensé par l'augmentation de la capacité d'irrigation, et par celle du nombre de puits.

En conclusion cette intervention, telle que formalisée ci-dessus dans SINUSE, n'a pas les effets escomptés : les gains réalisés en termes d'efficacité de distribution sont compensés par une meilleure rentabilité des cultures et par un accroissement de la portée d'irrigation des puits, donc des surfaces irriguées. Cependant l'utilisation de valeurs respectivement plus basses et plus hautes pour l'efficacité moyenne actuelle et l'efficacité moyenne permise par la micro-irrigation entraînerait probablement des résultats plus marqués.

3.2.2.2. Deuxième jeu d'hypothèses : impact sur le rendement

Supposons maintenant que l'introduction généralisée du goutte à goutte dans la plaine de Kairouan conduise à une situation similaire à celle observée récemment au Cap Bon (côte Est de la Tunisie)²² :

- **les agriculteurs ont tendance à surirriguer en goutte à goutte, ce qui compenserait les gains réalisés en terme d'efficience sur le volume consommé ;**
- **le coût de l'équipement est plutôt de 2500 DT/ha**, subventionnée à hauteur de 60%, et nécessite une maintenance annuelle chiffrée à 125 DT/ha ;
- **le goutte à goutte est également pratiqué sur la fève**, ce qui en terme de formalisation conduit à modifier les caractéristiques de la culture maraîchère d'hiver. Seule la culture du blé menée en intercalaire bénéficie à l'olivier, qui doit être irrigué à part entière lorsque les cultures intercalaires sont alimentées au goutte à goutte, ou alors être mené en sec ;
- **l'impact sur le rendement est très important du fait d'une meilleure gestion de la fertilisation**²³.

²² J.-P. Luc, com. pers. 10/01/01.

²³ Cette augmentation des rendements est traduite ici par des rendements se rapprochant des rendements optimaux donnés par les normes de l'OTD, (1995) : pour la fève 10 t/ha (au lieu de 5), pour le piment d'arrière saison 20 t/ha (au lieu de 12), 25 t/ha pour la tomate au lieu de 20, pour la pastèque 30 t/ha au lieu de 20, pour le melon 20 t/ha au lieu de 15, pour le piment de saison 20 t/ha au lieu de 10.

Hormis ces modifications, la formalisation de ce scénario suit les mêmes règles que précédemment. Le scénario simulé devient très différent du précédent, comme le montre la figure 68 :

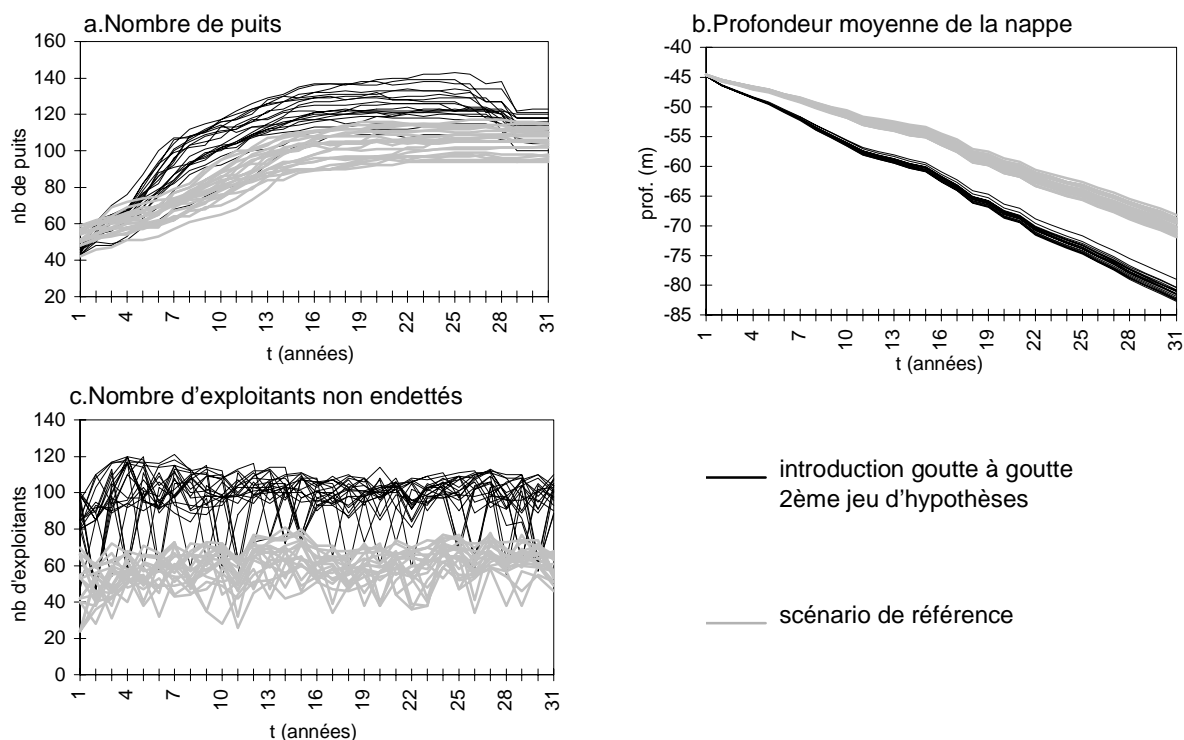


Fig.68 : Introduction généralisée du goutte à goutte pour l'irrigation : 2^{ème} jeu d'hypothèses.

Cette fois, l'introduction généralisée du goutte à goutte, telle que formalisée ici, entraîne une accélération de la dynamique actuelle d'abaissement (fig. 68), à l'opposé de l'objectif fixé. En effet, malgré des coûts d'investissement et de maintenance plus élevés que dans les hypothèses précédentes, les cultures sont beaucoup plus rentables, ce qui se traduit par une augmentation des surfaces irriguées (qui conduit même peut-être à un dépassement des capacités réelles des PPI en terme de débit), et par un enrichissement des exploitants, répercuté sur le nombre de puits (lequel amorce une diminution en fin de simulation, du fait des seuils techniques de construction et d'approfondissements, atteints dans certaines zones suite à l'abaissement accru de la nappe). La variabilité apparemment plus forte du nombre d'exploitants non endettés, et en particulier les "creux" irréguliers que rencontrent les courbes de chaque scénario, sont imputables aux aléas sur le maraîchage : le nombre d'exploitants qui pratiquent du maraîchage d'été étant plus élevé, ils sont plus nombreux à être sensibles aux aléas sur les cultures maraîchères. Par contre, on suppose ici que l'augmentation des quantités produites au niveau de la zone est absorbée par le marché local et la demande touristique, et a donc peu d'influence sur le prix des denrées.

En conclusion, dans le contexte du modèle SINUSE, compte tenu de deux hypothèses très différentes de réaction à l'introduction du goutte à goutte, cette intervention ne conduit pas à

un ralentissement de l'abaissement de la nappe, et est même susceptible de produire l'effet inverse.

3.2.3. Scénario 3 : un droit d'accès à l'eau payant

Cette mesure est censée conduire à une augmentation de la durée moyenne d'accumulation de l'épargne, et donc ralentir le rythme d'apparition des puits en augmentant leur coût, *via* un droit d'accès à l'eau payant. Chaque puits et chaque parcelle en PPI donne lieu au paiement d'un droit forfaitaire à durée indéterminée au moment de l'institution de cette règle, puis lors de chaque nouvelle construction de puits. Le droit d'eau est lié à la terre, et donc inclus dans les transactions foncières.

Dans le scénario de référence, la durée moyenne d'accumulation de l'épargne pour la construction d'un puits est de six ans²⁴ (50% des exploitants qui construisent un puits attendent au moins sept ans avant de pouvoir investir et la durée d'accumulation va jusqu'à 25 ans). Dans ce scénario, le gestionnaire, visant à doubler cette durée d'accumulation, double le prix moyen de construction des puits en fixant la valeur du droit d'eau au prix moyen actuel de construction d'un puits, soit 13 000 DT (ce lien linéaire entre prix du droit d'eau et durée d'accumulation néglige les effets des interactions locales, des aléas et des processus cumulatifs induits par la dynamique du système).

Par simplification, aucune règle d'action relative à l'achat du droit d'eau au premier pas de temps n'a été introduite : tous les agriculteurs achètent autant de droits qu'ils disposent d'accès à l'eau en propriété (puits ou parcelle en PPI), quelles que soient leurs caractéristiques socio-économiques. Les résultats de cette mesure sont indiqués par la figure 69.

²⁴ Cette estimation provient de la moyenne des moyennes effectuées sur 20 simulations, à partir d'état initiaux différents.

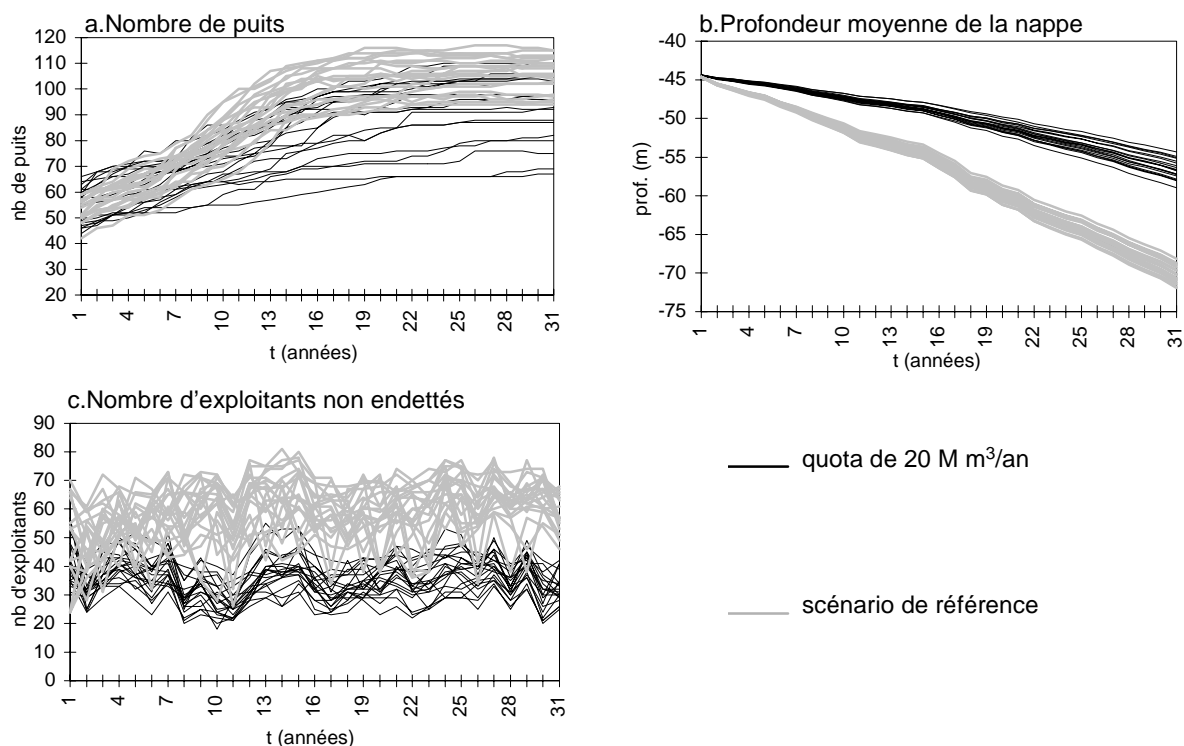


Fig. 69 : Instauration d'un droit d'eau payant équivalent au prix moyen de construction d'un puits.

Le test statistique confirme le caractère significatif de cette mesure sur la dynamique d'apparition des puits et l'abaissement de la nappe, supposés d'après la figure 69. Du fait des interactions locales et des aléas, le temps d'accumulation pour l'investissement dans un puits n'est toutefois pas doublé, même si le prix d'accès a été doublé en moyenne : les exploitants attendent 9 ans en moyenne avant de pouvoir construire un puits du fait de l'augmentation du coût des puits, et les trois quart des exploitants attendent 12 ans au lieu de 8 (le temps d'accumulation est donc multiplié par 1,5). Les prélèvements en PPI sont significativement différents du scénario de référence (au seuil de 0,2 %), ce qui peut s'expliquer comme on l'a déjà vu plusieurs fois auparavant par le nombre de puits plus faible. Le nombre d'exploitants non endettés est également significativement différent (au seuil de 0,2 %), tout en étant peu éloigné du scénario de référence.

Cependant tout en étant significatif, l'impact de cette intervention sur la dynamique d'abaissement de la nappe est peu important, et plusieurs limites se dégagent de ce scénario :

- si le critère d'acceptation sociale choisi pour évaluer les scénarios d'intervention (le nombre d'exploitants non endettés) paraît favorable dans ce cas, il est fort possible que le montant élevé du droit d'eau induise des refus ou des contournements ;

- le scénario modélisé paraît inéquitable, les parcelles en PPI étant soumises au même droit d'eau quelle que soit leur taille, et sans différenciation par rapport aux puits.

En conclusion, l'impact d'un droit de l'eau payant, tel que défini dans ce scénario, a un effet significatif mais peu important.

3.2.4. Scénario 4 : un quota d'accès à l'eau

Dans ce scénario, un volume d'eau annuel est alloué à l'irrigation, et redistribué chaque année aux irriguants (dont le nombre varie), en fonction de leur surface irrigable moyenne. Compte tenu du fait que les prélèvements en eau potable sont pratiquement égaux actuellement aux apports moyens, le volume à allouer à l'irrigation pour un rééquilibrage entre offre et demande devrait être nul, ce qui ne serait pas accepté socialement dans le contexte actuel. Comme il a déjà été évoqué au début de ce chapitre, cette intervention (comme les précédentes) vise seulement à ralentir la surexploitation, pour repousser l'échéance d'un problème irréversible, tout en tenant compte des besoins de l'agriculture.

Le volume alloué annuellement doit être réparti à égalité entre les saisons d'hiver et d'été (afin d'encourager les cultures d'hiver consommant moins, sans pour autant décourager la diversification). Face à ce volume saisonnier, l'exploitant est supposé réagir en définissant la surface à irriguer compte tenu du volume d'eau nécessaire par hectare²⁵ (sachant qu'un dépassement coûtera cher, comme expliqué par la suite), et ne plus irriguer ses oliviers du fait des risques de dépassement impliqués, comparé au faible gain obtenu.

Tous les points de prélèvements sont pris en compte dans la définition de l'allocation la première année d'application de cette règle : chaque parcelle en PPI et chaque puits est doté d'un quota proportionnel à sa surface irrigable (mais la surface irriguée des puits étant difficilement accessible, contrairement à celle des parcelles en PPI, le calcul de leur droit est basé sur la portée moyenne des puits en surface, soit 5 hectares). Par la suite les nouveaux puits sont soumis à la règle suivante :

- si le propriétaire du puits n'est pas déjà doté d'un autre puits, il bénéficie d'un droit d'accès pour son puits et sera donc inclus lors des réallocations suivantes ;
- par contre, s'il s'agit d'un n^{ème} puits, aucun droit n'est accordé : son propriétaire n'est pas en faute mais il devra payer l'eau à un prix fort, non prohibitif pour les

²⁵ L'estimation de la surface à irriguer pourrait reposer sur le volume maximal nécessaire par hectare (compte tenu de l'assolement et des variations climatiques), plutôt que sur le volume moyen, si l'agriculteur ne veut absolument pas dépasser le quota qui lui est alloué.

cultures valorisantes, fixé à $0,2 \text{ DT/m}^3$ (soit environ 5 fois le prix actuellement payé au niveau de certains puits). Ainsi, les exploitants susceptibles de valoriser l'eau par des productions à fortes marges brutes ne sont pas arrêtés par ce tarif et continuent de construire des puits et de produire des cultures en irrigué.

Pour les parcelles en PPI (systématiquement dotées d'un droit d'eau) et les puits munis d'un droit, le prix de l'eau est identique au scénario de référence dans les limites du quota alloué. Tout mètre cube consommé au-delà du quota est payé à un prix prohibitif (fixé dans un premier temps à 2 DT/m^3 , soit 10 fois le prix fort défini pour les puits sans droit). Ce scénario correspond bien à la mise en place de deux outils complémentaires : quota et tarification.

Lors d'une transaction foncière mettant en jeu une parcelle dotée d'un accès à l'eau, le droit et le quota attenants demeurent attachés à la terre, et changent donc de propriétaire. Pour simplifier, l'ensemble des règles d'action demeure identique, hormis les changements signalés. Cette hypothèse est discutable comme on le verra par la suite.

Le scénario de référence permet de situer la consommation du secteur irrigué dans le système étudié entre 10 et 30 millions de m^3 selon les années climatiques. En fixant le quota annuellement alloué à l'irrigation à 20 millions de m^3 , on s'attend donc *a priori* à un léger ralentissement de l'abaissement de la nappe (en partie dû au fait que les oliviers ne sont plus irrigués).

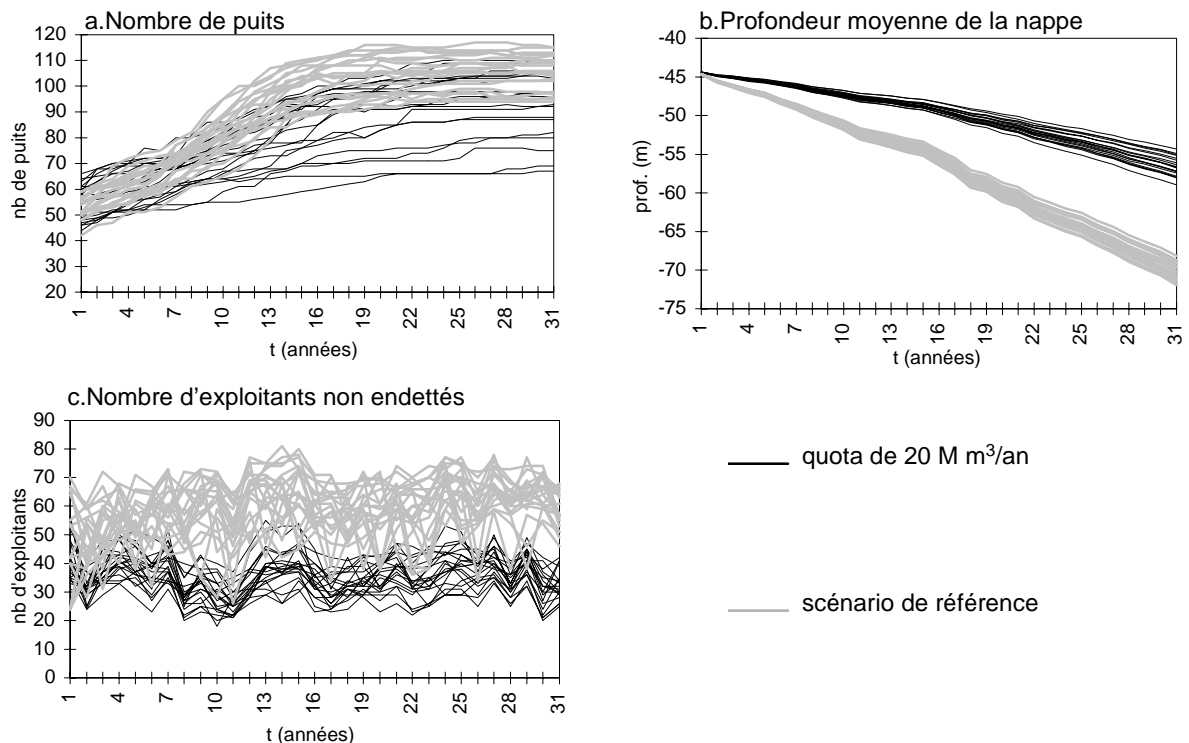


Fig. 70 : Instauration d'un quota annuel de 20 millions de mètres cube alloué à l'irrigation

Le scénario d'intervention donne des résultats significativement différents de ceux du scénario de référence (au seuil de 0,2% pour les indicateurs a, b et c). La figure 70 montre également que l'impact du quota sur la profondeur de la nappe ici est beaucoup plus fort que prévu ($R_{my} = 0,8$). Comment expliquer ces tendances ?

Le lien entre le quota alloué et cette consommation de référence n'est pas linéaire ; en effet, indépendamment de la restriction imposée sur le volume, la mise en œuvre du quota tel que décrit auparavant entraîne les conséquences suivantes :

- une répartition égale du volume alloué entre les saisons d'hiver et d'été alors que les besoins en eau plus forts en été et les stratégies actuelles d'assolement impliquent en temps normal des prélèvements inégaux entre les deux saisons (allant du simple au triple) ;
- une répartition égale entre les propriétaires de puits sur la base d'une surface irrigable théorique, alors qu'actuellement les prélèvements varient d'un puits à l'autre, du fait notamment de la surface disponible pour l'irrigation ;
- une dynamique d'apparition des puits très ralentie, seuls les premiers puits bénéficiant de droit, et les autres devant payer l'eau au prix fort, ce qui n'encourage pas le processus d'imitation en partie basé sur les revenus des propriétaires des puits voisins.

Ces conséquences suffisent pour restreindre les prélèvements, même lorsque le volume total annuellement attribué au secteur irrigué est proche du volume actuellement prélevé.

La baisse des prélèvements (non figurée ici) est à attribuer aux événements suivants :

- la surface irriguée planifiée chaque saison par les exploitants est diminuée à hauteur du quota volumétrique imparti, de manière à éviter un dépassement dommageable ;
- les oliviers et les céréales cultivées par défaut sur la parcelle n'étant plus irrigués, les prélèvements diminuent au niveau des puits et des PPI.

Si cette mesure, telle que formalisée ici, entraîne une augmentation du nombre d'exploitants endettés, la différence enregistrée par cet indicateur social est faible, dans l'absolu ($R_{my} = 0,56$) et en comparaison au ralentissement important de la baisse de la nappe. D'autre part, l'impact socio-économique mesuré par R_{my} est plus proche de 1 dans ce cas, que pour le scénario de tarification, mais moins que pour le scénario du droit d'accès (pour lequel $R_{my} = 0,83$).

Une étude portant sur le volume alloué, sur le prix de l'eau imposé pour les dépassements ou les non ayant-droit, et sur la répartition saisonnière du quota constituerait un

approfondissement intéressant de ce type de scénario. Elle serait également l'occasion de tester des changements de comportement pouvant être induits par ce type d'intervention : par exemple l'allocation d'un volume restrictif n'induit-elle pas une option préférentielle pour les cultures à faible consommation d'eau, telles que les céréales, modifiant de ce fait le calcul de la surface à irriguer pour rester dans les bornes du quota, et conduisant à des revenus plus intéressants? De plus le groupe des irriguants n'ayant pas intérêt à ce que de nouveaux puits se créent, il est possible qu'émergent de nouvelles stratégies visant à dissuader les non irriguants de se doter d'un puits...

Telle que définie par ce scénario, et dans le contexte du modèle SINUSE, l'instauration d'un quota constitue donc l'intervention la plus efficace des expériences menées.

Ces quelques expérimentations, menées dans le laboratoire virtuel que constitue le modèle SINUSE, ont éveillé des questions sur le modèle, sur les conditions d'efficacité des interventions testées et sur les vigilances à développer à propos d'effets inattendus de ces interventions dans le contexte étudié. La partie suivante fait le bilan de ces résultats, discute leurs intérêts et leurs limites, et les perspectives d'études à poursuivre à l'aide du modèle SINUSE.

4. L'intérêt de la méthode

Ce chapitre fait le point sur l'aboutissement du travail réalisé : dans quelle mesure est-on parvenu à définir les variables motrices du système et à élaborer un support de réflexion sur la gestion de la demande sur la nappe de Kairouan ?

4.1. Portée des résultats de simulation

4.1.1. Les grandes dynamiques du système modélisé

Les recherches de terrain ont conduit à supposer que l'abaissement de la nappe est principalement dû à l'apparition des puits. Par la suite, les expériences de simulation menées avec le modèle SINUSE ont fait ressortir les principaux mécanismes du système modélisé :

- les facteurs principalement à l'origine de l'apparition des puits sont le processus d'imitation et les conditions économiques des exploitants. L'aversion au risque des exploitants, l'abaissement de la nappe, et la saturation foncière jouent également sur l'apparition des puits ;

- dans un premier temps, l'abaissement de la nappe entraîne une augmentation significative des coûts de construction, susceptible d'induire un ralentissement de la dynamique d'apparition des puits. Hormis cet effet, les exploitants sont peu sensibles à l'abaissement de la nappe, tant que les seuils techniques de construction et d'approfondissement des puits n'ont pas été atteints. De fait, les cultures pratiquées sont soit très valorisantes, soit peu consommatrices, et la valorisation de l'eau compense largement le coût d'approfondissement d'un puits ;
- les différences notées dans les trajectoires des exploitants, malgré un objectif commun d'acquisition de l'irrigation des puits et le recours à des stratégies similaires, sont principalement dues à la combinaison, propre à chaque exploitant, des conditions parcellaires, économiques, familiales, et locales. Certaines combinaisons laissent plus de liberté que d'autres à la trajectoire²⁶ ;
- ces trajectoires, et les prélèvements en eau des puits, sont influencés par différentes interactions de voisinage. Elles le sont fortement par les processus d'imitation et de marché foncier, et dans une moindre mesure, par les possibilités d'association pour la construction de puits. En revanche, les échanges en faire-valoir indirect ne semblent pas jouer un rôle important dans la dynamique, contrairement aux hypothèses posées *a priori*²⁷ ;
- les prélèvements en PPI dépendent (i) du coût de l'eau²⁸, (ii) du climat. Le volume prélevé en PPI dépend aussi du nombre de puits présents sur les PPI, et hors des PPI, dès lors que leurs propriétaires sont également irriguants en PPI.

Les explorations par la simulation ont permis plus précisément de déterminer les variables auxquelles le modèle est sensible, et qui sont donc présumées importantes dans la dynamique du système réel. Il s'agit en particulier :

- **de variables économiques** comme la gestion de la trésorerie, le recours au crédit à long terme, l'aversion au risque, l'aléa sur la valorisation de l'épargne ;
- **de variables techniques** comme l'efficacité de distribution de l'eau, le seuil technique de profondeur pour la construction des puits ;

²⁶ Par exemple, un exploitant possédant une petite exploitation située en zone 1 (profonde, non colonisée par les puits), est "destiné" à s'appauvrir, et à vendre ses parcelles, tandis qu'une exploitation de taille moyenne située en zone 2 peut construire un puits, selon le voisinage.

²⁷ Ce résultat est à considérer avec prudence, dans la mesure où une distorsion des échanges fonciers a été révélée par un marché foncier excessivement dynamique...

²⁸ surtout dans un contexte où les oliviers ne sont plus conduits en irrigués dès que leur marge brute espérée devient négative.

- **de paramètres liés au milieu** comme les paramètres de la nappe, les apports à la nappe, les aléas sur le maraîchage, le climat.

Cette liste gagnerait à être complétée, seuls les paramètres supposés importants, ou méconnus, ayant été testés. L'analyse partielle de sensibilité a également posé la question de la distribution de certains paramètres, en toute rigueur variables d'un agent (ou d'un objet) à l'autre.

Enfin, en terme de prospective, la simulation du scénario de référence indique que la baisse de la nappe devrait se poursuivre dans les décennies à venir. Etonnement, la stabilisation du nombre de puits semble avoir peu d'impact sur le taux d'abaissement de la nappe dans un premier temps. Dans ce contexte, quelles interventions de gestion sont efficaces sur la demande en eau ?

4.1.2. Des interventions efficaces sur le système modélisé

Parmi les paramètres clefs du modèle, certains s'avèrent théoriquement contrôlables. C'est le cas :

- de l'efficience de la distribution, par un changement sur les pratiques et/ou des infrastructures ;
- du seuil technique de profondeur, par un règlement fixant ce seuil ou, à l'inverse, par des progrès techniques permettant de prolonger ce seuil ;
- du recours à l'emprunt, par la restriction ou au contraire la facilité des prêts, voire par des subventions ;
- des apports à la nappe par des lâchers de barrage ou au contraire un verrouillage.

Mais dans la réalité, ces paramètres sont difficiles à maîtriser dans le sens d'une limitation. En effet, il arrive souvent que les doses d'irrigation apportées dépassent les besoins théoriques, le règlement instauré sur le seuil de profondeur est contourné, il est commun de recourir à d'autres sources de crédit que les sources officielles, l'arrêt des subventions sur les puits n'a pas empêché leur progression, le barrage est peu maîtrisé...

Se pose alors la question des interventions susceptibles de limiter effectivement l'abaissement de la nappe de Kairouan, tout en permettant aux agriculteurs de poursuivre leur activité dans une certaine mesure, afin d'être acceptées par la population rurale. Jouant en partie sur les paramètres de contrôle qui viennent d'être évoqués, mais aussi sur d'autres rouages du système, plusieurs types d'outils de gestion sont mobilisables. Quels peuvent être leurs effets, compte tenu des interactions et du contexte spécifique du système ?

Un modèle, si respectueux soit-il de la complexité du système, peut difficilement répondre de manière définitive à cette question, du fait de l'implication de comportements humains dont la diversité est difficile à saisir et dont l'évolution est délicate à prévoir.

Le modèle multi-agents SINUSE permet néanmoins de s'interroger sur certains effets *a priori* inattendus, pouvant survenir dans le système réel. Contentons-nous pour le moment de faire le bilan des effets des interventions testées *dans le contexte du modèle* :

- la tarification doit être élevée pour avoir un effet significatif sur la nappe (supérieure aux seuils plafonds de valorisation de l'eau définis par Kefi (1999) à partir de l'étude de différents PPI de la zone), mais une telle augmentation aurait du même coup un impact grave sur l'endettement des exploitants ;
- dans une première configuration d'hypothèses, l'introduction généralisée du goutte à goutte a un impact à peine perceptible sur la nappe, tandis que dans un deuxième jeu d'hypothèses, il induit au contraire une accélération de la baisse du niveau de la nappe, du fait de résultats économiques plus avantageux ;
- l'instauration d'un droit d'eau présente la particularité de ralentir la baisse de la nappe, en faisant porter l'effort essentiellement sur la création des nouveaux puits, tout en étant présentée comme équitable, dans une certaine mesure. Tel que formalisé, ce droit d'accès est appliqué à tous les types d'accès à l'eau, mais sans tenir compte des volumes consommés ou des surfaces irrigables. Comparé au gain sur la ressource, son impact sur l'endettement des exploitants est moins élevé que dans le cas de la tarification ;
- enfin, la mise en place d'un quota présenterait le meilleur rapport coût social / avantage gagné sur la ressource.

Bien d'autres scénarios pourraient encore être testés, comme par exemple, dans l'immédiat, la combinaison du quota et de l'instauration du goutte à goutte. Mais tel quel, le modèle est-il suffisamment valide pour que ces résultats fassent l'objet de négociations entre décideurs sur la gestion du système réel ?

4.1.3. Discussion sur la validité du modèle

Les processus modélisés à l'échelle des agents et des objets conduisent bien au phénomène global d'abaissement de la nappe et d'apparition des puits observé dans la réalité, ce qui avalise déjà, d'une certaine manière, la représentation des processus en jeu. De plus, l'étude de la variabilité des dynamiques issues du modèle, les expériences menées indiquent que **le modèle est cohérent et que la variabilité des dynamiques obtenues en sortie est acceptable.** Les paramètres intermédiaires étudiés ont des ordres de grandeurs similaires aux observations de terrain.

Mais l'exploration du modèle par la simulation a également permis de repérer des phénomènes peu conformes à la réalité, et des variables auxquelles le modèle est sensible, qui mériteraient d'être mieux connues.

Les simulations à long terme ont ainsi révélé une stabilité à long terme du nombre moyen d'exploitants non endettés peu réaliste, contrastant avec une forte variabilité interannuelle, et ce malgré une baisse continue de la nappe, à la base de nombreux abandons de puits. Ce résultat pour le moins inattendu a été expliqué en partie par des études de traçage des individus, révélant des processus cumulatifs de l'épargne très importants. En conséquence, le marché foncier est excessivement dynamique, conduisant assez rapidement près des trois quart des agents exploitants à se retrouver sans terre au bout d'une vingtaine de pas de temps, contraints par leur endettement de vendre toutes leurs parcelles, l'autre partie de la population agricole connaissant au contraire une extension foncière peu réaliste. Cette distorsion de la réalité, provenant à la fois des processus cumulatifs de l'épargne et d'un trop fort endettement d'une partie de la population du fait de ses conditions peu favorables au départ, a conduit à remettre en cause en particulier :

- **la stratégie de gestion des revenus du ménage et de la trésorerie** : par exemple, la prise en compte de l'évolution des dépenses avec le revenu a-t-elle été bien représentée ? Les exploitants en déficit n'ont-ils pas recours en réalité à une diversification des revenus accrue par rapport à celle qui a été modélisée ? Le rôle de l'élevage a-t-il été correctement représenté ? En particulier, les hypothèses de valorisation de l'élevage ne sont-elles pas trop optimistes²⁹ et n'y a-t-il pas d'autres voies de diversification de l'épargne ?

²⁹ Dans le modèle, l'élevage est implicitement pris en compte, dans le calcul des intérêts, donc des charges sur le bétail, les éleveurs étant considérés en tant que main d'œuvre journalière rémunérée au même niveau que la main d'œuvre agricole.

- **les itinéraires techniques pris en compte pour le calcul des marges brutes** : en effet les niveaux de rendement des cultures irriguées basés sur le croisement de normes locales, d'enquêtes informelles et de discussions avec des techniciens, semblent surestimés par rapport aux données d'enquêtes collectées récemment par l'équipe MERGUSIE³⁰ ; il se peut également que les rendements et prix des cultures menées en sec aient été sous-estimés.
- **la gestion de l'exploitation familiale** : en cas de situation économique très défavorable, les acteurs n'ont-ils pas recours à une vie familiale en autarcie complète ? à la migration d'une partie de la famille ? à la solidarité familiale ? à un arrêt plus précoce ou plus progressif de l'irrigation ou à des stratégies d'assolement différentes ?

Ces résultats exagérés par rapport à la réalité pourraient être réajustés par un retour sur le terrain. Finalement, si l'indicateur "social" choisi pour suivre les sorties de simulation s'est révélé sensible aux différentes interventions, malgré les distorsions économiques décrites, c'est grâce au fait que les changements simulés affectent dès le départ les processus d'accumulation de l'épargne.

D'autres limites ont été soulevées au fur et à mesure de la description du modèle et des scénarios simulés.

Ainsi, la représentation du temps dans le modèle SINUSE peut être remise en cause. En effet, les comportements stratégiques des acteurs sont uniformément calés sur une horloge exogène correspondant aux jalons des saisons et du bilan annuel. Il eût été sans doute plus réaliste de doter chaque exploitant d'une horloge interne, liée aux caractéristiques de son exploitation et situant les moments clé de ses décisions par rapport au déroulement d'un temps exogène. Cette question revient également à s'interroger sur le faible degré d'autonomie des agents dans le modèle, leurs actes étant orchestrés par le contrôleur central. **Cependant, ces choix paraissent adaptés au type de processus étudiés, aux échelles saisonnières et annuelles** : il est logique que les exploitants revoient chaque saison leur stratégie d'assolement et d'irrigation, et finissent en fin d'année par faire le bilan de leur situation... On peut également critiquer le fait que les décisions des exploitants reposent sur des seuils identiques et rigides, et non sur une combinaison de valeurs dépendantes du contexte, comme cela a déjà été observé, notamment concernant les décisions stratégiques des individus (Sebillotte et Soler, 1998). De même, les apports en eau aux différentes cultures proviennent d'enquêtes réalisées auprès d'un petit nombre

³⁰ N. Faysse, comm. pers., juin 2000 : les enquêtes sur des Groupements d'Intérêts Collectifs donnent des rendements beaucoup plus faibles que les nôtres et très variables d'un individu à l'autre ; cependant elles ne concordent pas non plus avec nos propres données d'enquêtes sur le plan des consommations en eau...

d'exploitants, et sont extrapolés à l'ensemble des agents (les pratiques étant supposées homogènes) ; ces estimations pourraient donner lieu à une enquête plus approfondie. Par ailleurs, **la question du bouleversement possible des comportements dans différents contextes** mérite d'être creusée. De même, **l'évolution de facteurs tels que le marché, les progrès techniques, les objectifs politiques, pourraient s'avérer essentiels pour le devenir de la nappe, même si leur dynamique n'a pas été intégrée dans le modèle.** D'autre part, parmi les variables auxquelles le modèle est sensible, certaines sont totalement inconnues ; c'est le cas des aléas sur la valorisation de l'épargne. Enfin, des simplifications comme celles portant sur la stabilité des marchés des produits agricoles, ou sur l'homogénéité des PPI peuvent paraître abusives et pourraient donner lieu à des hypothèses alternatives.

De plus, la validation de la cohérence "extérieure" du modèle, qui porte sur l'adéquation des processus simulés aux processus réels, implique de pouvoir comparer les règles d'action simulées aux comportements des fellahs de la plaine de Kairouan. Cette confrontation à la réalité, qui n'a pas pu avoir lieu dans le cadre de ce travail, permettrait par exemple de comprendre l'origine des mécanismes d'accumulation excessifs signalés auparavant.

Pour l'instant, faute d'avoir pu procéder à cette validation sociale et à l'étude approfondie des paramètres importants du modèle, **le modèle SINUSE doit être utilisé avec prudence**, dans un objectif de meilleure compréhension et de réflexion sur le comportement du système, et non pour appuyer les débats sur les modes de gestion du système. *Et il y aura toujours lieu de s'interroger, même si le modèle est correctement "validé", sur les diverses stratégies d'adaptation que les agriculteurs pourraient développer dans différents contextes de gestion, ces "processus d'apprentissage" n'étant pas pris en compte dans le modèle.*

Son architecture transparente permet au modèle d'être facilement modifié, et ces changements pourraient provenir notamment de discussions avec les acteurs.

4.2. Les apports de l'approche SMA dans le cas étudié

L'objectif des simulations d'intervention effectuées n'était pas de fournir des résultats opérationnels, mais surtout de montrer l'intérêt de la méthode par rapport à la question étudiée.

4.2.1. Un autre regard sur le système

En premier lieu, l'approche systémique menée en vue de la construction du modèle multi-agents a poussé l'étude de terrain au décryptage des différentes composantes du système et de leurs relations. Cette approche a notamment suscité l'étude du comportement des

acteurs par rapport à la ressource, souvent réduite, dans les études classiques de gestion de nappe. Au-delà de la phase d'analyse du système, l'usage des SMA a ensuite permis d'intégrer ces différents éléments dans un même modèle, malgré les différents champs disciplinaires concernés, en respectant la complexité de leurs interactions. Par rapport aux caractéristiques spécifiques des nappes, les SMA ont permis de représenter l'hétérogénéité de la distribution spatiale et les interactions locales de nombreux éléments, comme la profondeur de la nappe, son fonctionnement, le parcellaire des exploitants, les caractéristiques des exploitations et leurs relations de voisinage.

En outre, **on a vu que les variables "sociales" que constituent l'imitation, le marché foncier, les constructions en association, et la distribution des revenus extérieurs, jouent un rôle significatif dans la dynamique du modèle.** Or ces variables n'auraient pas pu être représentées, du moins sur le plan local, pour le marché foncier et les revenus extérieurs, par un modèle classique couplant processus biophysique et modèles économiques fondés sur la maximisation d'une fonction d'utilité.

Le modèle SINUSE constitue un outil d'animation intéressant. En effet, les phénomènes peuvent être en partie visualisés sur une grille spatiale, et l'évolution temporelle des paramètres est accessible.

En ce sens, SINUSE peut prétendre constituer à terme le support d'une vision commune de la nappe, et rétroactivement, modifier le regard que les acteurs portent sur le système.

Le modèle SINUSE permet enfin de tester des mesures complémentaires de manière couplée, classiquement appréhendées de manière indépendante. Par exemple, la modernisation de l'irrigation peut être formalisée à la fois en termes d'impacts sur l'efficacité, sur la charge de travail, mais aussi en termes de comportement et d'impact sur l'étendue de la surface irriguée.

4.2.2. Quelques questions sur la gestion du système

Malgré les limites du modèle, les résultats des expérimentations menées en système virtuel pose par exemple les questions suivantes :

- selon l'intervention, l'effort d'économie de l'eau porte-t-il sur le même type d'irriguants ? La manière dont les processus sont représentés dans SINUSE conduit à penser que l'impact de la tarification porte d'abord sur les irriguants en PPI, tandis que l'impact du quota et du droit d'eau tel que formalisé porte d'abord sur les irriguants en puits ;
- un droit d'accès payant conduisant à doubler le prix de construction des puits n'entraîne pas nécessairement un ralentissement de l'apparition des nouveaux puits dans les mêmes proportions, compte tenu des interactions locales ;
- la dynamique d'apparition et d'abandon des puits peut-elle avoir un impact sur les prélèvements en PPI ?
- une économie *a priori* considérable sur la distribution de l'eau à la parcelle permise par la micro irrigation n'induit pas une baisse des prélèvements, si la diffusion de ces techniques n'est pas associée à une maîtrise de l'expansion des superficies irriguées et à un apprentissage des nouvelles techniques ;
- la mise en place d'un quota se répercute-t-elle de la même manière sur tous les usagers privés ? Induit-elle des changements de comportement en termes de stratégie d'assolement ?
- comment peut évoluer le comportement des usagers par rapport à la conduite de l'olivier, dans différents types de scénarios, et l'impact de la culture de l'olivier (étant donné ses besoins en eau) est-il important dans la dynamique du système ?

Ces questions montrent que le modèle peut déjà constituer un support susceptible d'enrichir les débats entre gestionnaires, acteurs et chercheurs, et de les aider à mieux percevoir les conséquences possibles de différentes interventions sur le système de Kairouan, compte tenu des précautions signalées auparavant.

Plus généralement, ce type de modèle devrait se révéler intéressant pour traiter la question de la gestion de la demande sur d'autres systèmes nappe usages dont les interactions sociales et locales sont fortes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté ici est dédié à l'étude de la gestion d'une nappe en accès libre. Un fort déséquilibre entre offre et demande est à l'origine d'une baisse continue du niveau de la nappe depuis une vingtaine d'années, qui pourrait à terme induire une dégradation irréversible de la nappe, la qualité de l'eau étant soumise à un risque de salinisation encore mal connu, lié au rabattement. La majorité des prélèvements est imputable aux irriguants sur puits privés, très peu connus, notamment sur le plan de leur évolution possible. Dans ce contexte, les autorités cherchent un moyen de limiter la dynamique actuelle de surexploitation. Dans un objectif d'aide à la gestion, ce travail s'appuie alors sur une double démarche : **sur le plan pratique, la recherche des variables du système à l'origine du rabattement de la nappe, et sur le plan méthodologique, l'élaboration d'un support formalisant les dynamiques en jeu, et susceptible d'enrichir les réflexions en cours sur les modes de gestion de la demande.** La connaissance acquise lors des phases exploratoires de la recherche de terrain a par ailleurs conduit à formuler l'hypothèse centrale de ce travail : **la dynamique globale du système** provient des **interactions locales** entre nappe et usagers, et au sein du groupe des exploitants. En d'autres termes, ni une représentation holiste des interactions entre nappe et usages, ni une représentation classique de la demande, négligeant les interactions locales, ne suffiraient à restituer la dynamique d'abaissement de la nappe.

La démarche et les principaux résultats

La démarche adoptée procède en trois étapes : acquisition des données sur le terrain, construction du modèle et exploration par la simulation.

Une approche globale du système nappe-usages a d'abord permis de délimiter ce système, d'en déterminer les composants, et leurs relations. Une première analyse du système agricole a alors permis de focaliser l'étude sur les stratégies de demande en eau, plus particulièrement sur les déterminants de la construction des puits. Trois séries d'enquêtes complémentaires ont permis d'étudier les usages : **des enquêtes préliminaires** ont débouché sur l'élaboration d'une typologie des modes d'accès à l'eau, **des enquêtes approfondies** ont permis d'identifier des stratégies d'irrigation et d'investissement et **un sondage auprès d'un échantillon représentatif de la population** a finalement conduit à généraliser les résultats des enquêtes, à caractériser la zone et à poser des hypothèses sur le déroulement des processus identifiés.

La ressource a été étudiée sur la base de la bibliographie et des données existantes. Finalement, les données acquises ont permis de conclure que les agriculteurs du système agraire étudié partagent **un idéal commun d'accès à l'irrigation privée**, pour pallier les aléas climatiques et suivre un même modèle de réussite agricole. Ils cherchent donc en majorité à construire un puits ou à étendre leur irrigation. **Malgré cette apparente homogénéité, les trajectoires suivies par les agriculteurs sont en réalité très diversifiées**, du fait des contraintes parcellaires, familiales, économiques propres à chaque exploitant, et des relations entretenues avec le voisinage.

Les connaissances acquises ont abouti à la construction d'un modèle, par les Systèmes Multi-agents (SMA). Le modèle SINUSE (Simulateur des Interactions entre Nappe et USages de l'Eau) comporte trois types d'entités : des entités sociales, que sont **les exploitants**, des entités spatiales, que sont **la nappe, les PPI et les parcelles** et des entités passives, que sont **les puits**. La nappe est représentée par deux compartiments homogènes communiquant entre eux. Les exploitations sont initialement dotées de parcelles dispersées, de revenus extra-agricoles, d'une épargne de départ et éventuellement d'un puits, selon leur localisation. Pour un même type d'action, un agriculteur "choisit" une règle d'action parmi un jeu de possibilités, selon sa situation et son voisinage. Ainsi, en début d'année, les exploitants peuvent procéder à des échanges de parcelles en faire-valoir indirect (FVI). Ils choisissent ensuite de cultiver et d'irriguer leurs parcelles, selon les caractéristiques de la parcelle, leur accès à l'eau et les caractéristiques de l'exploitation. Les prélèvements liés à l'irrigation sont alors répercutés à la nappe, en fin de saison. Celle-ci réagit en conséquence, ce qui peut donner lieu à des transferts entre zones de la nappe. A la fin de l'année, les exploitants font le bilan de leur situation et cherchent à construire un puits, à étendre leur capital foncier, ou bien choisissent de ne pas investir si une situation plus favorable est susceptible de survenir ultérieurement.

La phase de construction du modèle a permis, avant même les expériences de simulation, d'identifier les grands mécanismes du système : **la dynamique d'abaissement provient en premier lieu de l'apparition des puits, processus qui semble dépendre en partie de la situation des exploitations et des interactions locales** que constituent l'imitation, les échanges fonciers, les associations entre voisins.

Les expériences de simulation sont analysées sur la base de l'évolution de la profondeur de la nappe, du nombre de puits et du nombre d'exploitants non endettés. Elles ont permis de vérifier la cohérence du modèle, et ont apporté plusieurs éléments à l'étude du système :

- les processus locaux modélisés et mis en interaction permettent bien de retrouver les propriétés du système, observées à l'échelle globale (l'abaissement de la nappe, l'apparition des puits) ;
- le système modélisé est sensible à la distribution des paramètres et aux interactions locales ; il s'agit en particulier de l'imitation et du marché foncier ;
- contrairement à l'hypothèse posée *a priori*, le FVI ne paraît pas avoir d'effet significatif sur la dynamique du système¹.

Les interventions de gestion testées ont des impacts différents sur le système modélisé :

- la tarification ne provoque un ralentissement de l'abaissement (modéré) qu'avec un tarif prohibitif, entraînant alors une chute du nombre d'exploitants non endettés ;
- l'introduction du goutte à goutte au mieux a un impact à peine perceptible sur l'abaissement de la nappe du fait d'une compensation gain sur l'efficacité de distribution, par une extension de la surface irriguée, et au pire entraîne au contraire une accélération de la baisse de la nappe, du fait d'une surirrigation et de revenus agricoles plus intéressants ;
- le paiement d'un droit de l'eau a un impact significatif, mais toujours assez modéré par rapport au coût social et fait essentiellement porter l'effort sur la construction des nouveaux puits ;
- l'introduction d'un quota saisonnier partagé entre les irriguants, notamment les nouveaux arrivants lorsqu'il s'agit de leur premier puits, proportionnellement à leur surface irrigable, conduit finalement au résultat le plus intéressant : un fort ralentissement de la baisse de la nappe pour une faible réduction du nombre d'exploitants non endettés. Ce système de quota est combiné à une tarification prohibitive en cas de dépassement.

La formalisation de ces interventions doit faire l'objet de discussions avec les experts locaux. Si ces résultats posent question sur la réaction du modèle à différentes interventions, leur portée doit être limitée à l'exploration théorique du système. En effet, plusieurs paramètres révélés importants ne sont pas encore suffisamment connus. D'autre part, dans le modèle,

¹ Cependant, ce résultat est à considérer avec prudence, les incertitudes sur les comportements économiques des agents induisant des distorsions au niveau des échanges fonciers.

les processus d'accumulation de l'épargne sont excessifs et conduisent à un marché foncier trop dynamique. **Cette distorsion constitue en fait un révélateur intéressant.** Elle pointe sur des questions importantes concernant les stratégies d'utilisation des revenus, peu étudiées jusqu'alors, et montrent que **les comportements modélisés gagneraient à être confrontés à la réalité, en particulier à être critiqués et entérinés par les acteurs concernés.** Enfin, dans le même ordre d'idée, la réflexion amorcée dans ce travail sur les modes d'adaptation des agriculteurs aux évolutions du contexte, en particulier aux interventions de gestion, devrait être poursuivie sur la base d'enquêtes prospectives.

Un nouveau type de modèle pour étudier la gestion de la demande sur une nappe

Des outils de gestion de la demande ont déjà été appliqués sur la nappe de Kairouan, sans effet significatif sur la dynamique des usages. Actuellement, la micro irrigation, subventionnée par l'Etat, fait son apparition dans la zone d'étude. D'autre part, plusieurs propositions de gestion de la demande émanent d'études récentes réalisées à l'échelle nationale : l'instauration de groupements d'usagers à l'échelle des nappes, de marchés de l'eau au sein de chaque groupement, l'instauration d'une taxe de rareté... **Toutefois, ces propositions ne tiennent pas compte des comportements locaux des usagers de la nappe, et encore moins de la perception qu'ils ont de la ressource et de l'eau.** L'étude menée sur la zone du Merguellil, sous-système de la nappe de Kairouan, conduit à penser que les exploitants sont réticents à vendre l'eau. Les outils techniques et économiques semblent constituer la solution miracle aux yeux des autorités. Cependant, les simulations effectuées avec le modèle SINUSE conduisent à s'interroger sur l'efficacité de la tarification, au regard des effets socio-économiques induits, et sur l'efficacité d'une introduction généralisée de la micro-irrigation sur l'abaissement de la nappe. Par ailleurs, la "gestion participative", actuellement prônée par les institutions de développement, est également considérée comme une solution idéale. Cependant, sa mise en œuvre sur le terrain implique au minimum une prise de conscience par les usagers de la dimension collective de la ressource, et une volonté partagée de limiter la surexploitation. Or ces requis de base semblent manquer sur la nappe de Kairouan : les usagers déclarent capter des oueds souterrains indépendants les uns des autres, semblent peu affectés par l'abaissement actuel de la nappe, et de ce fait, se montrent peu enclins à limiter leurs prélèvements.

Ces considérations montrent qu'il est important, avant de préconiser des outils de gestion, de bien connaître le fonctionnement du système, non seulement sur le plan physique, mais aussi sur le plan humain des perceptions, des stratégies, et des interactions locales susceptibles d'induire des effets sur la dynamique globale du système.

Par rapport aux modèles classiquement utilisés pour l'étude de la gestion de la demande sur une nappe, le modèle SINUSE présente l'avantage de pouvoir représenter ces facteurs. En effet, l'usage des SMA permet de **respecter le caractère très distribué du système sur le plan physique et sur le plan des usages**, notamment le morcellement des exploitations, qui n'est pas pris en compte dans les modèles mathématiques représentant la demande. Cette prise en compte de la distribution des paramètres conduit en second lieu à respecter **leur combinaison locale**, dont on a vu qu'elle est importante dans le déroulement de la dynamique. D'autre part, le modèle SINUSE représente **des comportements sur le long terme**, comme les investissements, plus difficilement représentés par les modèles économiques. Cette possibilité est importante dans le cas étudié, la dynamique du système reposant essentiellement sur la création de puits. Enfin, même s'il repose pour une grande part sur des paramètres économiques, **le comportement des usagers** n'est pas réduit dans ce modèle à la maximisation d'une fonction d'utilité, mais **correspond aux règles d'action observées sur le terrain**. En particulier, **les interactions entre agents** sont prises en compte, même lorsqu'elles sont **de type non marchand**, comme c'est le cas pour l'imitation, dont on a pu constater le rôle important dans le modèle. Finalement, le modèle SINUSE **permet de représenter l'extrême diversité des comportements individuels**, qui dépend essentiellement dans ce cas de la combinaison des facteurs locaux. Il met l'accent sur le fonctionnement de la demande, quand les modèles destinés à étudier la gestion des nappes représentent le fonctionnement de la ressource de manière détaillée, en traitant la demande très simplement.

D'une prospective cognitive à une prospective décisionnelle

Le modèle SINUSE est un modèle prospectif : il appuie une démarche scientifique d'exploration des futurs possibles du système étudié, compte tenu des caractéristiques sociales, des contraintes environnementales et des projets des acteurs en jeu.

Etant données les limites du modèle, notamment sur le plan des attributs économiques des agents, et l'absence d'une validation sociale par les acteurs concernés, le modèle SINUSE ne peut en l'état prétendre constituer un outil d'aide à la décision. **Son usage se situe en amont de la décision, au niveau de l'amélioration de la connaissance du système** : il s'agit d'un modèle exploratoire, suscitant des questions sur les processus formalisés, sur les liens entre variables. En tant qu'outil d'animation représentant à la fois la dynamique de la nappe et celle des usages, il peut déjà constituer un support de discussion entre chercheurs, experts locaux et gestionnaires. Ces discussions pourraient porter sur les mécanismes en

jeu, sur la perception de la nappe par les différents acteurs, et permettre dans un premier temps à chacun de mieux comprendre la dynamique du système. Il peut en outre guider d'autres recherches de terrain.

En grande partie fondé sur la modélisation de comportements humains, le modèle SINUSE devrait faire l'objet d'une présentation aux acteurs concernés, ou à des experts du terrain, capables d'entériner, de remettre en cause ou de compléter les objectifs, les stratégies, et les règles d'action représentés. Au-delà d'une simple présentation verbale, l'usage de jeux de rôles impliquant les acteurs ou les experts, permettrait de procéder à la validation des processus représentés et des évolutions dynamiques, et éventuellement d'identifier d'autres protocoles d'interactions en jeu. Cette méthode, déjà expérimentée à plusieurs reprises pour la validation de modèles multi-agents, est décrite en détail par Barreteau et Bousquet (1999). Encore faut-il que les acteurs se prêtent au jeu tout en étant fidèles à la réalité jouée...

Des études ultérieures, une "validation sociale" pourraient permettre d'aboutir à un modèle constituant une représentation acceptée par l'ensemble des acteurs concernés. Le modèle SINUSE pourrait alors devenir un support de négociations à long terme, entre les décideurs concernés² : *"It is on the basis of a shared conception of how the present situation should evolve that actors are able to "decide" very long-term objectives, on the basis of which the scenarios which enable these objectives to be reached can be discussed"* (Bousquet *et al.*, 1999). Les résultats du modèle constitueraient alors *"[...] des clefs capables ou non d'ouvrir certaines serrures susceptibles de convenir pour organiser et faire évoluer une situation"* (Roy, 1990). En ce sens, les simulations effectuées avec le modèle doivent permettre de développer des vigilances, *"[...] c'est-à-dire des mises en garde, des obligations à apporter une attention particulière en fonction de la situation où se trouve l'acteur."* (Lièvre et Traoré, 1998). Concernant la transférabilité du modèle, il est prévu dans un premier temps, d'une part de diffuser une présentation démonstrative du modèle et de la démarche notamment aux décideurs et chercheurs tunisiens, d'autre part de permettre à des chercheurs tunisiens formés aux systèmes multi-agents de s'approprier la version actuelle de SINUSE, par une formation individuelle avec l'auteur du modèle. Ces chercheurs pourraient travailler sur les insuffisances du modèle, puis animer des réunions de décideurs en utilisant SINUSE comme un outil d'aide à la réflexion.

² Les décideurs comprennent les différentes directions techniques du Ministère de l'Agriculture impliquées dans la gestion de l'eau, comme la DGRE, la DGETH, la DGGR, ainsi que les institutions locales de développement comme le CRDA, le gouvernorat, la délégation. Par contre, les agriculteurs eux-mêmes sont encore très peu impliqués dans les décisions de gestion, en Tunisie.

Des études à poursuivre à l'aide du modèle

Cette phase d'expériences sur le modèle pourrait être poursuivie dans plusieurs directions : l'approfondissement de l'étude de sensibilité, une étude de terrain et une restitution visant à consolider le modèle, la simulation d'autres interventions...

Jusqu'alors, les différentes simulations ont toujours porté sur la même carte des parcelles, initialement générée en respectant des contraintes de taille, selon une distribution aléatoire dans l'espace. Le changement de configuration du parcellaire induit-il un changement significatif sur la dynamique du modèle ? Une expérience menée en particulier sur un parcellaire moyen, uniforme, les paramètres caractérisant les exploitations, les PPI et la nappe, étant également des moyennes distribuées uniformément, permettrait de tester l'importance de la combinaison locale de ces facteurs.

Un autre type d'expérience pourrait porter sur les simplifications opérées dans le modèle actuel, et rechercher si elles induisent un biais nuisible aux interprétations. Par exemple, une représentation de la diversité des rendements ou des caractéristiques techniques des puits entraîne-t-elle des écarts entre exploitants, susceptibles d'être amplifiés par le jeu des interactions locales, et de conduire à des résultats différents au niveau global ?

D'autre part, les travaux en cours de réalisation sur la zone d'étude, focalisés sur le lien entre aversion au risque et choix d'assolement et d'irrigation, pourraient conduire à enrichir les comportements modélisés dans SINUSE.

Une fois résolue la question de la distorsion des paramètres économiques et du marché foncier dans le modèle, des expériences d'intervention comparant plusieurs familles d'outils de gestion et leur combinaison pourraient être menées, en tenant compte d'éventuels changements de règles basés sur des hypothèses, posées en accord avec les acteurs. Le modèle pourrait également être simplifié, si le rôle mineur du faire-valoir indirect dans la dynamique globale se confirme. Il pourrait s'avérer intéressant de comparer les tendances d'évolution de la nappe données par le scénario de référence aux résultats de simulation du modèle de nappe actuellement à l'étude. Le modèle SINUSE pourrait également permettre de simuler des scénarios catastrophes, même si leur probabilité d'occurrence est très faible, afin de réfléchir aux pires évolutions possibles du système, et chercher à les éviter.

Enfin, la capacité des SMA à représenter des règles du jeu au niveau individuel et des échanges au sein de réseaux sociaux pourrait être pleinement utilisée pour élaborer et simuler des scénarios de gestion collective, même si ce type de gestion semble encore relever du domaine de la fiction sur la nappe de Kairouan. Tout l'intérêt du modèle est justement de pouvoir tester des scénarios difficiles à expérimenter dans la réalité, pour alimenter la réflexion en cours sur les voies d'un développement viable du système.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdeselem, K. (1991). *Projet de développement d'un système d'enquêtes agricoles en Tunisie. Enquête sur les structures des exploitations agricoles en Tunisie. Rapport de mission.* Ministère de l'Agriculture, Tunis.
- Akhy, R. B., Dhia, H. B., Gamaoun, A., et Amri, R. (1997). *Modélisation de l'impact des activités anthropiques sur les nappes phréatiques côtières. Cas de Chott Maria (Sahel tunisien).* La Houille Blanche 2: 58-65.
- Al-Alawi, J. (2000). *Face à la crise mondiale de l'eau...* In : *L'eau au XXI^e siècle - De la Vision à l'Action* (P.-F. Ténrière-Buchot, ed.), pp. 85-88. Futuribles, Paris.
- Allain, S. (1998). *Construction de règles locales de gestion collective de l'eau en France : Analyse de cas concrets et nouveaux axes de recherche.* In : *L'irrigation et la gestion collective de l'eau en France et dans le monde.* SFER, 19-20 novembre, Montpellier.
- Allan, J. A. (1996). *Water Use and Development in Arid Regions : Environment, Economic Development and Water Resource Politics and Policy.* *Water Use and Development* 5: 107-115.
- Al-Rashed, M., Al-Senafy, M. N., Viswanathan, M. N., et Al-Sumait, A. (1998). *Groundwater Utilization in Kuwait : Some Problems and Solutions.* *Water Resources Development* 14: 91-105.
- ANDA-Irrimieux (1999). *Gestion collective d'une ressource commune : des "droits à l'eau" à la gestion collective de l'eau. Synthèse. Etudes de cas tomes 1 et 2.* Association Nationale pour le Développement Agricole, Paris.
- Antona, M., Bousquet, F., Page, C. L., Weber, J., Karsenty, A., et Guizol, P. (1999). *Economic theory of renewable resource management : a multi-agent system.* In : *Lectures Notes in Artificial Intelligence* (J. Schiman, R. Conte et N. Gilbert, eds.), Vol. 1534, pp. 61-78. Springer, Berlin.
- APIA (1993). *Table ronde sur les normes technico-économiques en agriculture : harmonisation des différentes approches d'évaluation des projets agricoles.* In : , pp. 116 p. Ministère de l'Agriculture, Tunis.
- Arrondissement Statistiques (1990). *Enquête agricole de base.* CRDA, Kairouan.
- Attonaty, J.-M., et Soler, L.-G. (1992). *Aide à la décision et gestion stratégique : un modèle pour l'entreprise agricole.* *Revue Française de Gestion* 88 : 45-55.
- Aubry, C., Besse, T., Elloumi, M., Gana, A., Gara, M., Sebillotte, M., Soler, L. G., et Souki, K. (1988). *Vers une transformation de l'agriculture dans les zones semi-arides tunisiennes - Dynamique des exploitations et des familles agricoles dans la région de Zaghouan.* *Les Cahiers de la Recherche Développement* 20: 61-73.
- Babillot, P., et Lourd, P. L. (2000). *Y a-t-il un marché de l'eau ?* La Houille Blanche 2: 39-54.
- Bahi, E., Hejjem, et Hamza (1981). *Les nappes phréatiques et leur exploitation : Kairouannais - Sahel.* D.R.E, Tunis.
- Bahri, A. (1982). *Utilisation des eaux et des sols salés dans la plaine de Kairouan.* Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse.
- Balman, A. (1997). *Farm-based modelling of regional structural change.* *European Review of Agricultural Economics* 25 (1): 85-108.
- Barde, J.-P. (1993). *Quel instrument choisir face à un problème d'environnement ?* INSEE Méthodes, INSEE, Paris.

- Barreteau, O. (1998). Un Système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et mode d'organisation. Thèse de Doctorat, ENGREF, Montpellier.
- Barreteau, O., Bousquet, F., et Attonaty, J.-M. (2000). Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: methods and teachings of its application to Senegal River Valley irrigated systems. In : Modelling Agent Interactions in Natural Resource and Environment Management (F. B. e. R. Lifran, ed.). INRA, ESR & CIRAD TERA, 29-31 mars 2000, Montpellier.
- Barreteau, O., et Bousquet, F. (1999). Jeux de rôles et validation des systèmes multi-agents. In : Ingénierie des systèmes multi-agents (M.-P. Gleizes et P. Marcenac, eds.), pp. 67-80. Hermès Sciences Publications, Paris.
- Barreteau, O., et Bousquet, F. (2000). SHADOC : a multi-agent model to tackle viability of irrigated systems. *Annals of Operations Research* 94: 139-162.
- Bart, J. (1995). Acceptance criteria for using individual-based models to make management decisions. *Ecological Applications* 5 (2): 411-420.
- Béboulé, A. (1997). Etablissement de la banque des données sur les piézomètres et les prélèvements de la plaine de Kairouan. mémoire de fin d'étude de technicien supérieur. Ecole Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Rural de Medjez el bab, Tunis.
- Bechtel International, et Scet-Tunisie (1999). Etude du secteur de l'eau - Thème 6 : Demande économique de l'eau en agriculture et recouvrement des coûts. Tunis.
- Belhaj Hassine, N. (1997). Tarification de l'eau et agriculture irriguée : le cas de la Tunisie. Thèse de Doctorat, Université des Science Sociales de Toulouse, Toulouse.
- Belouze, P. (1996). Un Modèle Intégré d'un Système Irrigué par la prise en compte de phénomènes hydrauliques, économiques et hydro-pédologiques Application sur le périmètre irrigué de Chistian, Penjab Sud, Pakistan. Mémoire de DEA. Université de Montpellier II, Montpellier.
- Ben Hamouda, N. (1999). Stratégies des agriculteurs irriguants confrontés à une situation de pénurie d'eau. Cas d'un périmètre irrigué privé dans le bassin du Merguellil en Tunisie Centrale. Master of Science. CIHEAM-IAM, Montpellier.
- Ben Salem, L. (1993). Dynamique des rapports sociaux et changement social en milieu rural au Maghreb, l'exemple des rapports de propriété. In : Les transformations actuelles des sociétés rurales du Maghreb, Vol. 5, pp. 300-316. Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, Tunis.
- Benblidia, M., et Garadi, A. (1994). D'une gestion de l'offre d'eau à une gestion par la demande MADH2O : Modèle automatisé de la demande en Eau. In : Hydrotop 94 : colloque "Mieux gérer l'eau", 12-15 avril 1994, .
- Berkoff, J. (1994). A strategy for Managing Water in the Middle East and North Africa. The World Bank, Washington, D.C.
- Besbes, M. (1971). Note sur la géométrie du réservoir profond de la plaine de Kairouan. DRE, Tunis.
- Besbes, M. (1975). Etude hydrogéologique de la plaine de Kairouan sur modèles mathématiques. DRE, Tunis.
- Besbes, M., et de Marsily, G. (1976). L'analyse d'un grand réservoir aquifère en vue de sa modélisation. In : Conférence AIH - L'hydrologie des grands bassins sédimentaires, Budapest.

- Beuret, J.-E. (1999). Petits arrangements entre acteurs... Les voies d'une gestion concertée de l'espace rural. *Natures Sciences Sociétés* 7: 21-30.
- Bhatia, R., Cestti, R., et Winpenny, J. (1995). *Water Conservation and Reallocation : Best Practice Cases in Improving Economic Efficiency and Environmental Quality*. Water & Sanitation Currents, World Bank, Washington, D.C.
- Billib, H. (1971). Recherches sur l'économie de l'eau souterraine de la plaine de Kairouan avec un réseau R.C. . D.R.E, Tunis.
- Blomquist, W. (1992). *Dividing the Waters - Governing Groundwater in Southern California*. ICS Press, San Francisco.
- Bossel, H. (2000). Policy assessment and simulation of actor orientation for sustainable development. *Ecological Economic* 34: 337-355.
- Bousquet, F. (1994). Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents Le cas de la pêche dans le Delta Central du Niger, Université Claude Bernard Lyon I, Lyon.
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., et Lepage, C. (1998). Cormas : common-pool resources and multi-agent systems. In : 11th conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, Lecture Notes in Artificial Intelligence (A. P. d. Pobil, J. Mira et M. Ali, eds.), Vol. 1416, pp. 826-837. Springer-Verlag, 1-4 juin 1998, Barcelone.
- Bousquet, F., Barreteau, O., Mullon, C., et Weber, J. (1996). Modélisation d'Accompagnement : Systèmes multi-agents et Gestion des Ressources Renouvelables. In : Colloque International : Quel environnement au XXIème siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie, 8-11 sept. 1996, Abbaye de Fontevraud.
- Bousquet, F., Barreteau, O., Page, C. L., Mullon, C., et Weber, J. (1999). An environmental modelling approach. The use of multi-agent simulations. In : *Advances in environmental and ecological modelling* (F. B. a. A. Weill, ed.), pp. 113-122. Elsevier.
- Bousquet, F., Page, C. L., Bakam, I., et Takforyan, A. (sous presse). A spatially-explicit individual-based model of blue duikers population dynamics - Multi-Agent simulations of bushmeat hunting in an eastern cameroonian village. *Ecological Modelling*.
- Boussard, J.-M. (1989). Les modèles de comportement des unités paysannes. In : *Producteurs et consommateurs face aux politiques agricoles et alimentaires en Afrique*, 29 mai-2 juin 1989, Montpellier.
- Briscoe, J. (1997). Managing water as an economic good. In : *Water : Economics, Management and Demand* (T. F. a. L. S. Melvyn Kay, ed.), pp. 339-361. E & F Spon.
- Brodhag, C. (1998). Quelques réflexions sur l'eau dans le cadre du développement durable. In : *L'application du concept du développement durable au domaine de l'eau* (C. F. d. D. Durable, ed.), 15 janvier 1998, Paris.
- Brossier, J., Chia, E., Marshall, E., et Petit, M. (1990). Recherches en gestion : vers une théorie de la gestion de l'exploitation agricole. In : *Modélisation systémique et système agraire - Décision et organisation* (J. Brossier, B. Vissac et J. L. L. Moigne, eds.). INRA, Paris.
- Brunet, R. (1986). La carte-modèle et les chorèmes. *Mappe Monde* 86: 2-6.
- Burke, J. J., Sauveplane, C., et Moench, M. (1999). Groundwater management and socio-economic responses. *Natural Resources Forum* 23: 303-313.

- Campagne, P. (1994). "Systèmes agraires, système rural, système local", la pluriactivité en Languedoc. In : Actes du symposium international Recherches-systèmes en Agriculture et Développement Rural. Montpellier
- Caron, P. (1995). Connaître, représenter, planifier et agir : le zonage à dire d'acteurs, une méthodologie expérimentée dans le Nordeste du Brésil. In : Quelle géographie au Cirad (T. Clouet, ed.), Vol. 10, pp. 145-156. CIRAD.
- Castany, G. (1947). Les fossés d'effondrement de Tunisie. . Service Géologique, Tunis.
- Chaieb, H. (1988). Contribution à la réactualisation des modèles hydrogéologiques. Mémoire de DEA. Faculté des Sciences, Tunis.
- Chaieb, H. (1990). Modèle de Kairouan : effet de la fermeture des barrages et des lâchures d'eau dans les lits des oueds sur la nappe de Kairouan. DGRE, Tunis.
- Coquillard, P., et Hill, D. R. C. (1997). Modélisation et simulation d'écosystèmes Des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets. Recherche en écologie. Masson, Paris.
- Cosgrove, W. J., et Bouayad-Agha, M. (2000). Le projet Vision mondiale de l'eau. In : L'eau au XXI^e siècle - De la Vision à l'Action (P.-F. Ténière-Buchot, ed.), pp. 9-13. Futuribles, Paris.
- Costanza, R., Wainger, L., et Bockstael, N. (1995). Integrated Ecological Economic System Modeling : Theoretical Issues and Practical Applications. In : Integrating economic and ecological indicators : practical methods for environmental policy analysis (J. W. M. a. J. F. Shogren, ed.), pp. 45-66. Praeger Publishers, Westport.
- Cunha, M. d. C. M. d. O., Hubert, P., et Tyteca, D. (1993). Optimal Management of a Groundwater System for Seasonally Varying Agricultural Production. *Water Resources Research* 29: 2415-2426.
- Daoud, A. (1996). Les périmètres publics irrigués de la région de Sidi Bouzid (Hautes Steppes Tunisiennes) - Politiques de l'Etat et stratégies paysannes. In : Politiques agricoles et stratégies paysannes au Maghreb et en Méditerranée occidentale (M. Elloumi, ed.), pp. 483-501. IRMC, Tunis.
- de Rosnay, J. (1975). *Le Macroscopie : vers une vision globale*. Ed. Du Seuil, Paris.
- Dean, J. S., Gumerman, G. J., Epstein, J. M., Axtell, R. L., Sweldlund, A. C., Parker, M. T., et McCarroll, S. (2000). Understanding Anasazi culture change through agent-based modelling. In : *Dynamics in Human and Primate Societies* (T. A. Kohler et G. J. Gumerman, eds.), pp. 179-206. Oxford University Press, Sante Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity.
- Deffontaines, J. P., et Petit, M. (1985). Comment étudier les exploitations agricoles d'une région ? Etudes et recherches. INRA, Versailles - Dijon - Mirecourt.
- Desabie, J. (1966). *Théorie et pratique des sondages*. Dunod, Paris.
- Doorenbos, J. (1986). Les besoins en eau des cultures. In : *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage* (W. O. Pruitt, ed.), Vol. 24. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome.
- Eheart, J. W., et Barclay, J. P. (1990). Economic Aspects of Groundwater Withdrawals Permit Transfer. *Journal of Water Resources Planning and Management* 116: 282-303.
- El Amami, S. (1987). Mutation des systèmes de culture en Tunisie Centrale - Etude de cas de deux familles de la basse steppe. *Revue Tunisienne de Géographie* 127-137.

- El Magnouni, S. (1993). Méthodologie d'aide à la décision pour l'évaluation et la gestion multicritère des ressources en eau souterraine. Thèse de Doctorat en Génie Civil et Minier, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- Ennabli, N. (1993). Les aménagements hydrauliques et hydro-agricoles en Tunisie. In : INAT, Département du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Tunis.
- Ennabli, N. (1995). L'irrigation en Tunisie. In : . INAT, Département du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Tunis.
- Faisal, I. M., Young, R. A., et Warner, J. W. (1997). Integrated Economic-Hydrologic Modelling for Groundwater Basin Management. *Water Resources Development* 13: 21-34.
- Faysse, N. (1998a). L'eau entre Etat et usager dans le bassin de l'Adour : de la gestion réglementaire à la gestion concertée. mémoire de DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement. Université de Montpellier II, Montpellier.
- Faysse, N. (1998b). Les acteurs de la gestion de l'eau et les jeux de pouvoir sur la nappe de Kairouan : différences entre théorie et réalité. Rapport de stage. Orstom, Tunis.
- Ferber, J. (1994). La kénétique : des systèmes multi-agents à une science de l'interaction. *Revue Internationale de systémique* 8: 13-27.
- Ferber, J. (1995). Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective. InterEditions, Paris.
- Ferrand, N., et Deffuant, G. (1998). Trois apports potentiels des approche "multi-agents" pour l'aide à la décision publique. In : Gestion des Territoires Ruraux - Connaissances et méthodes pour la décision publique (Cemagref, ed.), Vol. 1, pp. 373-385, Clermont-Ferrand.
- Feuillette, S., Garin, P., Bousquet, F., et Goulven, P. L. (2000a). Un modèle d'exploration des dynamiques nappe-usages pour la gestion intégrée d'une nappe surexploitée - Application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale. In : Hydrologie des régions méditerranéennes (IRD, ed.), 11-13 octobre, Montpellier.
- Feuillette, S., Le Goulven, P., et Bachta, M. S. (1998). Les pouvoirs législatifs, réglementaires et juridiques en Tunisie confrontés à la gestion des nappes souterraines : cas de la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale. In : Colloque SFER : L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde, 19-20 novembre, Montpellier.
- Feuillette, S., Le Goulven, P., et Bousquet, F. (2000b). SINUSE, un outil d'exploration des interactions entre une nappe et ses usagers. In : séminaire international GIRN-ZIT, 21-24 juin 2000, Bamako.
- Gilot, L. (1994). L'eau des livres et l'eau des champs : des règles de distribution à leur mise en pratique : principes généraux et analyse du cas d'Urcuqui. Thèse de Doctorat, ENSAM, Montpellier.
- Gintis, H. (2000). Beyond Homo economicus : evidence from experimental economics. *Ecological Economics* 35: 311-322.
- Gisser, M. (1983). Groundwater : Focusing on the Real Issue. *Journal of Political Economy* 91: 1001-10027.
- Gisser, M., et Sanchez, D. A. (1980). Competition versus Optimal Control in Groundwater Pumping. *Water Resource Research* 16: 638-642.

- Gleyses, G., Morardet, s., Rio, P., et Toyer, S. (1998). La réforme de la gestion de l'eau dans le bassin de l'Adour : la théorie des jeux comme outils d'aide à la négociation. In : Gestion des Territoires ruraux - Connaissances et méthodes pour la décision publique, Vol. 1, pp. 359-371. Cemagref, Clermont-Ferrand.
- Godard, O. (1994). Le développement durable : paysage intellectuel. *Natures Sciences Sociétés* 2: 309-321.
- Goodhue, R., Morardet, S., Rio, P., et Thoyer, S. (1998). Les formes institutionnelles de la gestion de l'eau en France et en Californie : droites de propriété, décentralisation et délégation. In : L'irrigation et la gestion collective de l'eau en France et dans le monde. SFER, 19-20 novembre 1998, Montpellier.
- Grimble, R. J., Gass, G., et Adams, B. (1996). Groundwater resource degradation : a framework for analysis, with examples from China and Palestine. *Water Policy* 97-105.
- Hamdy, A., et Lacirignola, C. (1997). Water : a strategic resource throughout the Mediterranean Basin. In : Agriculture et Développement Durable en Méditerranée, 10-12 mars 1997, Montpellier.
- Hamza, M. (1977). Adaptation des tubes filtrants aux sondages à bras. D.R.E, Tunis.
- Hamza, M. (1988). Projet de développement agricole du gouvernorat de Kairouan (ressources en eau). DGRE, Tunis.
- Hardin, G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science* 162: 1243-1248.
- Harzli, T., et Elloumi, M. (1996). Irrigation et transformation des exploitations familiales en Tunisie - Le cas de la région d'Elamaïem. In : Politiques agricoles et stratégies paysannes au Maghreb et en Méditerranée occidentale, pp. 273-295. IRMC, Tunis.
- Hassaïnya, J. (1985). Irrigation et développement agricole au Maghreb. Etudes et recherches. 1. IAM, Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes, Montpellier.
- Hassaïnya, J. (1987). Irrigation et transformation des systèmes de production - Cas des grands aménagements hydro-agricoles au Maghreb. *Les Cahiers de la Recherche développement* 14: 108-115.
- Heikkila, T. (2000). Linking Policy Changes and Resource Management Decisions : a Game Theoretic Analysis of Coordinated Water management in Colorado. In : Eighth Conference of the International Association for the Study of Common Property (IASCP), 31 mai-4 juin 2000, Bloomington, Indiana, USA.
- Hill, R. C. (1993). Analyse orientée objets & modélisation par simulation. Editions Addison-Wesley France, SA, Paris.
- Horchani, A. (1995). Gestion des ressources en eau en Tunisie. *Agriculture de Tunisie* 8: 10-14.
- Howsam, P. (1996). Water law, water rights and water policy. In : *Water Policy : Allocation and Management in Practice* (P. H. a. R. C. Carter, ed.), pp. 371-379. E & FN SPON, 22-24 septembre 1996, Cranfield University, UK.
- Hubert, P. (1986). De quelques concepts et outils utiles à la gestion de l'eau. Thèse de Doctorat d'Etat ès sciences, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Jager, W., Janssen, M. A., De Vries, H. J. M., De Gree, J., et Vlek, C. A. J. (2000). Behaviour in commons dilemmas : Homo economicus and Homo Psychologicus in an ecological-economic model. *Ecological Economics* 35: 357-379.
- Janssen, M. A., et Jager, W. (2000). Preface. *Ecological Economics* 35: 307-310.

- Kallali (1989). Zone surexploitée de la plaine de Kairouan. DGRE, Tunis.
- Kallali, et Gharbi (1986). Proposition d'un périmètre de sauvegarde à Abida. D.R.E, Tunis.
- Kassab, A. (1983). L'agriculture Tunisienne. Revue Tunisienne de Géographie 10-11.
- Kefi, M. (1999). Estimation de la rente économique de l'eau dans les PPI de Chébika. Projet de fin d'étude. INAT, Tunis.
- Khanfir, R., Echi, M. E., Louati, M., Marzouk, A., Frigui, H., et Alouini, A. (1998). Eau 21 - Stratégie du secteur de l'eau en Tunisie à long terme 2030. Ministère de l'Agriculture, Tunis.
- Kingumbi, A. (1999). Bilan et modélisation du système El Haouareb. Analyse des bilans superficiels et souterrains de la retenue d'El Haouareb et modélisation de son réservoir. Mémoire de DEA. ENIT, Tunis.
- Kohler, T. A., Kresl, J., Van West, C., Carr, E., et Wilshusen, R. H. (2000). Be there then : a modeling approach to settlements determinants and spatial efficiency among late ancestral Pueblo populations of the Mesa Verde region, U.S., Southwest. In : Dynamics in Human and Primate Societies - Agent-based modeling of social and spatial processes (T. A. Kohler et G. J. Gumerman, eds.), pp. 145-178. Oxford University Press, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity.
- Kosciusko-Morizet, N., Lamotte, H., et Richard, V. (1998). Que peut-on attendre de la mise en place de quotas individuels échangeables de prélèvement sur la ressource en eau en France ? In : L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde. SFER, 19-20 novembre 1998, Montpellier.
- Kuper, M. (1997). Irrigation management strategies for improved salinity and sodicity control. Ph. D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- Labbé, F., Ruelle, P., Garin, P., et Leroy, P. (2000). Modeling irrigation scheduling to analyse water management at farm level during water shortages. European journal of agronomy 12: 55-67.
- Lamacq, S. (1997). Coordination entre l'offre et la demande en eau sur un périmètre irrigué. Des scénarios, des systèmes, et des hommes. Thèse de Doctorat, ENGREF, Montpellier.
- Lardilleux, S. (2000). Fonctionnement de périmètres irrigués à différents stades d'évolution en Tunisie Centrale - Analyse des irrigations par simulation du bilan hydrique. Rapport de fin d'étude. Engees, Strasbourg.
- Lardon, S., Baron, C., Bommel, P., Bousquet, F., Page, C. L., Lifran, R., Monestiez, P., et Reitz, P. (1998). Modéliser les configurations et les stratégies spatiales dans un système multi-agents pour la maîtrise de dynamiques d'embroussaillage. In : Colloque SMAGET - Modèles et systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires (N. Ferrand, ed.), pp. 51-63. Cemagref Editions, 5-8 sept 1998, Clermont-Ferrand.
- Laurent, A. (1993). La gestion en bien commun des eaux souterraines : La nappe des sables astiens de Valras (Hérault), une opération pilote en Languedoc-Roussillon. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier.
- Laville, B. (2000). L'eau, enjeu de justice et de paix. In : L'eau au XXI^e siècle - De la Vision à l'Action (P.-F. Ténière-Buchot, ed.), pp. 25-29. Futuribles, Paris.
- Law, A. M., et Kelton, D., W. (1991). Simulation modeling and analysis. McGraw-Hill, Inc., New York.

- Lewis, R. O. (1993). Verification, validation and accreditation (V V&A) of models and simulations used in distributed interactive environments. In : Modelling and Simulation ESM 93 (A. Pavé, ed.), pp. 632-636. Society for Computer Simulation International, Ecole Normale Supérieure, Lyon.
- Lièvre, P., et Traoré, M. K. (1998). Prospective en milieu rural, modélisation des systèmes complexes et intelligence artificielle distribuée. In : Gestion des territoires ruraux Connaissances et méthodes pour la décision publique, pp. 343-357. Cemagref Editions, 27-28 avril 1998, Clermont-Ferrand.
- Lifran, R., Bakam, I., Bousquet, F., et Lepage, C. (1998). Externalités de voisinage, communication entre agents et pareto optimalité - Etude théorique et par un SMA. In : Colloque SMAGET - Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'Environnement et des Territoires, 5-8 octobre 1998, Clermont Ferrand.
- Lopez, M., et Petit, O. (2000). Information and Communication Technology as a means to improve stakeholders understanding of the Commons : The case of groundwater Management in France. In : Eighth Conference for the International Association for the Study of Common Property (IASCP), 31 mai-4 juin 2000, Bloomington, Indiana, USA.
- Mañas, F. M. d. S. O., Ramos, A. b., Cortés, C. F., Gonzalez, D. F., et Corcoles, H. L. (1999). Improvement of irrigation management towards the sustainable use of groundwater in Castilla-La Mancha, Spain. *Agricultural Water Management* 40: 195-205.
- Mansouri (1995). Mobilisation des ressources supplémentaires à partir de la nappe mio-plioquaternaire de la plaine de Kairouan à partir du barrage El haouareb. SONEDE, Tunis.
- Mansouri (1996). Bilan de la nappe mio-plio-quaternaire de la plaine de Kairouan. SONEDE, Tunis.
- Margat, J. (1996). Les Ressources en Eau. Manuel et Méthodes, 28. BRGM.
- Meinzen-Dick, R. (1997). Groundwater markets in Pakistan : participation and productivity. Research Report. 105. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C.
- Meinzen-Dick, R., et Rosegrant, M. W. (1997). Water as an economic good : incentives, institutions and infrastructure. In : *Water : Economics, Management and Demand* (T. F. a. L. S. Melvyn Kay, ed.), pp. 312-320. E & FN Spon.
- Molle, F., et Ruf, T. (1994). Eléments pour une approche systémique du fonctionnement des systèmes irrigués. In : Actes du symposium international Recherches-systèmes en Agriculture et Développement Rural, pp. 114-118, Novembre 1994, Montpellier.
- Molle, F., et Valette, F. (1994). Quelques réflexions sur l'apport de la modélisation dans les recherches-système. In : Actes du symposium international Recherches-systèmes en Agriculture et Développement Rural, pp. 193-198, Novembre 1994, Montpellier.
- Montginoul, M. (1997). Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : Des instruments, de l'information et des acteurs. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Economiques de Montpellier I, Montpellier.
- Montginoul, M. (1998). Des instruments économiques pour la gestion de l'eau : concurrence ou complémentarité? In : L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde. SFER, 19 et 20 novembre 1998, Montpellier.
- Montginoul, M., et Rieu, T. (1996). Instruments économiques et gestion de l'eau d'irrigation en France. *La Houille Blanche* 8: 47-54.

- Montginoul, M., et Strosser, P. (1999). Analyser l'impact des marchés de l'eau. *Economie Rurale* 254: 20-27.
- Montginoul, M., Rossignol, B., et Garin, P. (1998). Une résolution des conflits d'usages par des actions sur la coordination de l'offre et de la demande en eau : le cas Français. In : *L'irrigation et la gestion collective de l'eau en France et dans le monde*. SFER, 19-20 novembre 1998, Montpellier.
- Moussa, F. (1988). *L'Etat et l'agriculture en Tunisie*, INAT, Tunis.
- Muller, P.-A. (1998). *Modélisation objet avec UML*. Eyrolles, Paris.
- Nagaraj, N., Frasier, W. M., et Sampath, R. K. (2000). A Comparative Study of Groundwater Institutions in the Western United States and Peninsular India for Sustainable and Equitable Resource Use. In : *Eighth Conference of the International Association for the Study of Common property (IASCP)*, 31 mai-4 juin 2000, Bloomington, Indiana, USA.
- Narain, V. (1998). Towards a new groundwater institution for India. *Water Policy* 1: 357-365.
- Nazoumou, Y. (1996). *Modélisation de la recharge artificielle des nappes de la plaine de Kairouan*. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies. . Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunis.
- Nazoumou, Y., et Besbes, M. (2000). Modélisation des lâchers de barrage et recharge de la nappe de Kairouan (Tunisie). In : *Hydrologie des régions méditerranéennes*. IRD, 19-20 novembre 2000, Montpellier.
- Nazoumou, Y., et Besbes, M. (sous presse). Recharge assessment and groundwater modeling in arid conditions. Case study at Kairouan, Tunisia. In : *6ème Assemblée Scientifique de l'IAHS (H. Gehrels, ed.)*, 18-27 Juillet 2001, Maastricht.
- Nicol, A. (1996). Political Decentralisation and River Basin Management. In : *Water Policy : Allocation and Management in Practice (P. H. a. R. C. Carter, ed.)*, pp. 251-289. E & FN SPON, Cranfield University, UK.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons*. Cambridge University Press, Cambridge.
- OTD (1995). *Cahier des normes campagne 95/96*. 46 p. Office des Terres Domaniales, Tunis.
- Palacio, V., Gleyses, G., et Morardet, S. (1995). Typologie d'exploitations et demande en eau d'irrigation. *Ingénieries - EAT N°2*: 39-45.
- Palmer-Jones, R. (1997). Groundwater management in South Asia : what role for the market ? In : *Water : economics, management and demand (T. F. a. L. S. Melvyn Kay, ed.)*, pp. 381-389. E & FN Spon.
- Pantu, I. (1973). *Projet principal du programme tuniso-canadien de Kairouan*. In : *Etude hydrogéologique de la plaine de Kairouan*, Kairouan.
- Paul, J. C., Bory, A., Bellande, A., Garganta, E., et Fabri, A. (1994). Quel système de référence pour la prise en compte de la rationalité de l'agriculteur : du système de production agricole au système d'activité. *Les Cahiers de la Recherche Développement* 39: 7-19.
- Pérennes, J.-J. (1988). La politique de l'eau en Tunisie. *Maghreb-Machrek* 120: 23-41.
- Pérennes, J.-J. (1993). *L'eau et les hommes au Maghreb - Contribution à une politique de l'eau en Méditerranée*. Ed. Karthala, Paris.
- Perrot, C., et Landais, E. (1993). Exploitations agricoles : pourquoi poursuivre la recherche sur les méthodes typologiques ? *Les Cahiers de la Recherche Développement* 33: 13-23.

- Petit, M. (1981). Théorie de la Décision et Comportement Adaptatif des Agriculteurs. In : Formation des agriculteurs et apprentissage de la décision (ENSSAA, INPSA, INRA et INRAP, eds.), pp. 1-36, 21 janvier 1981, .
- Peythieu, S. (1998). Etude du périmètre de Chébika-Est. Rapport de stage. Orstom, Tunis.
- Piet, L. (1998). Impact sur la localisation des cultures d'instruments économiques appliqués à la ressource en eau : un exemple théorique de la modélisation en équilibre général interrégional. In : L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde. SFER, 19 et 20 novembre 1998, Montpellier.
- Provencher, B., et Burt, O. (1994). A Private Property Rights Regime for the Commons: The Case for Groundwater. *American Journal of Agronomical Economics* 76: 875-888.
- République Tunisienne (1994). Code des Eaux. Imprimerie Officielle de la République Tunisienne, Tunis.
- Reynaud, A. (2000). Gestion durable d'une ressource naturelle : le cas du système aquifère girondin. Thèse de Doctorat, Université des Sciences Sociales de Toulouse, Toulouse.
- Rieu, T., et Gleyses, G. (1993). Evaluation socio-économique d'un projet d'irrigation et étude prospective de la demande en eau. *La Houille Blanche* 2-3: 119-125.
- Riou, C. (1980). Une formule empirique simple pour calculer l'évapotranspiration potentielle moyenne en Tunisie. *Cahiers de l'Orstom - Série hydrologie XVII*: 129-137.
- Romagny, B. (1996). Développement durable, bioéconomie et ressources renouvelables - Réflexion sur les modes d'appropriation et de gestion de ces ressources - Une remise en cause de la formalisation de la "tragédie" de l'accès libre par le dilemme du prisonnier. Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis
- Rouchier, J., Bousquet, F., Requier-Desjardins, M., et Antona, M. (2001). A multi-agent model for describing transhumance in North Cameroon : comparison of different rationality to develop a routine. *Journal of Economic Dynamics & Control* 25: 527-559.
- Roy, B. (1990). Science de la décision ou science de l'aide à la décision ? *Cahiers du Lamsade* 97: 1-29.
- Rykiel, E. J. (1996). Testing ecological models : the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90: 229-244.
- Salles, D., et Zelem, M.-C. (1998). Les modalités de la décision publique dans le cadre des politiques de gestion de l'eau. In : *Gestion des territoires ruraux - Connaissances et méthodes pour la décision publique*, Vol. 1, pp. 39-53. Cemagref, Clermont-Ferrand.
- SCET-Tunisie (2000). Projet d'économie d'eau dans les périmètres irrigués de petite et moyenne hydraulique au centre ouest de la Tunisie. Gouvernorat de Kairouan. Etude de faisabilité du périmètre de Bled Abida. . CRDA de Kairouan, Tunis.
- Scherrer, B. (1984). *Biostatistique*. Gaëtan Morin éditeur, Paris.
- Sebillotte, M., et Soler, L.-G. (1990). Les processus de décision des agriculteurs - Première partie : Acquis et questions vives. In : *Modélisation systémique et système agraire - Décision et organisation* (J.Brossier, B.Vissac et J.-L.Lemoigne, eds.), pp. 93-101. INRA.
- Sebillotte, M., et Soler, L.-G. (1998). Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *Comptes rendus de l'académie d'Agriculture de France* 74: 59-70.

- Selmi, S. (1996). Interventions de l'Etat en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare - Les lacs collinaires dans le semi-aride Tunisien. Thèse de Doctorat, ENSAM, Montpellier.
- Serageldin, I. (1995). Water Resources Management : a New Policy for a Sustainable Future. *Water Resources Development* 11: 221-232.
- SOTINFOR-SERAH (1988). Schéma régional d'aménagement du gouvernorat de Kairouan - Rapport de 1ère phase Bilan-diagnostic. . Ministère du Plan - Commissariat Général au développement régional et à l'aménagement du Territoire, Tunis.
- Strosser, P. (1997). Analyzing Alternative Policy Instruments for the Irrigation Sector-An assesment of the Potential for Water Market Development in the Chishtian Sub-division, Pakistan. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- Tchamba, A. K. (2000). La modélisation économique des exploitations sur le GIC de El Melalsa. Projet de fin d'étude. INAT, Tunis.
- Teerink, J. R., et Nakashima, M. (1996). Water Allocation, Rights, and Pricing - Examples from Japan and the United States. Technical Paper, 198. World Bank, Washington, D.C.
- Tolentino, A. S. (1996). Legal and institutional aspects of groundwater development in the Philippines. In : *Water Policy : Allocation and Management in Practice* (P. H. a. R. C. Carter, ed.), pp. 283-289. E & FN SPON, Cranfield University.
- Trabelsi, M. (1976). L'exode rural et son impact sur le développement des villes régionales : l'exemple de Kairouan. *Revue Tunisienne des Sciences Sociales* 44: 147-171.
- Trabelsi, M. (1979). Développement rural et promotion du secteur agricole dans le Kairouanais. *Revue Tunisienne des Sciences Sociales* 56-57: 83-123.
- Treuil, J.-P., et Mullon, C. (1996). Expérimentation sur mondes artificiels : pour une réflexion méthodologique. In : *Colloque du programme Environnement du CNRS : Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement* (F. Blasco, ed.). Elsevier, La Villette.
- Treyer, S. (1999). Politiques de gestion de l'eau en Tunisie. Draft - Première version du profil pays pour le Plan Bleu. ENGREF, Paris.
- Turton, A. R. (1999). Water scarcity and social adaptative capacity : towards an understanding of the social dynamics of water demand management in developping countries. Water Issues Study Group. . School of Oriental and African Studies (SOAS).
- Unité régionale de suivi et d'évaluation des périmètres irrigués (1998). Rapport de suivi et d'évaluation des périmètres publics irrigués de Kairouan. CRDA de Kairouan, Kairouan.
- Verbeek, M., Post, H., Pouwels, I., et Wind, H. (1996). Policy Analysis for Strategic Choices in Integrated Water Management. *Water Science and Technology* 34: 17-24.
- Villarroya, F. (1994). Regulatory issues mainly about aquifer over-exploitation within the scope of sustainable development. In : *Future Groundwater at Risk*, Vol. 222, pp. 389-401. IAHS, Helsinki.
- Weber, J. (1995). Gestion des ressources renouvelables : fondements théoriques d'un programme de recherche. mimeo. CIRAD, Paris.
- Weisbuch, G. (2000). Environment and institutions : a complex dynamical systems approach. *Ecological Economics* 34: 381-391.
- Wimpenny, J. (1994). Managing water as an economic resource. Overseas Development Institute, London.

- Xepapadeas, A. (1996). Quantity and quality management of groundwater : an application to irrigated agriculture in Iraklion, Crete. *Environmental Modeling and Assessment* 1: 25-35.
- Zubari, W. K., Mubarak, M. A., et Madany, I. M. (1993). Development Impacts on Groundwater Resources in Bahrain. *Water Resources Development* 9: 263-279.

ANNEXES

Annexe 1 : Zone d'étude

1.a. Carte de la nappe de Kairouan - Situation des piézomètres et isopièzes	299
1.b. Carte de la zone d'étude : limites administratives	300
1.c. Carte de la zone d'étude : situation des PPI	301
1.d. Carte de la zone d'étude : profondeurs d'accès à l'eau	302
1.e. Exemples de relevés piézométriques sur la zone d'étude	303

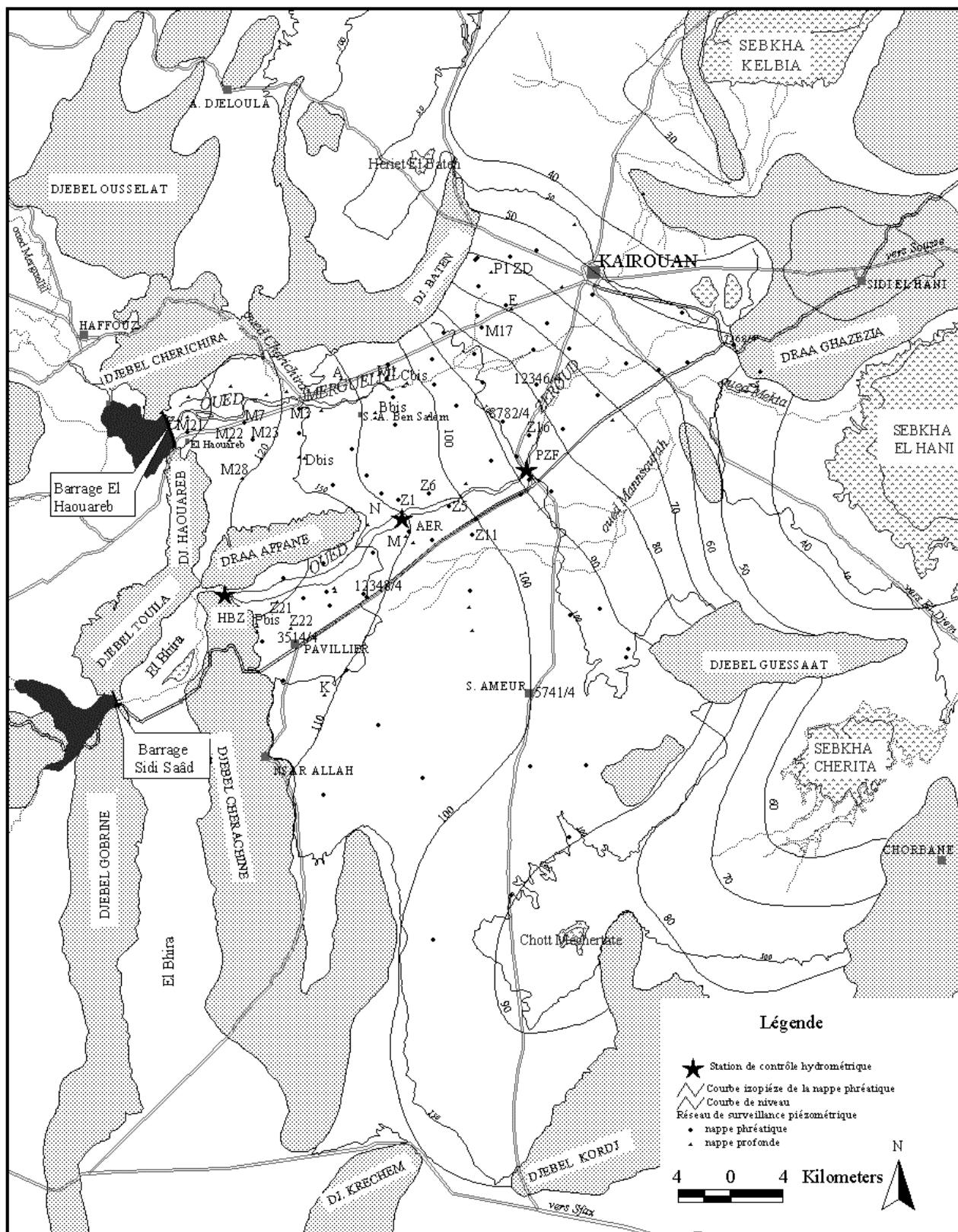
Annexe 2 : Enquêtes

2.a. Formulaire de l'enquête préliminaire	304
2.b. Formulaire de l'enquête statistique	306
2.c. Tests de cohérence des résultats	313
2.d. Résumé des enquêtes approfondies	316
2.e. Quelques images	318

Annexe 3 : Modèle SINUSE

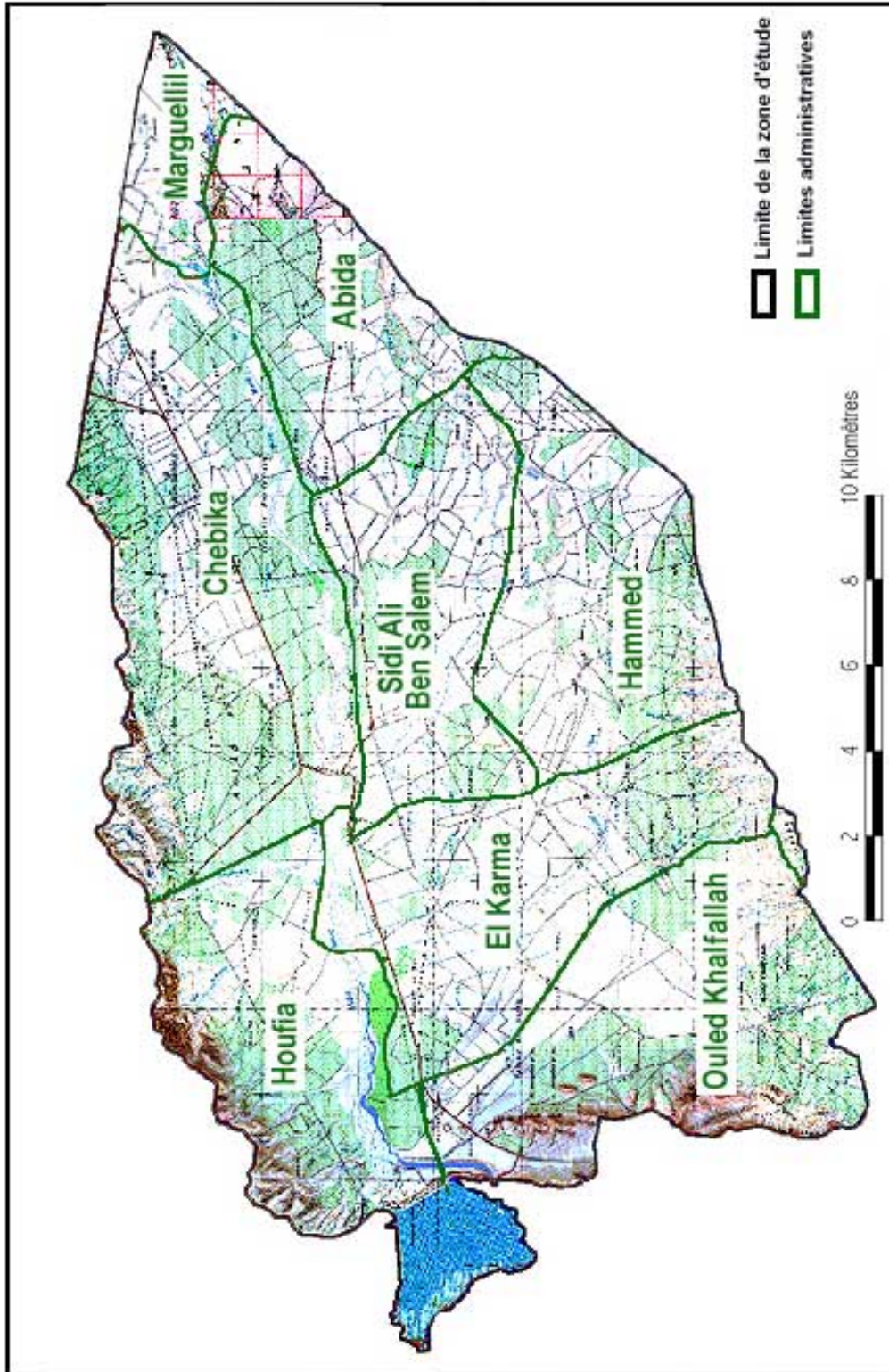
3.a. Diagramme de séquence détaillé du modèle	319
3.b. Diagrammes d'activité des méthodes modélisées	320
3.c. Interfaces spatiales : PPI, nappe, strates agraires et exemple de distribution initiale des puits.	332
3.d. Paramètres du modèle	333
3.e. Aléas sur les cultures maraîchères et sur la valorisation de l'épargne	334
3.f. Probabilité d'échec à la construction et à l'approfondissement d'un puits	334
3.g. Corrélation entre coûts de l'eau et profondeur	334
3.h. Calcul des marges brutes	335
3.i. Fiches technico-économiques des cultures	336
3.j. Initialisation des exploitations	343
3.k. Lien entre dépenses familiales et revenus	344
3.l. Diversification des revenus	344

Annexe 1.a : Carte de la nappe de Kairouan. Situation des piézomètres et isopièzes
 Source : Nazoumou (2000)



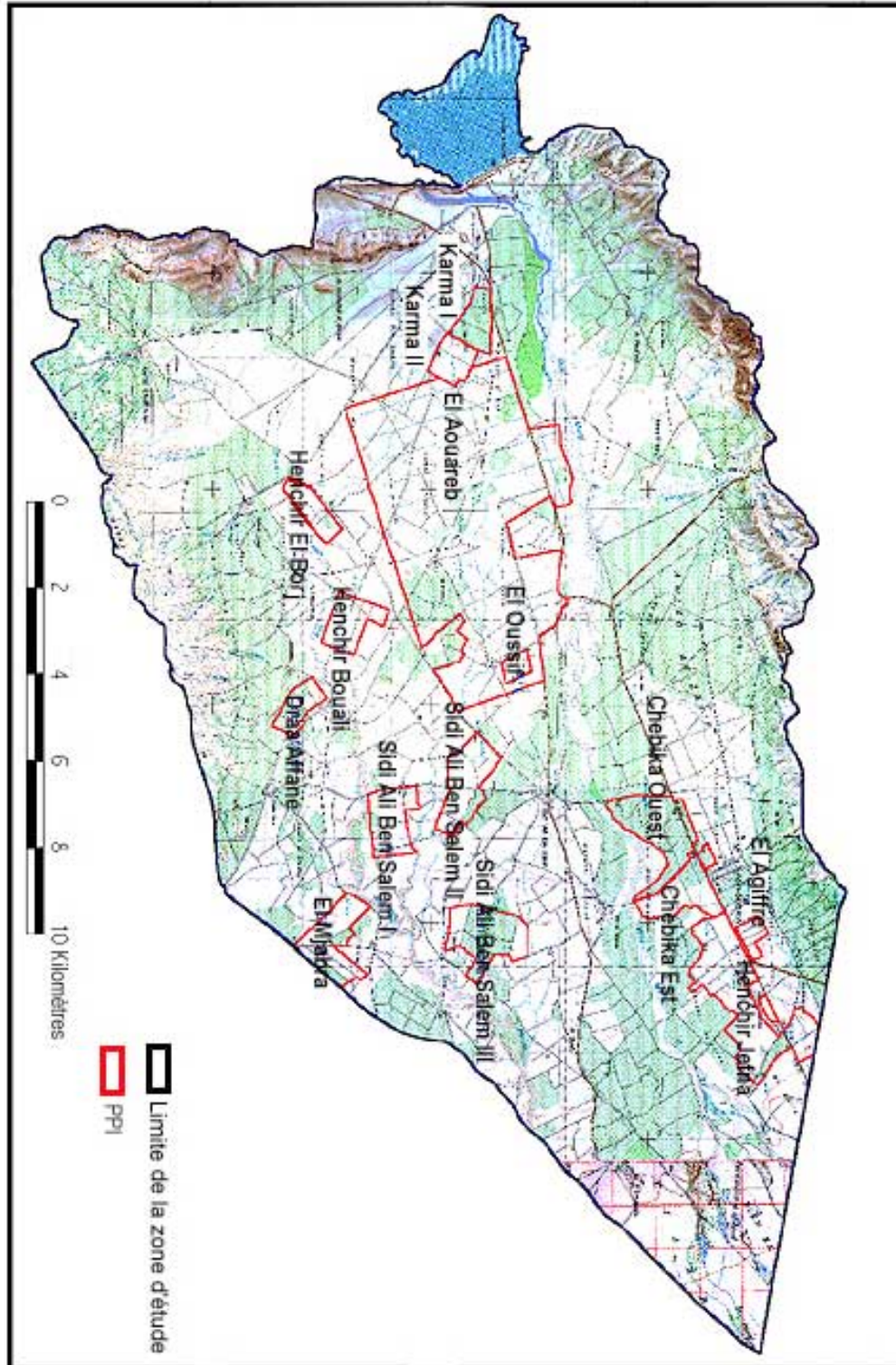
Annexe 1.b : Carte des limites administratives de la zone d'étude

Source : MERGUSIE



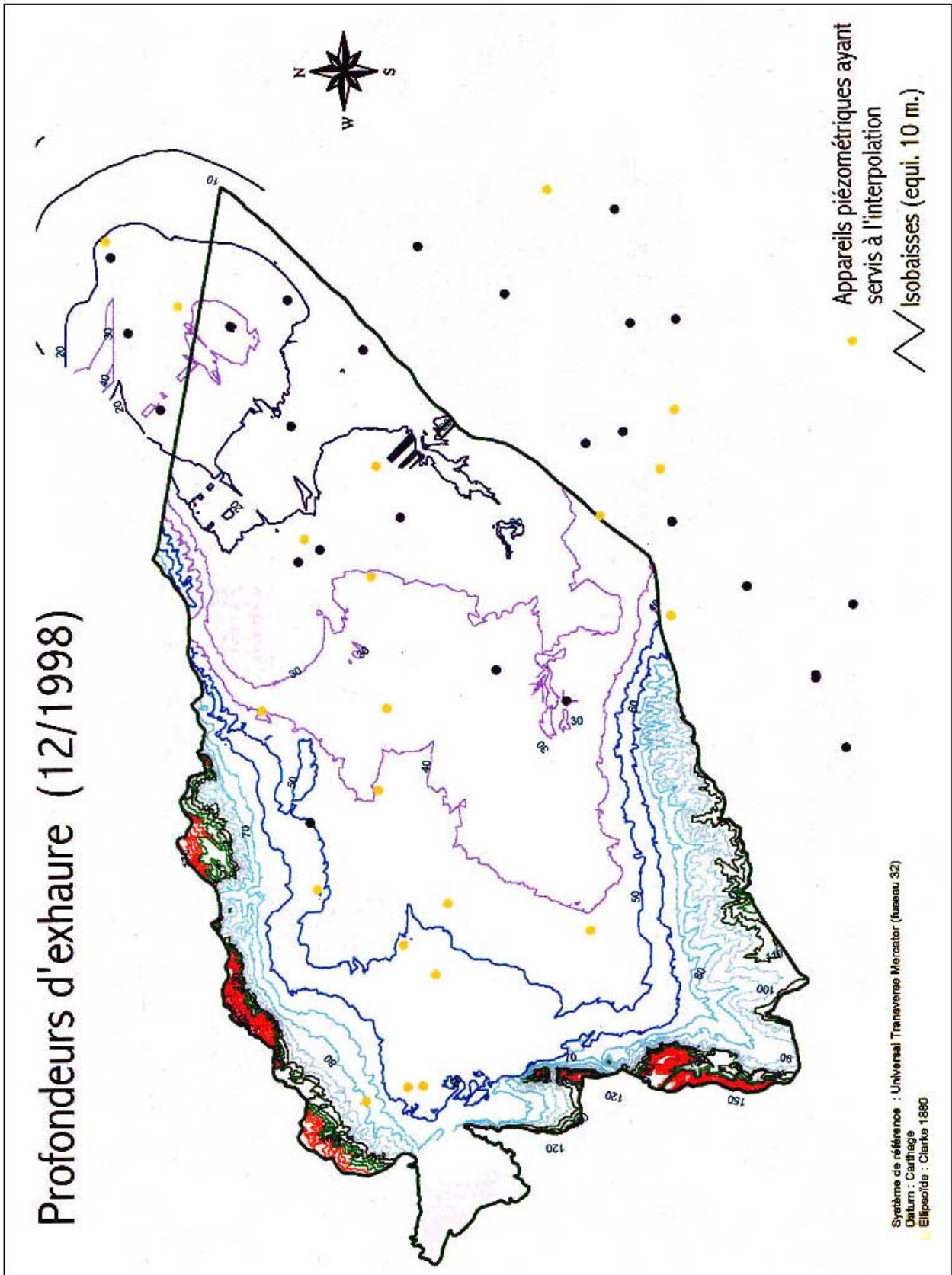
Annexe 1.c : Carte des PPI de la zone d'étude

Source : MERGUSIE



Annexe 1.d : Carte des courbes isoprofondurs de la zone d'étude

Source : MERGUSIE



Annexe 1.e. Exemples de relevés piézométriques sur la zone d'étude

La figure 1 montre l'évolution des niveaux de profondeur de l'eau relevés dans 6 piézomètres de la zone d'étude, pour la plupart "profonds", sauf M17 qui est classé par le CRDA comme "piézomètre de surface".

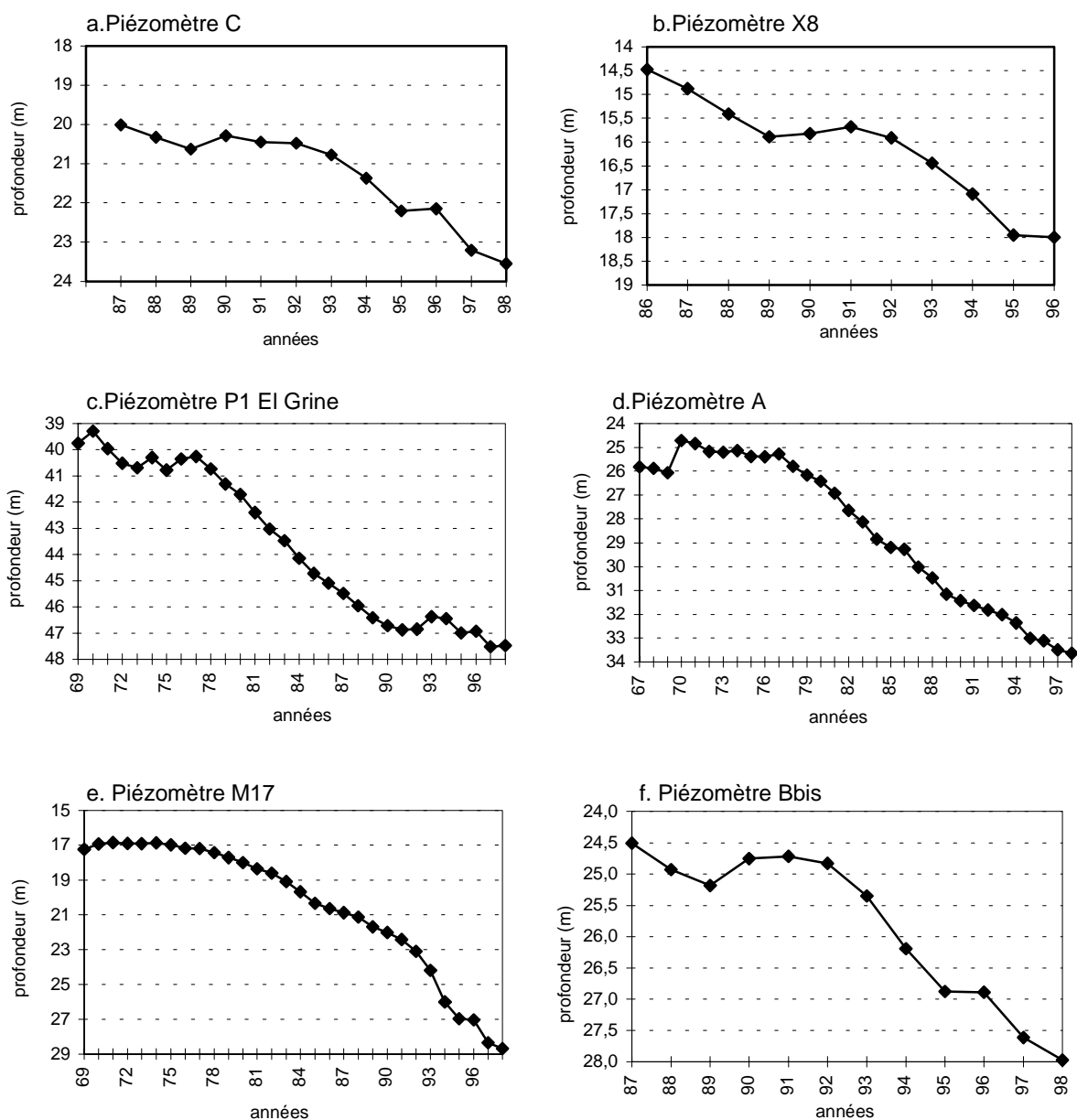


Fig. 1 : 4 exemples de relevés piézométriques dans la zone d'étude.
Source : CRDA. Base de données de Béboulé (1996).

Annexe 2.a : Formulaire de l'enquête préliminaire

FORMULAIRE-TEST D'ENQUETE AUPRES DES RESPONSABLES D'EXPLOITATION	
Date de l'enquête :	Situation géographique (points de repère, zone, secteur)
Nom du responsable d'exploitation : Age : origine géographique :	niveau d'instruction (analphabète, 1r, 2r, sup) : Avez-vous une autre activité ?
Caractéristiques générales de l'exploitation	
Date d'installation sur cette exploitation : Activité antérieure et motif du changement d'activité : situation familiale : Nb de personnes vivant sur l'exploitation (dont main d'œuvre utile) Employez-vous de la main d'œuvre permanente salariée ? (salaire): Employez-vous de la main d'œuvre temporaire (nb max, paye) :	
Quels sont les accès à l'eau dont vous disposez (aucun, puits, forage, PPI, émergence) :	
Parcelles en PPI	
De quel PPI s'agit-il ?	Surface de la parcelle :
Etes-vous propriétaire ou locataire ? Etiez-vous là avant l'aménagement ? Si oui que cultiviez-vous avant ? est-ce mieux maintenant ou moins bien ? Sinon avez-vous acheté ou loué à cause de l'aménagement ? Pourquoi ?	-si locataire : modalités, exigences par rapport aux terres recherchés (proximité, point d'eau, prix, connaissance du propriétaire, type de terre) -si propriétaire : achat ou héritage (si achat, prix, année, origine des fonds) individuel ou indivise Avez-vous un titre de propriété ? Avez-vous accès aux crédits et aux subventions ?
Cultures en hiver 96 et en été 97 :	Cultures projetées pour l'hiver 97 et l'été 98 :
Cultivez-vous toute la surface ? Pourquoi ?	Quelle est votre technique d'irrigation ? Y a-t-il des problèmes pour l'irrigation ?
Quel est le système de distribution ? Y a-t-il des problèmes de distribution ?	Avez-vous l'eau à la demande ? Avez-vous un puits privé sur le PPI ?
Recevez-vous la quantité d'eau pour laquelle vous avez payé ?	Y a-t-il possibilité de s'arranger pour la distribution avec l'aigadier ou avec les voisins ?
Commentaire libre sur le PPI (qualité de l'eau, type de sols, organisation, prix...) :	
Description du puits (ou forage) privé	
Type de captage (puits ou forage)	Partagez-vous ce puits ? Selon quelles modalités ?
Profondeur (puits + sondages)	Date de construction
Avez-vous approfondi ? Quand et pourquoi ?	Prix de l'ouvrage (puits + sondage) Origine des fonds
Comment avez-vous choisi son emplacement ?	Le niveau de l'eau a-t-il varié depuis la construction ? De combien ?
Le niveau ou le débit change-t-il quand les voisins pompent ? De combien ?	Décrire le système de pompage (type de pompe, prix, puissance, type d'énergie, immergée ou non)
Coût du pompage journalier (+ durée du pompage approximative) en été et en hiver	
Commentaire :	
Cas des motopompes de surface	
Lieu de l'installation	Date de l'installation
Caractéristiques de la moto-pompe (puissance, âge)	Prix et moyens d'achat
Coût du pompage journalier (+durée de fonctionnement) en hiver et en été	Avez-vous des problèmes avec vos voisins ?
Comment vous arrangez-vous avec eux ?	Qu'allez-vous faire si la ressource diminue ?
En cas de revenu exceptionnel, quel sera votre premier investissement (classer les réponses) : -achat de terres PPI -autre motopompe -cheptel -camionnette ou tracteur	Craignez-vous l'administration ? Pourquoi ?

Pour chaque parcelle remplir la fiche suivante :

Parcelles irriguées hors PPI (saison 1996-1997)	
Surface	Propriétaire ou locataire ?
Distance au points d'eau	-si propriétaire : achat (année, prix, moyens) ou héritage individuel ou indivise titre de propriété
Technique de distribution (subventions ?)	accès aux crédits et aux subventions
Technique d'irrigation (subventions, où l'a appris ?)	-si locataire : modalités de location exigences par rapport aux terres louées (prix, proximité, type de sol)
Cultures en hiver 96 et en été 97 :	Cultures projetées pour l'hiver 97 et l'été 98 :
Est-ce que la totalité de la surface est cultivée ? Pourquoi ?	Destination des produits
Que faisiez-vous sur cette parcelle avant d'avoir le point d'eau ?	Avez-vous des projets particuliers sur cette parcelle (autre point d'eau, plantations, vente, location ?)
Commentaire général (problèmes, maîtrise des techniques d'irrigation, changement du système de production)	

Parcelles cultivées en sec pour l'année 1996-1997	
Surface	-si propriétaire : achat (année, prix, moyens) ou héritage individuel ou indivise titre de propriété
Propriétaire ou locataire ?	accès aux crédits et aux subventions -si locataire : modalités de location exigences par rapport aux terres louées (prix, proximité, type de sol...)
Cultures en hiver 96 et en été 97 :	Cultures projetées pour l'hiver 97 et l'été 98 :
Est-ce que la totalité de la surface est cultivée ? Pourquoi ?	Destination des produits
Avez-vous des projets particuliers sur cette parcelle (autre point d'eau, plantations, vente, location ?)	
Commentaire général	

Autres caractéristiques de l'exploitation	
Avez-vous du cheptel ? Combien ?	Pour la vente régulière ou exceptionnelle ?
Avez-vous d'autres revenus que l'agriculture par la famille (tapis, commerce, chantier, fonctionnaire ?)	Sont-ils plus importants que la part provenant de votre exploitation ?
Quand vous avez un revenu (récolte), où le placez-vous ? -banque -cheptel -exploitation -prêt -à la maison	Vous arrive-t-il d'emprunter à la banque ?
Tenez-vous une comptabilité ?	Avez-vous un tracteur ? Par quel moyen l'avez-vous acheté ?
Avez-vous une camionnette ?	Est-ce que votre niveau de vie s'est amélioré ? Grâce à quoi ?

Perception de la ressource (en cas de captage privé)	
D'où vient l'eau que vous captez ?	Les voisins captent-ils la même eau ?
La ressource a-t-elle changé ?	Pourquoi ?
Qu'allez-vous faire si la ressource diminue (allez-vous continuer à approfondir ?)	Comment peut-on empêcher l'eau de diminuer ?

Connaissez-vous des gens dans la région qui ont du abandonner leur puits ?
Pourquoi ?
Commentaire général

Annexe 2.b : Formulaire de l'enquête statistique

Nom enquêteur :	N°enquête :	Imadat :
Date :		Douar :

RÉPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
INAT

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE
DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION
ORSTOM

Enquête « Agriculture et Eau » dans la plaine de Kairouan (Juillet 1998) I-Caractéristiques générales de l'exploitation

1. Nom et prénom *du chef de l'exploitation* interrogé :

Si plusieurs chefs d'exploitation (indivision), préciser le nombre :

2. Origine géographique :

1. D'ici même	2. D'ailleurs (préciser) :
---------------	----------------------------

3. Membres du ménage

Lien de parenté avec le chef d'exploitation interrogé	âge	formation (0,1,2,3)	activité au sein de l'exploitation (0,1,2)	activité extérieure à l'exploitation (préciser le type d'activité et le nombre de mois par an)
Le chef d'exploitation				

4. Membres de la petite famille (parents, enfants, frères, soeur) vivant *hors du ménage* ayant une activité *non agricole*

Lien de parenté avec le chef d'exploitation	Activité (préciser le type d'activité et le nombre de mois par an)

5. Employés : nombre de...

a. salariés <i>permanents</i> dans l'exploitation :	b. <i>journaliers</i> en période de pointe de travail :	
---	---	--

6. bénéficiez-vous d'aide familiale sur l'exploitation en dehors du ménage ? oui [] non []

7. Matériel employé pour l'exploitation	en propriété	donné en location	donné en association	pris en association	pris en location	pas d'utilisation
a. nombre tracteur						
b. nombre moissonneuse						
c. nombre camionnette						

8. Elevage dans l'exploitation

Nombre de têtes de femelles adultes actuellement :	bovins (vaches)	ovins (brebis)	caprins (chèvre)

II-Les parcelles de l'exploitation

A. Les parcelles en propriété exploitées directement

N°	S	indivision i avec le nb de co- indivis aires	Local. (Nom douar)	Cultures de l'été 97 à l'hiver 97-98 écrire le nom de chaque culture, suivi du nb d'ha (ex : melon3) si la culture est en intercalaire avec des oliviers : melon-ol 3 si la culture est en intercalaire avec d'autres arbres : melon-arb 3 Pour les cultures maraichères (pastèque, melon, tomates, piments, pommes de terre, etc.), rajouter PRIM ou AS si primeur ou arrière-saison	Irrigation	
					Technique irrigation gravitaire (gr) aspersion (a) goutte à goutte(g)	Origine de l'eau puits (p) PPI , AIC forage (f) oued (o)
a.	b.	c.	d..	e.	f.	g.
pds1						
pdsn						

B. Les terres vendues par l'exploitant

N° d'ordre	surf (ha)	localisation (douar)	année de vente	Irrigation : 0,PPI:1,privé:2	cause de la vente
a.	b.	c.	d.	e.	f.
pv1					
pvn					

C. Les parcelles données en association ou en location

1. Si l'agriculteur donne des terres en association ou en location, remplir le tableau suivant :

N°	surf (ha)	location (l) ou associatio n (a) préciser	(Nom douar)	Cultures de l'été 97 à l'hiver 97- 98 Préciser simplement : oliviers, autres arbres, céréales, maraîchage	Irrigation	
					Technique irrigation gravitaire (gr) aspersion (a) goutte à goutte (g) f.	Origine de l'eau puits (p) PPI , AIC forage (f) oued (o)
a.	b.	c.	d..	e.	f.	g.
pdo1						
pdon						

2. Parmi ces parcelles, y en a-t-il où l'associé a creusé un puits : non oui, lesquelles :

D. Les parcelles prises en association ou en location

1. Prenez-vous des terres en association ou en location ? oui non

si non répondez aux questions 1 et 2 puis passez au chapitre III ; si oui, aller à la question 3.

1. Pourquoi n'en prenez-vous pas :	a. trop cher		c. pas d'eau pour irriguer	
	b. pas d'offre en terre à proximité		d. assez de travail sur sa terre	
2. En avez-vous déjà pris avant ?	a. oui		b. jamais	

3. depuis quelle année prenez-vous des parcelles en association ou en location :

4. Description des parcelles prises en association ou location :

N° d'ordre	Surface (ha)	Localisation de la parcelle (douar)	Lieu de résidence du propriétaire	Cultures de l'été 97 à l'hiver 97-98 écrire le nom de chaque culture, suivi du nb d'ha si la culture est en intercalaire avec des oliviers si la culture est en intercalaire avec d'autres arbres :melon-arb 3 Pour les cultures maraichères (pastèque, melon, tomates, piments, pommes de terre, etc.), rajouter PRIM ou AS si primeur ou arrière-saison	Durée du contrat et type: association (a) (préciser) ou location (l)	si irrigation	
						technique d'irrigation (gr) aspersion (a) goutte à goutte (g)	Origine de l'eau avec la terre (t) ou apportée de l'extérieur (ext)
a.	b.	c.	d.	e.	f.	g.	h.
pas 1							
pas 2							

5. Parmi ces parcelles, il y en a où vous avez creusé vous-mêmes un puits : non oui, lesquelles :

6. En dehors de ces parcelles, avez-vous déjà pris des terres en association où vous avez creusé un puits: non oui

III. Caractéristiques de l'exploitation au départ

1. Depuis quelle année êtes-vous le chef de cette exploitation ?

2. Décrire la situation de l'exploitation au moment où il est devenu chef d'exploitation grâce au tableau suivant :

	Situation à l'installation	Achat, héritage ou don
a. Nombre de personnes dans le ménage		
b. Surface totale en propriété (ha)		
c. Surface exploitée individuellement (ha)		
d. Surface en PPI (ha)		
e. Surface exploitée en métayage ou location		
f. Surface totale irriguée		
g. Production végétale principale		
h. Nombre total de bêtes femelles (bovins ovins caprins)		
j. Nombre de tracteurs		
k. Nombre de camionnettes		
l. Nombre de moissonneuses		
m. Nombre de puits (et/ou sondages)		

IV.L'Irrigation

A.Si l'agriculteur n'irrigue pas:

- 1..pourquoi n'irriguez-vous pas :.....
- 2.Avez-vous déjà irrigué : non oui
- 2.1Si oui, date de l'arrêt :.....
- 2.2.et cause :.....
- 2.3.Avez-vous déjà abandonné un puits ? non oui
- 2.4.Projetez-vous de faire un puits sur votre terre dans les 5 prochaines années ? non oui

B.Si l'agriculteur irrigue :

Remplir la fiche "Origine de l'eau" avant de passer au chapitre V

V.Mode de financement le plus couramment utilisé

1.Pour financer les dépenses de la campagne agricole (semences, engrais, labour, eau; gazoil...)cocher la ou les réponse(s)

a.revenu agricole	c.aide d'un parent ou crédit familial	e.crédit de campagne de l'Etat
b.revenu extra-agricole	d.crédit du fournisseur	f.emprunt bancaire
g.crédit privé	h.autre (préciser) :	

- 2.Placez-vous votre argent à la banque : oui non
- 3.Avez-vous des titres bleus sur vos parcelles : non pour quelques-une pour toutes
- 4.Niveau d'endettement
- | | | |
|--------------|----------------|--------------|
| pas de dette | un peu endetté | très endetté |
|--------------|----------------|--------------|

Fiche Origine de l'Eau (puits, forages, PPI, motopompes de surface)

A1.Précisions sur les puits de l'exploitation :

Décrire chaque puits grâce aux fiches puits ci-dessous et répondre aux questions :
Pour désigner les parcelles, reprendre les codes prédéfinis des tableaux "parcellaire"

1.Puits 1 si autres puits cf. fiche identique au verso	
a.Emplacement : parcelle n°.....	f.Nombre de pompes :.....
b.Parcelles irriguées : n°.....	g.énergie : électricité <input type="checkbox"/> ou gazoil <input type="checkbox"/>
c.Date construction :.....	h.pompes : arabes <input type="checkbox"/> américaines <input type="checkbox"/> électropompes <input type="checkbox"/>
d.Profondeur du puits :.....m	i.Ce puits est-il partagé (hors indivision) ? non <input type="checkbox"/> oui, à combien :
e.Nombre de sondages à bras :	j.A-t-il été partagé au début ? non <input type="checkbox"/> oui, à combien :

k.Moyens de financement du puits (subvention, prêt, revenu agricole, crédit, revenu extra-agricole, aide familiale..) :

l.surface irriguée par le puits :.....ha

m.avez-vous diminué les prélèvements en eau de ce puits ? non oui, pourquoi :.....

Si oui, avez-vous : diminué la surface irriguée à partir du puits, changé de culture, changé de système d'irrigation?

n.avez-vous augmenté les prélèvements en eau de ce puits ? non oui, pourquoi :.....

Si oui, comment avez-vous fait (changement de pompe, autre sondage, changement de moteur...) :.....

p.Avez-vous cultivé des pastèques la première année d'utilisation du puits ? oui non

A.2. Dans le passé :

Avez-vous :	non	oui : combien	cause
1. Abandonné un (des) puits			
2. Donné en association ou loué un (des) puits			

A.3. Réactions en cas de changements

Mise en situation dans 5 ans (scénario)

<p>La nappe a beaucoup baissé, il faut donc approfondir encore les puits, faire de nouveaux forages à bras, changer de pompe et de moteur, et le coût du pompage augmente (plus de gasoil consommé, plus de matériel investi). Il est difficile de trouver encore des terres neuves pour faire de la pastèque. Le prix des cultures a baissé avec l'ouverture des marchés.</p>	<p>Dans cette situation, que faites-vous ? (j'intensifie l'irrigation, j'arrête l'irrigation, je loue mon puits, j'e passe au goutte à g , j'électrifie mon puits...)</p>
---	--

B. Précisions sur les forages privés de l'exploitant

1. Décrire chaque forage privé grâce aux fiches forages

1.1. Forage 1	1.2. Forage 2
a. Emplacement : parcelle n°.....	a. Emplacement : parcelle n°.....
b. Parcelles irriguées n°.....	b. Parcelles irriguées : n°.....
c. Date de construction :.....	c. Date de construction :.....
d. Profondeur :.....m	d. Profondeur :.....m
e. Energie : gazoil <input type="checkbox"/> électrique <input type="checkbox"/>	e. Energie : gazoil <input type="checkbox"/> électrique <input type="checkbox"/>
f. Ce forage est-il partagé ? oui <input type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/>	f. Ce forage est-il partagé ? oui <input type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/>
g. Surface irriguée par ce forage :.....ha	g. Surface irriguée par ce forage :.....ha

2. Moyens de financement du forage (subvention, prêt, revenu agricole, crédit, revenu extra-agricole, aide familiale..) :

3. avez-vous diminué les prélèvements en eau de ce forage ? non oui, pourquoi :.....

Si oui, avez-vous : diminué la surface irriguée à partir du puits, changé de culture, changé de système d'irrigation?

4. Avez-vous cultivé des pastèques la première année d'utilisation du forage? oui non

.Précisions sur les parcelles en PPI (ou en AIC)

Pour chaque PPI différent dans lequel vous exploitez des parcelles :

<p>1. Nom du PPI :.....</p>
<p>a. Parcelles dans ce PPI n°:.....</p>
<p>b. Irriguez-vous avec l'eau du PPI hors du PPI : non <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/></p>
<p>c. Si oui, parcelles concernées n°.....</p>

d. Avez-vous diminué la surface irriguée sur ces parcelles ? non oui, pourquoi :
Si oui, avez-vous : diminué la surface irriguée à partir du puits, changé de culture, changé de système d'irrigation ...?
e. irriguez-vous tous les étés ? oui non, pourquoi :.....

D. Précision sur les motopompes de surface

1. Nombre de motopompes :.....

2. Nom(s) du (ou des) oued(s) capté(s) :.....

2. Avez-vous diminué vos prélèvements dans l'oued ? non oui , pourquoi :.....

Si oui, avez-vous : diminué la surface irriguée à partir du puits, changé de culture, changé de système d'irrigation?

Annexe 2.c : Tests de cohérence des enquêtes statistiques

La fiabilité du sondage a été testée par la comparaison de 4 types de variable aux données disponibles sur la zone : la surface totale de la zone, le nombre d'agriculteurs pratiquant une spéculacion donnée, la reconstitution des volumes annuels extraits des puits, la répartition de la population agricole par type d'accès à l'eau.

* Surface agricole

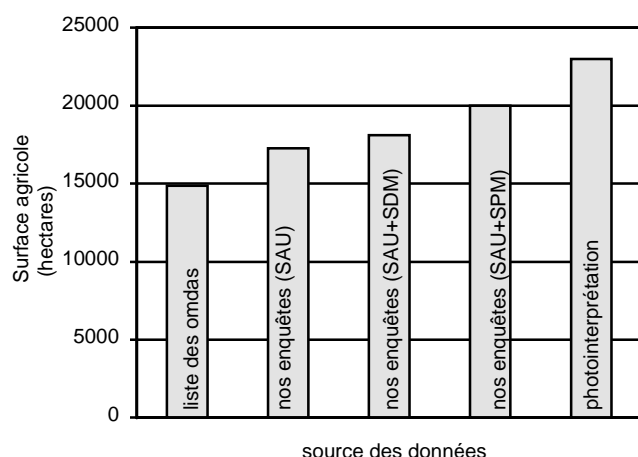


Fig. 2 : Comparaison de la surface agricole estimée à partir des enquêtes à plusieurs sources de données. SAU= Surface Agricole Utile ; SDM = Surface donnée en métayage ; SPM= surface prise en métayage

On dispose de trois sources de données

- la liste des omdas qui donne la surface de chaque exploitation (sans préciser si c'est la surface exploitée, la surface en propriété, ou la combinaison des deux) ;
- les enquêtes (avec au contraire 3 possibilités : la surface exploitée en faire valoir direct, la surface exploitée en faire valoir direct et indirect, la surface en propriété y compris celle donnée en faire valoir indirect ou FVI) ;
- la planimétrie de la surface cultivée (y compris les parcelles en jachère travaillée) réalisée à partir des photos aériennes de 1990.

Le tableau 1 donne le détail de cette comparaison pour chaque strate agricole enquêtée :

Tab. 1 : Détail des surfaces exploitées par strate agricole. SAU=surface agricole utile. SDM=surface donnée en métayage. SPM=surface prise en métayage.

Strate		liste omdas	enquêtes		
			SAU	SAU+SDM	SAU+SPM
S1	somme	7998	7977	8310	9307
	moyenne	7	7,5	8,4	8,3
	écart type	8	6,9	8,3	8
S2	somme	3618	3429	4009	4299
	moyenne	7	7,1	8,3	8,9
	écart type	9	7,8	8,4	9
S3	somme	1061	2184	2226	2329
	moyenne	5	10,5	10,7	11,2
	écart type	4	5,4	5,5	5,4
S4	somme	2171	3498	3498	3947
	moyenne	7	11,7	11,7	13,2
	écart type	7	13,5	13,5	14,4
Total	somme	14848	17269	18111	20007
	moyenne	7	8,2	8,6	9,5
	écart type	9	8,2	8,3	9,2

La comparaison de ces données et des connaissances acquises sur terrain conduit à penser que :

- la surface donnée par les omdas correspond seulement à celle exploitée en faire valoir direct (FVD) ;

- la SAU donnée par la photo interprétation correspond à la surface exploitée en FVD et en FVI (elle comprend notamment la surface des propriétaires non-résidents, qui ne sont pas inclus dans les listes des omdas, et donnent leur terre en FVI) ;
- Il est difficile de tenir compte des inévitables effets de bord¹, qui ont également un impact sur ces comparaisons ;
- Les données des enquêtes sont assez fiables en terme de structure des exploitations.

* Nombre de producteurs pratiquant différents types de spéculations

Comme le montre la figure 3 qui ne prend plus en compte des surfaces mais des effectifs, les données des enquêtes sur les productions concordent relativement bien avec celles fournies par les listes des omdas, ce qui permet de penser que le sondage est également représentatif sur ce plan-là.

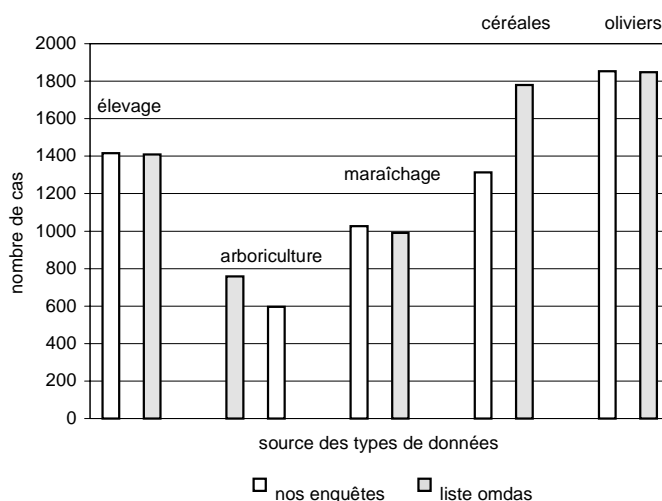


Fig. 3 : Comparaison du nombre d'exploitants concernés par les grands types de spéculations agricoles, estimé par les enquêtes, aux données fournies par l'inventaire des omdas.

Ces deux tests montrent que l'échantillon est représentatif des exploitations de la zone d'étude. Le détail de cette comparaison par strate est donné par le tableau 2.

Tab. 2 : Comparaison par strate agricole du nombre d'exploitants concernés par les grands types de spéculations agricoles, estimé par les enquêtes, aux données fournies par l'inventaire des omdas.

Strates	élevage		arboriculture		maraîchage		céréales		olivier	
	enq.	Omda	enq.	omda	enq.	omda	enq.	omda	enq.	Omda
S1	794	782	495	315	399	379	719	890	1056	1061
S2	286	280	39	148	315	342	237	416	375	393
S3	155	192	106	35	121	84	169	188	160	184
S4	181	156	118	99	190	186	190	287	263	210
Total	1416	1410	758	597	1025	991	1315	1781	1854	1848

Cette comparaison confirme la bonne représentativité du sondage.

* Cohérence de la consommation annuelle des puits reconstituée par rapport aux débits mesurés

Les prélèvements annuels des 82 puits relevés par le sondage ont été estimés à partir des cultures déclarées, et de l'estimation de la demande en eau :

¹ des parcelles en bordure de zone peuvent appartenir à des agriculteurs hors-zone

- hormis les puits partagés à plusieurs, qui sont en général suréquipés, un puits seulement donne un prélèvement aberrant (supérieur à 100 000 m³/an, ce qui correspond à un débit de 10 l/s², 10 heures par jour pendant 275 jours)
- sans compter ce cas aberrant, les prélèvements annuels sont en moyenne de 36 000 m³/an environ, et vont de 6000 à 87 000 m³/an ; les ¾ des prélèvements étant inférieurs à 21 000 m³/an.
- par ailleurs l'analyse détaillée des assolements a permis de repérer les demandes de pointe (compte tenu des demandes en eau des cultures et des surfaces occupées), qui sont cohérentes avec les débits moyens donnés par nos mesures.

Ces estimations concordent avec les données trouvées par ailleurs au CRDA, et avec les estimations des enquêtes approfondies qui reposent sur une mesure du débit et la description par les exploitants de leur calendrier d'irrigation.

* Répartition des agriculteurs par type d'accès à l'eau

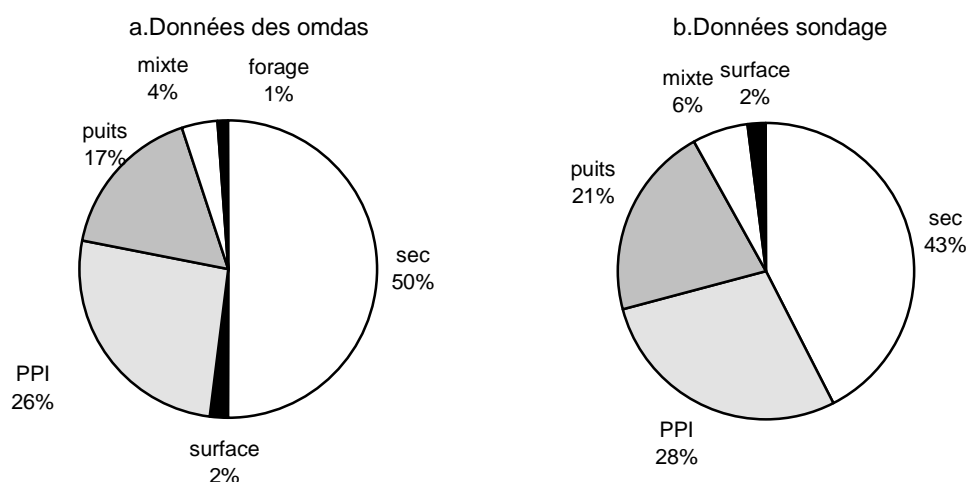


Fig. 4 : Comparaison de la répartition de la population agricole par type d'accès à l'eau estimée par les enquête avec celle issue de l'inventaire des omdas.

La figure 4 confirme la bonne représentativité des enquêtes, et montre que le nombre de puits estimé par les enquêtes est supérieur à celui issu des listes des omdas. Ceci est confirmé par le tableau 3, qui compare le nombre de puits par strate agricole estimé par le sondage, à celui déclaré par les omdas.

Tab. 3 : Comparaison du nombre de puits par strate agricole estimé par les enquêtes à celui déclaré par les omdas.

Strates	liste des omdas	enquêtes
S1	34	112
S2	129	145
S3	93	125
S4	173	299
Total	429	632

Cette comparaison montre que les ordres de grandeurs relatifs sont les mêmes, et que l'écart provient surtout des strates S1 et S4.

² C'est le débit maximal observé dans nos enquêtes et celles de (Ben Hamouda, 1999) ; les ¾ des puits donnant un débit inférieur à 6 l/s

Annexe 2.d : Résumé des enquêtes approfondies

Parmi les 40 enquêtes préliminaires, 11 ont été choisies pour être poursuivies de manière approfondie. Le tableau 4 résume brièvement les caractéristiques de ces 11 enquêtes (les numéros de ces enquêtes correspondent à leur numéro d'origine).

Tab. 4 : Résumé des enquêtes approfondies. SDM=surface donnée en métayage. SPM : surface prise en métayage

N°	Résumé
E4	B. est avec son frère chef d'une exploitation de 6 ha composée de 3 parcelles et dotée d'un puits fonctionnel. La parcelle (a) de 1 ha est cultivée en céréales en sec. La parcelle (b) de 2,5 ha est plantée en oliviers. La parcelle (c) de 5 ha, exploitée avec des cousins, est plantée en maraîchage. Trois des frères de B. amènent un revenu extérieur fixe. Un puits a été construit sur la parcelle (a) en 1996, à partir de la vente de bétail et d'emprunts familiaux, mais n'a pas fonctionné pour cause d'ensablement du forage à bras. Un autre puits a été construit en 1998 en association sur la parcelle (c), grâce à la vente de bétail et au crédit fournisseur. Il va rechercher des terres à prendre en FVI. L'objectif de B. a été d'avoir accès à l'irrigation, surtout à partir du moment où des puits ont commencé à se construire dans le voisinage. B. a un troupeau de 40 ovins.
E6	H. gère avec son frère une exploitation de 15 ha, composée de 4 parcelles et dotée de 2 puits fonctionnels. La parcelle (a) de 3 ha, est cultivée en orge (en sec) l'hiver. La parcelle (b), de 9 ha, est entièrement cultivée en blé l'hiver (en sec, avec une petite irrigation d'appoint) et partiellement en pastèque, l'été (sur 3 ha), irriguée par un puits ancien, partagé avec l'oncle de H. La parcelle (c), de 3 ha, dans le PPI de Chébika, est entièrement plantée en oliviers (menés en sec). La parcelle (d), de 3 ha, en PPI, vient d'être donnée en FVI. Auparavant elle était cultivée en céréales en sec. Une parcelle de 5 ha est prise en FVI pour un an, irriguée à partir du puits situé sur la parcelle (a) et cultivée en maraîchage et en céréales. H. et son frère ont également un troupeau de 65 ovins. Ils ne placent pas leur argent à la banque. Ils ont 3 frères qui travaillent hors du ménage, et peuvent leur prêter de l'argent. H. et son frère cherchent à exploiter toutes les parcelles "vierges" à portée du puits, et enfin irrigueront la parcelle (a). Ils refusent de vendre leurs parcelles, même les moins intéressantes (en PPI). Par contre ils voudraient acheter de la terre et construire un autre puits.
E8	L. dirige avec son père une exploitation de 13 ha, composée de 4 parcelles, et dotée de 2 puits. La parcelle (a), de 4 ha, dotée d'un puits électrifié, est plantée en pommiers et en abricotiers et très partiellement en maraîchage. La parcelle (b), de 7 ha, dotée d'un puits plus ancien, est cultivée en maraîchage et en céréales irriguées. La parcelle (c), de 3 hectares est plantée en oliviers, menés en sec. Enfin, la parcelle (d) est donnée en FVI depuis 3 ans. L. possède 2 vaches qu'il ne vend qu'en cas de besoin. Parfois il prend une terre en FVI qu'il irrigue avec le puits en (a), mais il y a peu d'offres car "ici, tout le monde a un puits et met sa terre en valeur". L'assolement varie peu d'une année sur l'autre mais change d'emplacement grâce à la rotation. L'exploitation est endettée car L. a pris dans le passé une terre en FVI, dotée d'un puits, et la récolte a été perdue à cause d'un problème sanitaire.
E9	M. dirige une exploitation de 2 ha, composées de 2 parcelles en PPI. La parcelle (a), de 0,5 ha, est cultivée en piments, tandis que la parcelle (b) est plantée en oliviers, avec du maraîchage en intercalaire quand la trésorerie le permet. Elle a été achetée par M. Parallèlement, M. prend 4 parcelles en FVI. La parcelle (c), de 2 ha, en PPI est cultivée en orge. La parcelle (d), de 6 ha, en PPI, est partiellement cultivée en céréales et en fèves. La parcelle (e), de 9 ha, est partiellement cultivée en blé. Enfin la parcelle (f), de 45 ha, est partiellement cultivée en céréales en sec. Il est prévu que le propriétaire y construise un puits. En PPI M. ne cultive pas la pastèque à cause des problèmes de tour d'eau, mais aussi car la terre est fatiguée. Il ne cultive pratiquement plus en été depuis 10 ans car l'eau est trop chère dans le PPI.
E11	K. dirige une exploitation de 7 ha, composée de 2 parcelles et dotée d'un puits. La parcelle (a), où est le puits, construit grâce à un prêt de l'Etat (Projet de Développement Agricole en 1991), fait 4 ha et est cultivée partiellement en maraîchage. La parcelle (b), de 3 ha, située non loin du puits, est cultivée en maraîchage lorsque (a) est en jachère, et en céréales irriguées en hiver. Cette parcelle a été achetée par K. grâce aux gains du maraîchage. K. prend une parcelle en FVI de temps en temps, qu'il irrigue avec son puits et cultive en maraîchage. A la fin de l'enquête, K. construisait un nouveau puits chez ses frères et son père.

N° | Résumé

E14	S. gère avec son frère une exploitation de 21 ha, composée de 4 parcelles, dont 1 en PPI, et dotée de 2 puits. La parcelle (a), de 6 ha, en PPI, est plantée en oliviers et cultivée en céréales et en fève. La parcelle (b), de 4 ha, dotée d'un puits, est plantée en oliviers. La parcelle (c), de 8,5 ha, dotée d'un puits, est plantée en oliviers, pommiers, abricotiers et poiriers, avec quelques cultures en intercalaire avec l'olivier (blé et maraîchage). La parcelle (d), de 2,5 ha, en partie irriguée par le puits de la parcelle (c), est plantée en oliviers et en pommiers. Par ailleurs S. prend 2 parcelles en FVI : l'une est irriguée par le puits en (b) et cultivée en maraîchage et céréales. L'année suivante il cherchera une parcelle voisine, "reposée", à cultiver de la même manière. L'autre est en PPI et est cultivée en céréales. S. a une dizaine de brebis qu'il fait garder par son voisin, en échange de services. Le premier puits a été construit grâce au fait que S. a travaillé comme jardinier en Syrie pendant quelques années. Maintenant il cherche à utiliser ses puits au maximum, à acheter d'autres terres, et construire un autre puits.
E17	B. a une exploitation de 5,5 ha composée de 3 parcelles. Il n'a pas de puits mais possède deux motopompes de surface qui captent sur l'émergence du barrage. La parcelle (a), de 3 ha est plantée en oliviers et amandiers, et partiellement cultivée en maraîchage grâce à l'eau captée sur l'émergence. La parcelle (b), de 2 ha, n'appartient plus à B. théoriquement (il a dû la vendre à l'Etat suite à la mise en eau du barrage), mais il continue de la cultiver, en maraîchage. La parcelle (c), de 5,5 ha, est cultivée en blé en sec, en indivision avec l'oncle de B. B. prend par ailleurs 3 parcelles en FVI : la parcelle (d) est prise en métayage à une personne de sa famille, et partiellement cultivée en maraîchage, la parcelle (e), de 3 ha, est cultivée en partie en maraîchage et enfin la parcelle (f), en PPI, est prise en FVI, en indivision avec son frère, et cultivée en maraîchage. L'objectif majeur de B. est d'acquérir l'irrigation à long terme pour palier les aléas climatiques. Il ne peut construire de puits car la nappe est très loin, et il n'y a aucun puits dans la zone, mais il voudrait acheter une parcelle en PPI pour s'assurer d'avoir toujours accès à l'irrigation.
E20	S. dirige l'exploitation de son père, de 25 ha, située au pied du Draa Affane, dans une région où la nappe est profonde. L'exploitation est composée d'une parcelle plantée en oliviers et cultivée en blé, en sec. 1 ha de cette parcelle est irrigué grâce à un forage commun, surtout destiné à l'eau potable du village, et cultivé en maraîchage. S. a par ailleurs un petit troupeau d'une dizaine d'ovins. Il a commencé à construire un puits sur sa parcelle un an auparavant, malgré le fait qu'il n'y a aucun puits dans la région, mais il a atteint 70 mètres et "n'a toujours pas trouvé l'eau". "Les voisins attendent de voir le résultat pour suivre l'exemple". Par ailleurs, il a pris une parcelle de 1 ha en FVI chez des voisins, toujours irriguée par le forage collectif, et cultivée en maraîchage.
E21	M. dirige avec son frère une grande exploitation de 100 ha, composée de 9 parcelles groupées, et irriguée par 2 forages. Il s'agit beaucoup plus d'une entreprise agricole qu'une d'une exploitation familiale : 25 ouvriers et techniciens sont employés en permanence, et 40 journaliers en moyenne. M. et H. viennent de Nabeul, d'une famille de grands agriculteurs, et ont acheté en une seule fois ces 100 ha, situés non loin du barrage El Haouareb. Une partie des parcelles est plantée en arbres fruitiers, irrigués au goutte à goutte et à la planche, tandis que l'autre est cultivée en maraîchage (surtout des pastèques primeur, sous serre), et en céréales. En outre, ils prennent 4 parcelles en FVI : une parcelle dotée d'un puits, cultivée en maraîchage, une parcelle en PPI (El Haouareb), cultivée en pastèque sous serre, et deux parcelles éloignées, non dotées d'accès à l'eau et cultivées en céréales en sec.
E34	Y. dirige une exploitation de 5 ha composée de 5 parcelles, dont 2 en AIC. La parcelle (a), de 1 ha, en AIC (AIC El Melalsa, la seule de la zone d'étude au moment de l'enquête), est plantée en olivier et temporairement au repos, tandis que la parcelle (b), de 2 ha, également en AIC, est actuellement cultivée en céréales et en maraîchage. Y. vient de construire un puits en association avec son frère sur une de ses parcelles hors AIC, qui fait 0,5 ha. Il possède par ailleurs 2 autres parcelles de 0,5 ha, à portée du puits. Il vient de prendre une parcelle de 3 ha en FVI en indivision avec son frère, pour l'irriguer par le puits, et la cultiver en maraîchage.
E40	M. partage avec son père la responsabilité d'une exploitation de 35 ha, composée de 3 parcelles, et dotée de 3 puits. Deux de ses frères sont fonctionnaires. Les parcelles (a) et (b), de 10 ha chacune, sont situées près de la maison et dotées d'un puits ; elles sont plantées en pommiers, abricotiers et oliviers, et partiellement cultivées en maraîchage. La parcelle (c), de 15 ha, plus éloignée, est également dotée d'un puits. Une parcelle (d), de 15 ha également, est prise en <i>mouzaraâ</i> , en indivision avec un de ses frères : ils y ont construit un puits et l'exploitent pendant 4 ans en conservant tous les bénéfices de l'exploitation. Deux autres parcelles ont été prises en FVI, mais elles ne sont pas exploitées par M., mais par deux autres frères et son père. Elles sont dotées d'un puits et cultivées en maraîchage et céréales. M. projette de donner une de ses parcelles en FVI et d'en prendre une autre en <i>mouzaraâ</i> .

Annexe 2.e. Quelques images



Photographie N°4: Culture de pastèques dans le PPI El Haouareb. (Cliché S.Feuillette, 1998)



Photographie N°5: Des paysans vendent leurs pastèques en bord de route. (Cliché S.Feuillette, 1998)



Photographie N°6: Un puits sec prolongé par un forage à Bras. (Cliché S.Feuillette, 1998)



Photographie N°7: Un puits sec électrifié prolongé par 2 forages à bras. (Cliché S.Feuillette, 1998)

Annexe 3.a. Diagramme de séquence détaillé du modèle

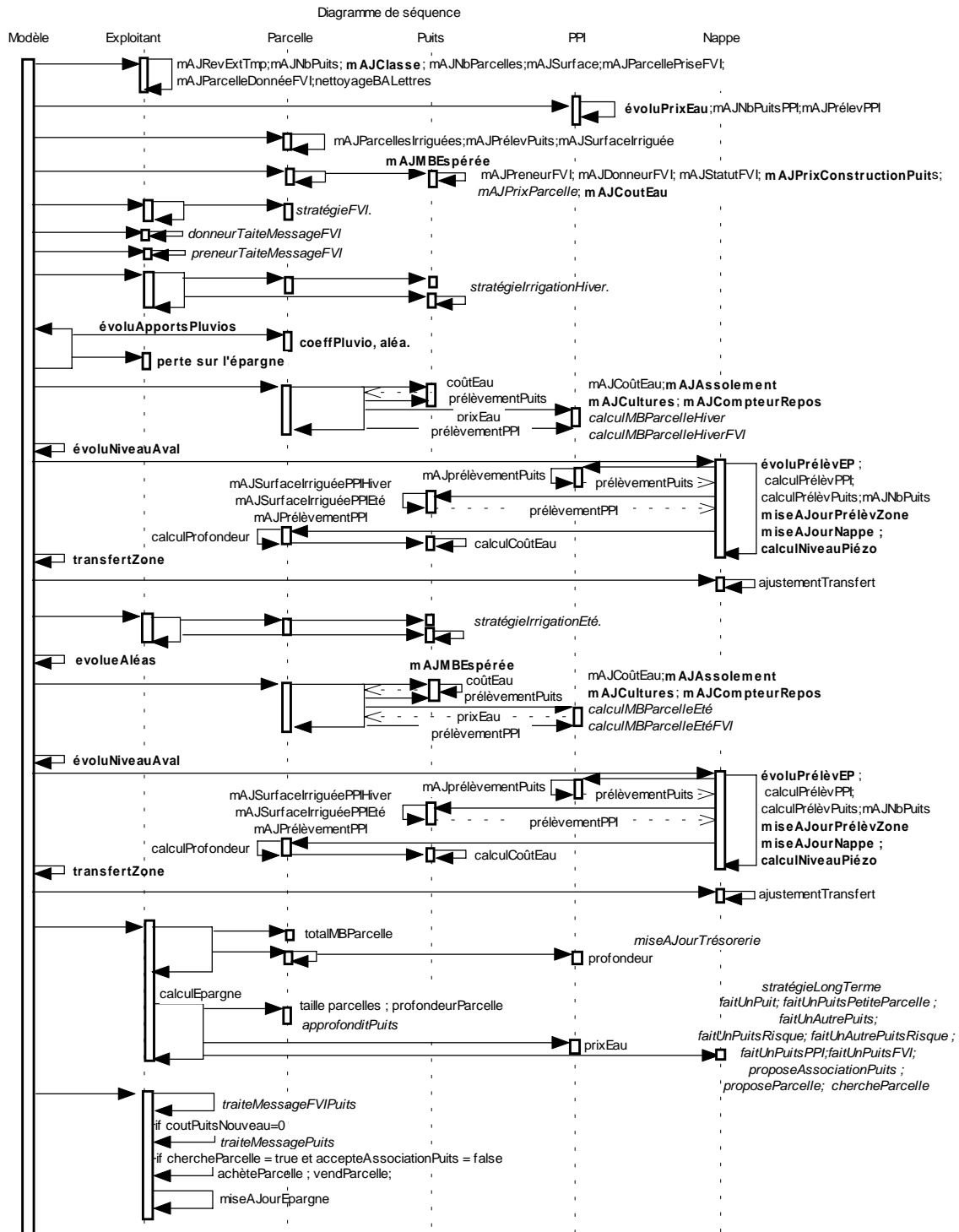


Fig. 5 : Diagramme de séquence détaillé du modèle. MB=marge brute. FVI=faire-valoir indirect. MAJ=mise à jour.

Annexe 3.b. Diagrammes d'activité des méthodes modélisées

Echange foncier

La recherche d'une parcelle irriguée a été schématisée en deuxième partie. Le diagramme ci-dessous présente la méthode de recherche d'une parcelle dépourvue d'accès à l'eau, que le preneur cherche à irriguer avec son puits.

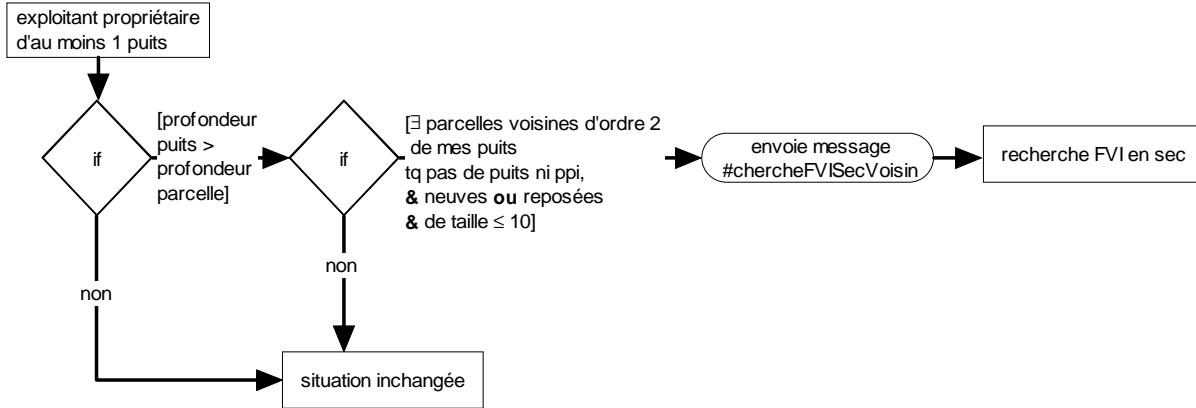


Fig. 6 : Diagramme d'activité de la recherche d'une parcelle non irriguée à prendre en FVI.

Les figures 7 et 8 qui suivent schématisent les deux étapes de la négociation : le donneur potentiel sélectionne des parcelles puis le preneur choisit parmi les accords reçus.

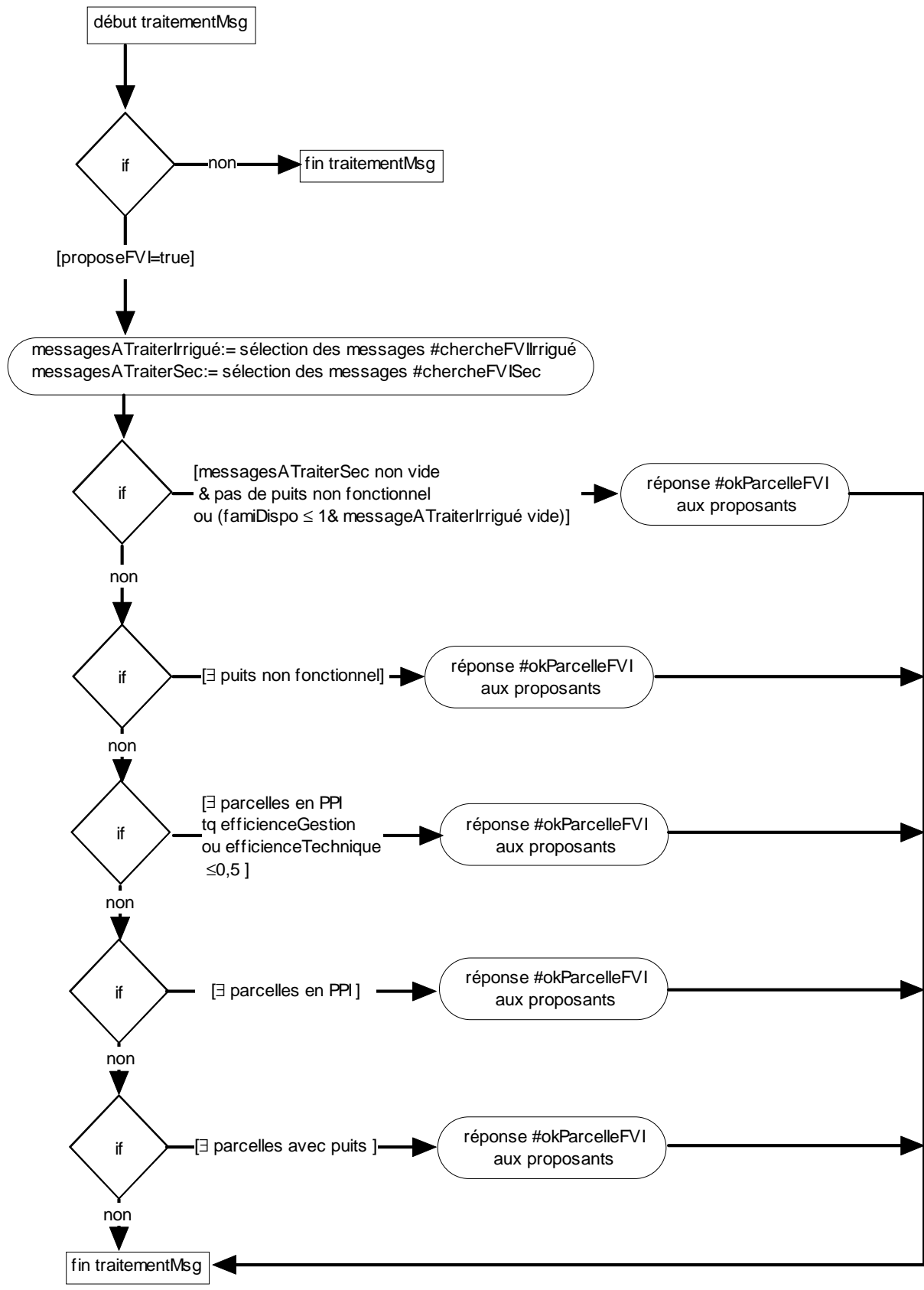


Fig. 7: Diagramme d'activité : le donneur potentiel sélectionne les parcelles qu'il veut bien donner en FVI, selon sa situation.

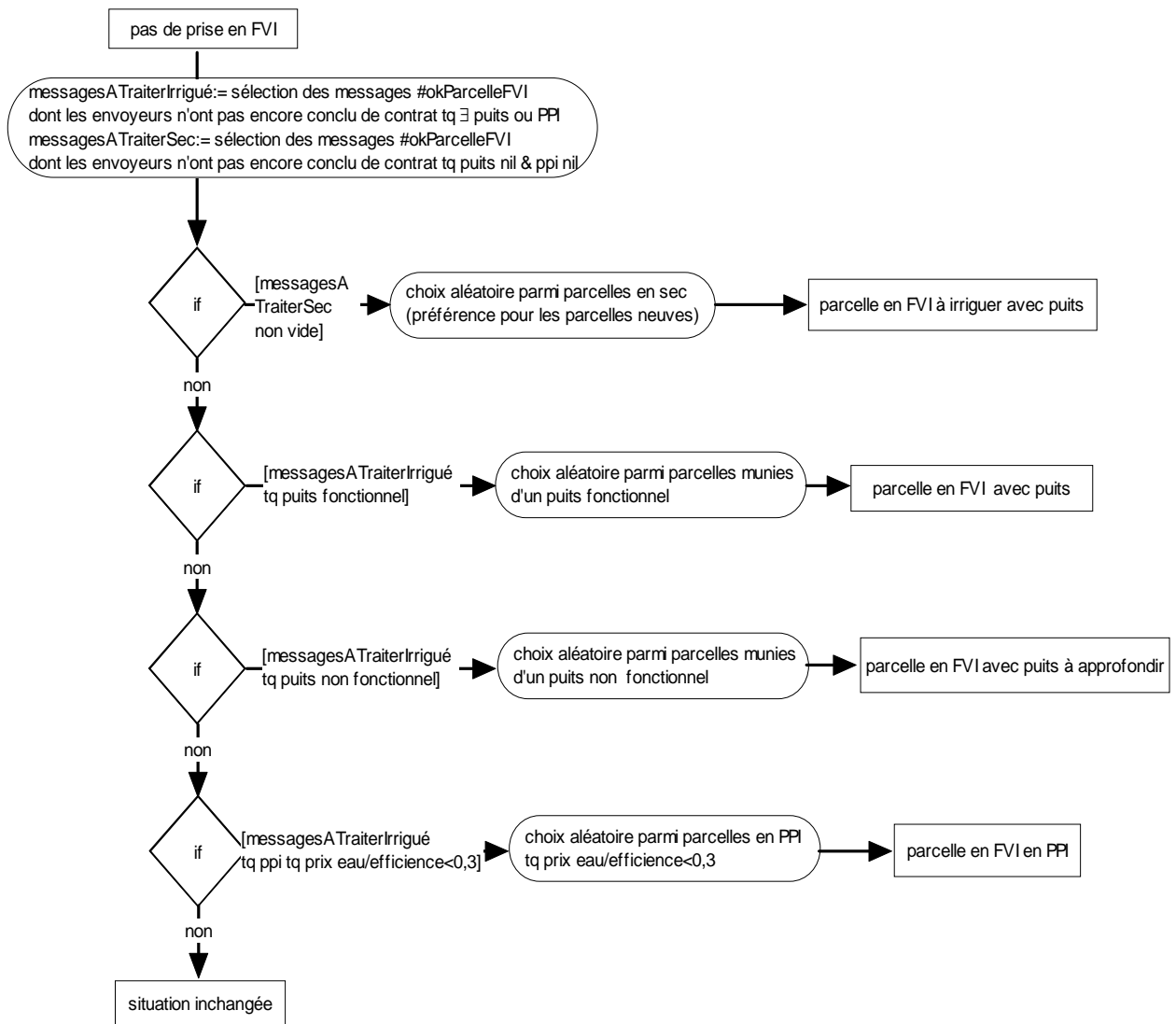


Fig. 8 : Diagramme d'activité : le preneur potentiel sélectionne la parcelle qui l'intéresse le plus.

La méthode de construction d'un puits dans les meilleures conditions a été présentée en deuxième partie. Les figures 9 à 15 présentent des méthodes alternatives, dont le déroulement repose sur les mêmes principes : recherche de la parcelle favorable, vérification des conditions financières, tentative de construction, pouvant aboutir à un échec. Certaines de ces méthodes comportent des échanges de messages entre exploitants (construction d'un puits en association et en mouzaraâ : cf. fig. 9 et 13), ou simplement des informations sur le voisinage (cf. fig. 10, 11, 14).

Construction d'un puits en association

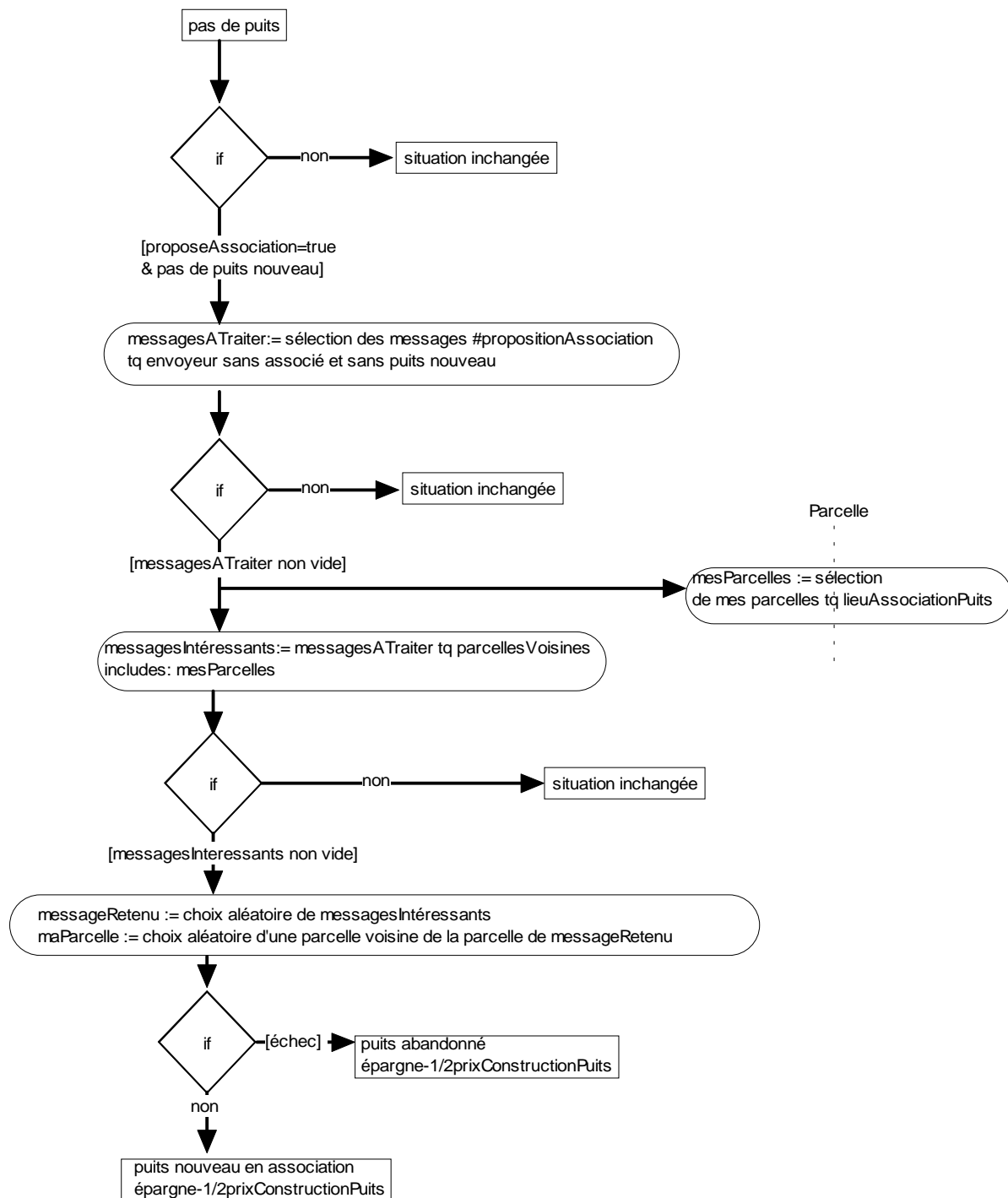


Fig.9 : Diagramme d'activité de la méthode de construction d'un puits en association. LieuAssociationPuits=regroupement des parcelles en jachère, sans PPI ni puits, favorables à la construction d'un puits, adjacentes, de manière à avoir une surface groupée d'au moins 2 ha. L'épargne de l'exploitant doit être au moins égale à 30% de l'investissement à réaliser.

Construction d'un puits sur une petite parcelle

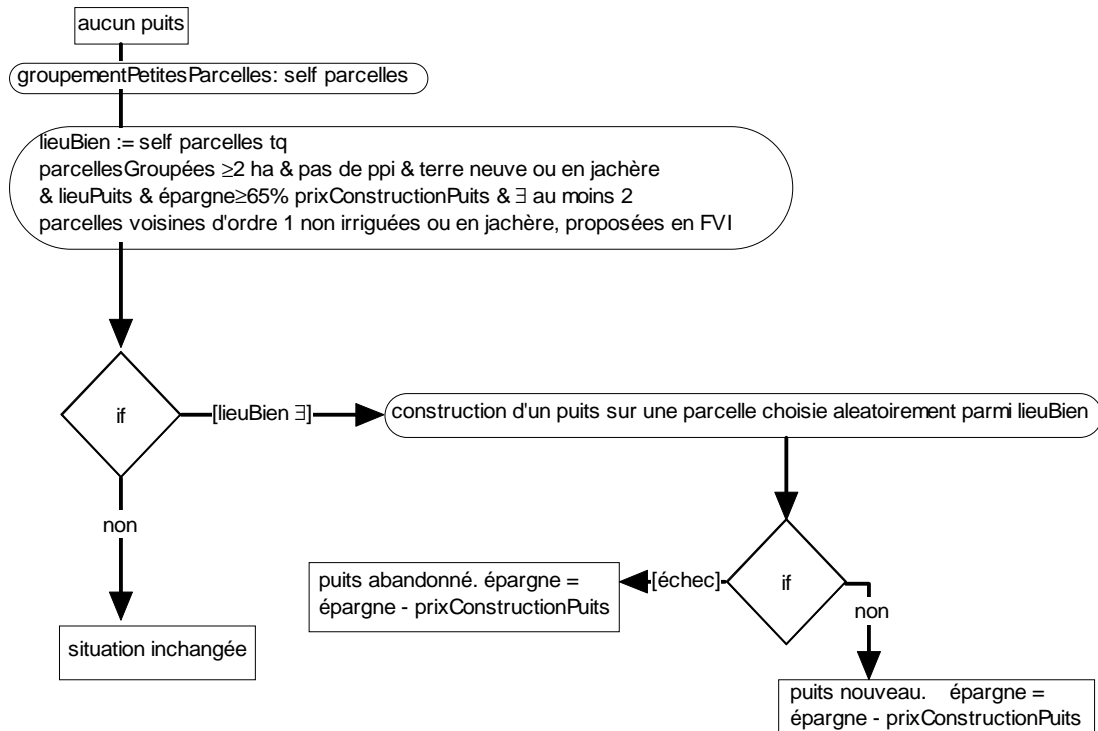


Fig.10 : Diagramme d'activité de la construction d'un puits sur une petite parcelle.

Construction d'un puits en PPI

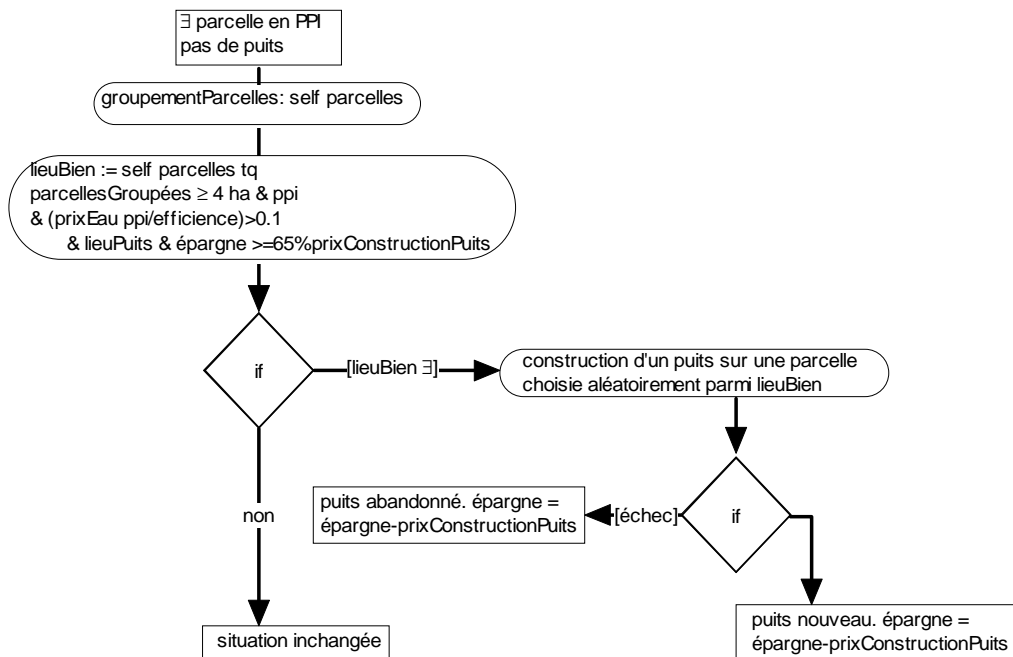


Fig.11 : Diagramme d'activité de la construction d'un puits en PPI

Construction d'un puits dans des conditions risquées

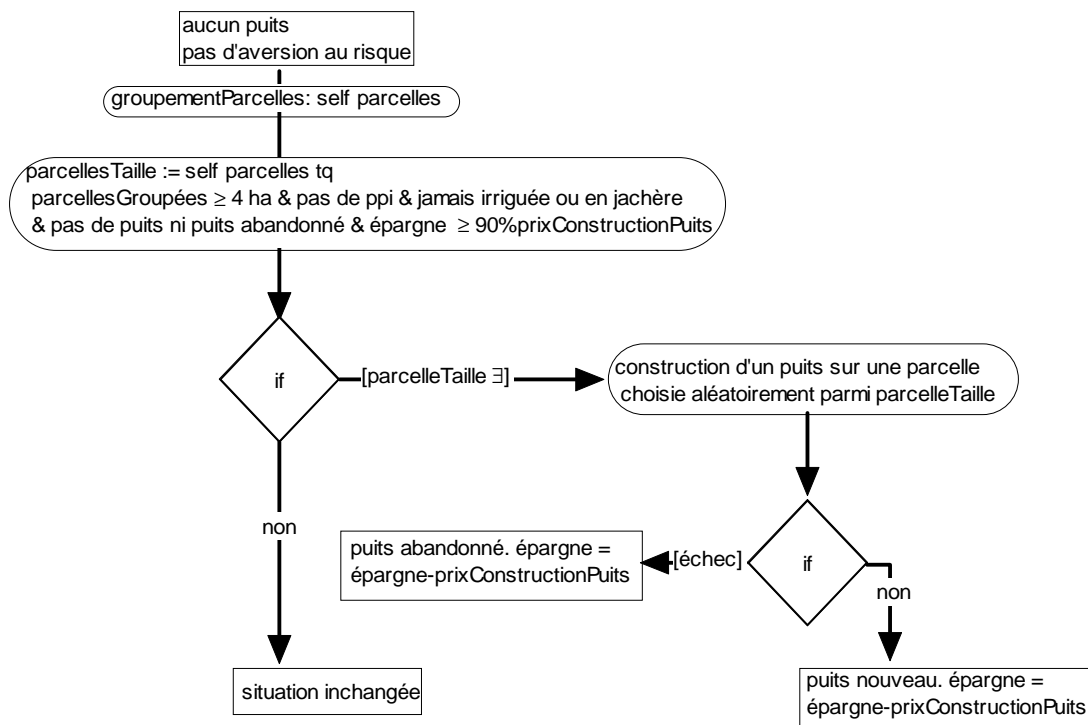


Fig. 12 : Diagramme d'activité de la construction d'un puits dans des conditions risquées

Construction d'un puits en mouzaraâ

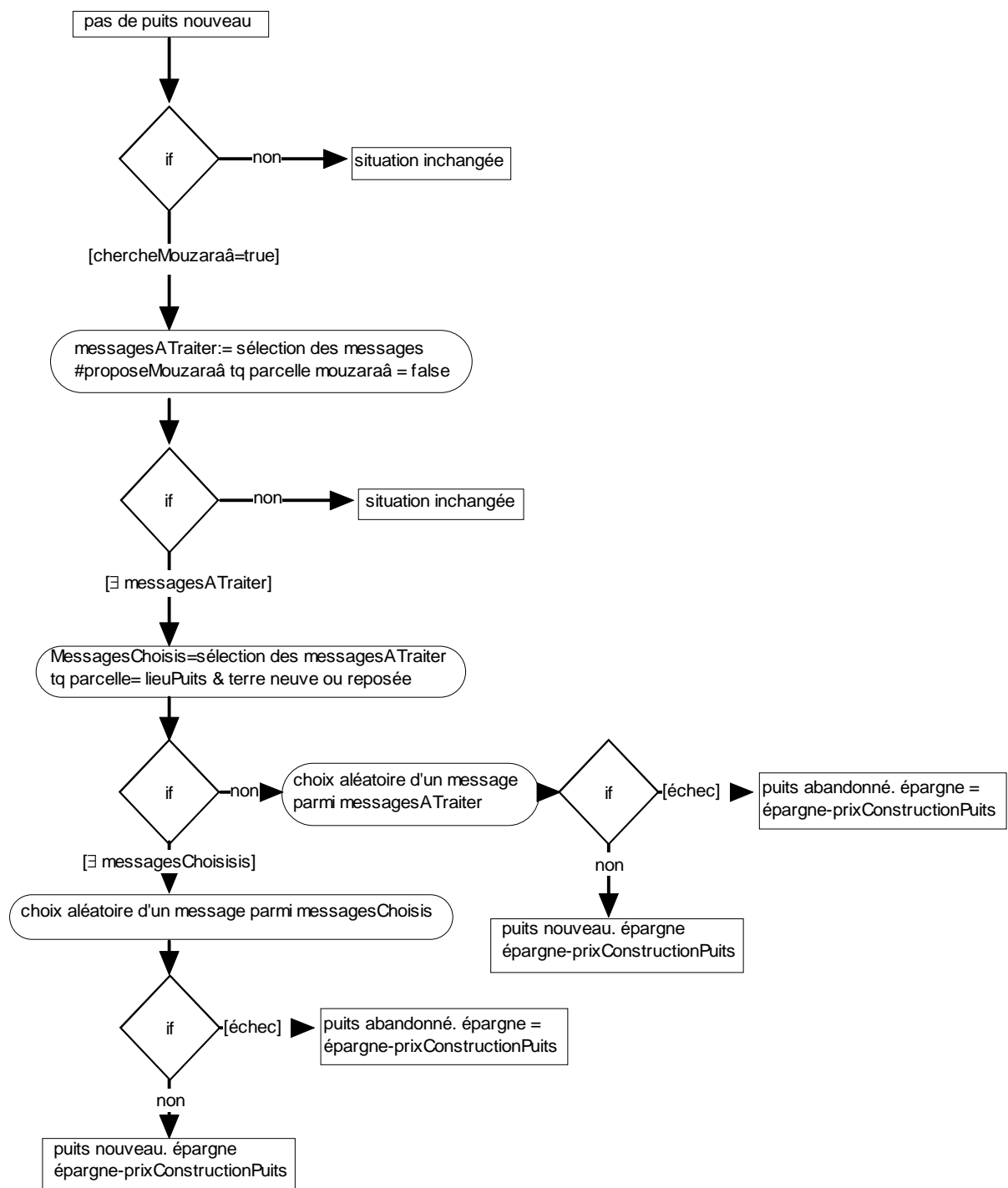


Fig.13 : Diagramme d'activité du choix d'une parcelle à prendre en mouzaraâ

Construction d'un autre puits

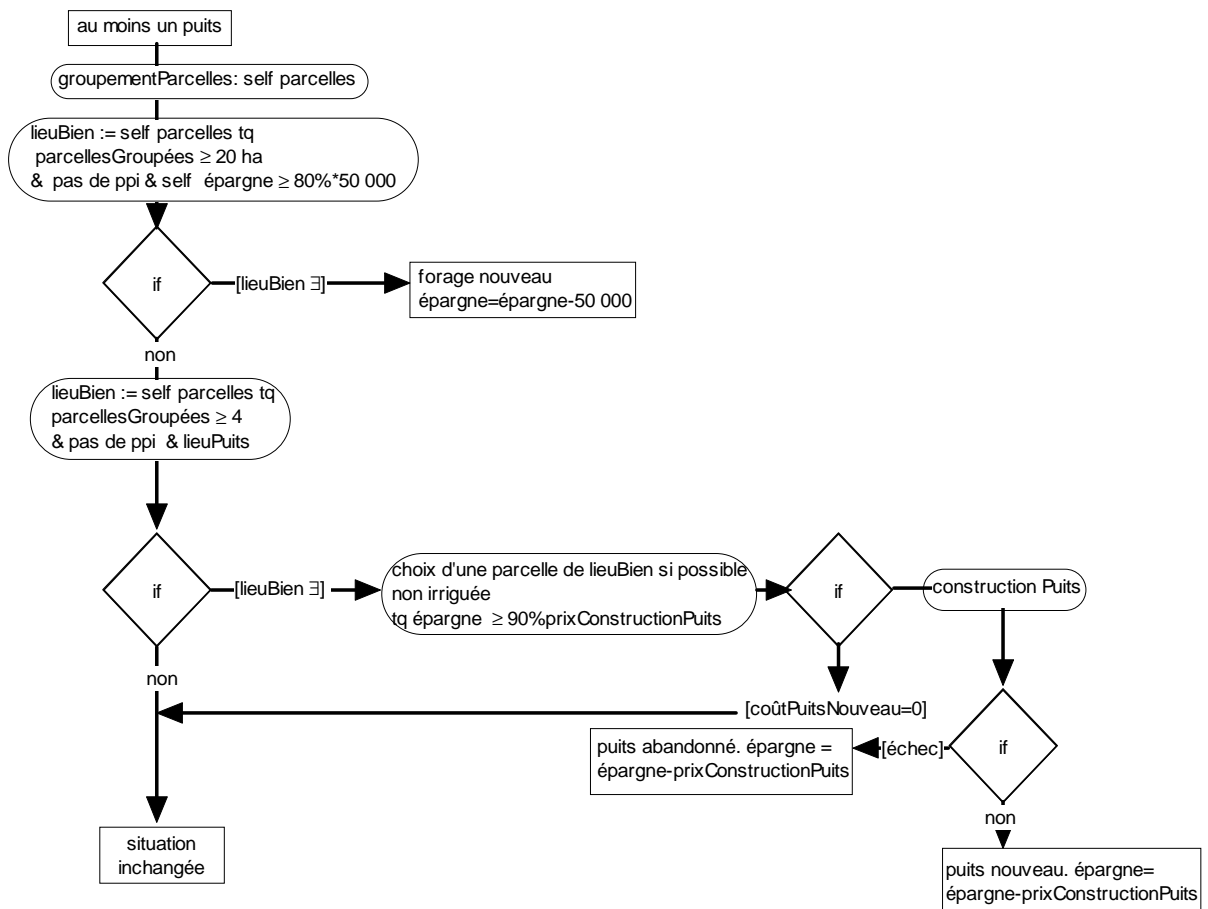


Fig. 14 : Diagramme d'activité de la construction d'un autre puits

Construction d'un autre puits dans des conditions risquées

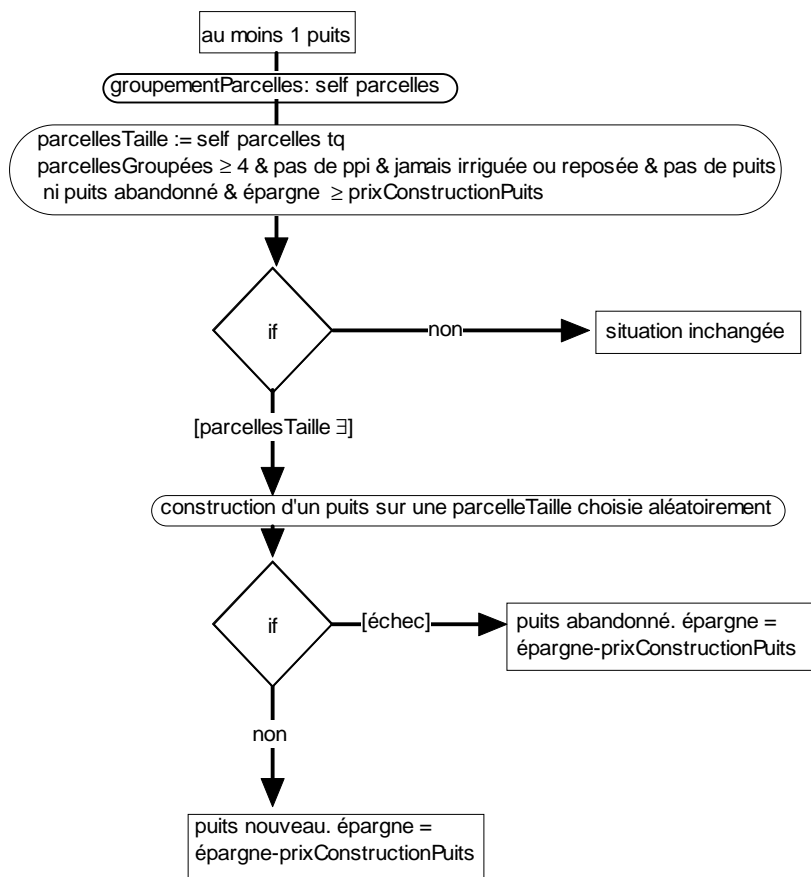


Fig. 15 : Diagramme d'activité de la construction d'un autre puits dans des conditions risquées

Transactions du marché foncier

Les figures 16 et 17 présentent les deux étapes de la négociation e jeu dans le marché foncier : celui qui vend commence par proposer la parcelle à laquelle il tient le moins et en dernier lieu l'acheteur choisit parmi les propositions reçues.

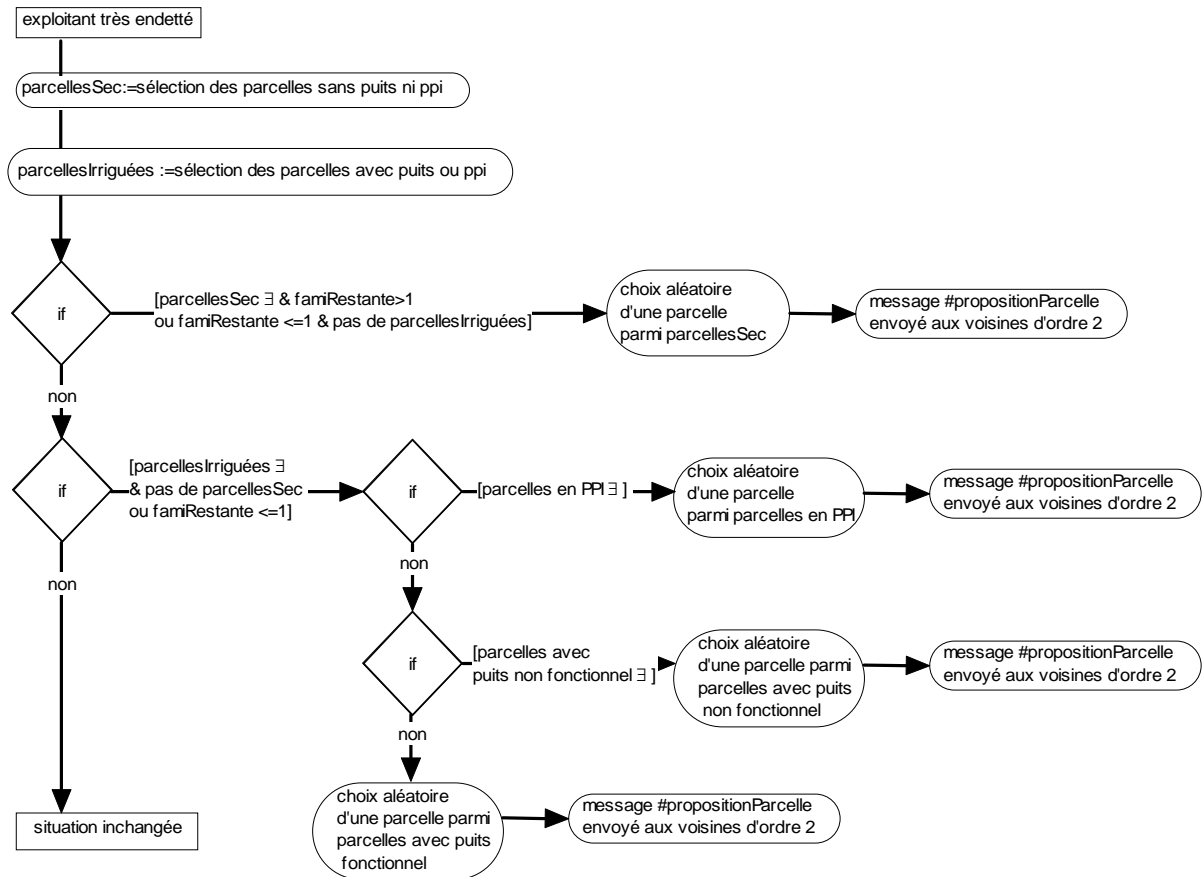


Fig. 16 : Diagramme d'activité de la proposition de parcelles à vendre

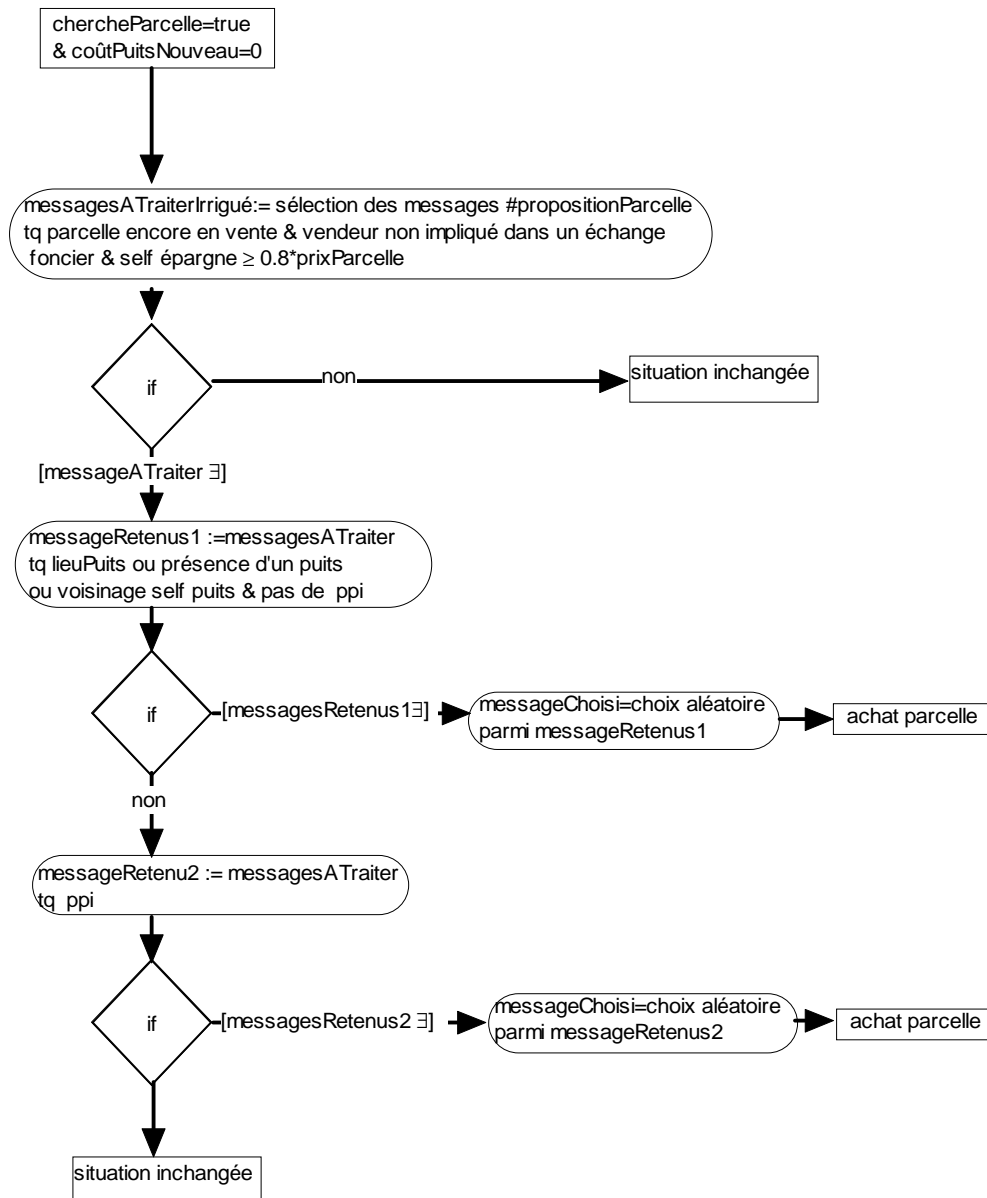


Fig. 17 : Diagramme d'activité de l'achat d'une parcelle

Le prix des parcelles dépend de leur type d'accès à l'eau : 1000 DT/ha sans accès et dans une zone sans puits, 2000 DT/ha sans puits, avec des puits dans le voisinage, 1500 DT/ha en PPI, 5000 DT/ha avec un puits.

Approfondissement des puits

Le puits doit être approfondi si le niveau de la nappe atteint le fond du puits. Il ne peut être approfondi que si les conditions économiques de l'exploitant le permettent. Lorsque le puits est partagé, les frais sont partagés. Tous les 5 mètres approfondis (mesurés par l'attribut "compteurBaisse"), l'équipement du puits doit être changé. L'approfondissement peut aboutir à un échec et donc à l'abandon du puits.

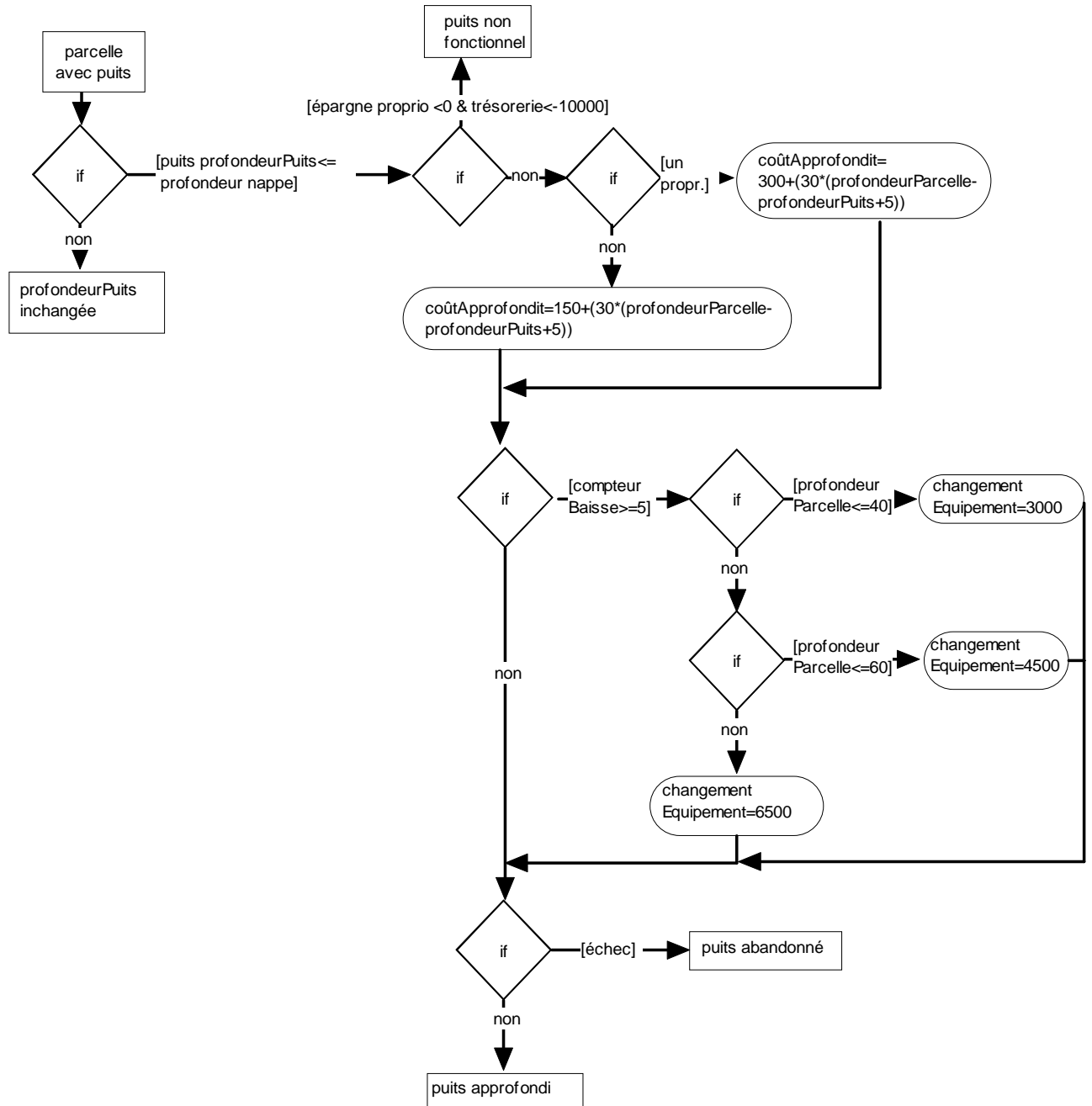
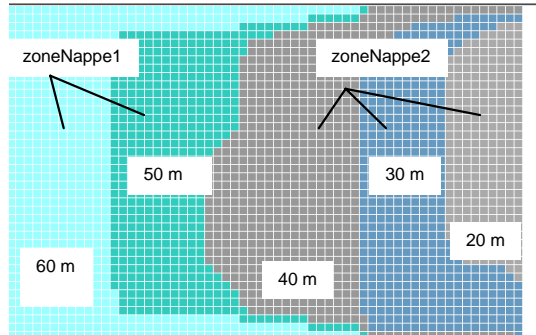


Fig. 18 : Diagramme d'activité de l'approfondissement d'un puits

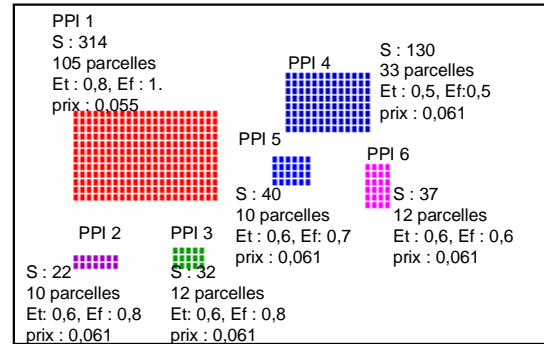
Annexe 3.c. Interfaces spatiales

Le modèle SINUSE fonctionne pour l'instant à partir de l'interface générique de CORMAS. L'interface graphique permet néanmoins de visualiser les objets spatiaux ou situés du modèle.

a. Carte de la nappe. Profondeurs initiales.

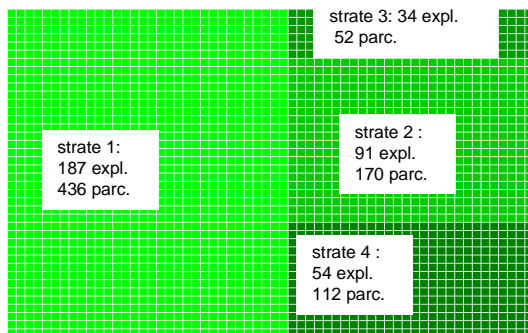


b. Carte des PPI. Principaux attributs.

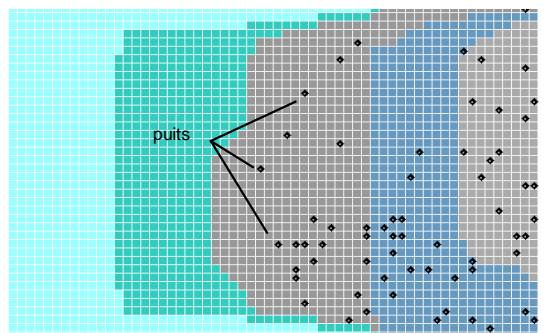


S=surface, Et = Efficacité technique, Ef = Efficacité de gestion.
prix= prix de l'eau

c. Strates agricoles



d.Exemple de distribution initiale des puits



Annexe 3.d. Paramètres du modèle

Tab. 5 : Les paramètres du modèle

facteurs	paramètre	valeur actuelle
économiques	Dépenses courantes	1/3 de la trésorerie
	emprunt long terme pour la construction du puits	entre 0 et 40%
	emprunt de campagne	-10000 en hiver et -5000 en été
	probabilité d'aversion au risque (puits zone pionnière)	90%
	aléa sur la valorisation de l'épargne	[0,1-1]
	prix des intrants et des produits agricoles	cf. fiches technico-écon.
	prix de la terre	[1000 - 5000] (accès eau)
	taux de valorisation de l'épargne	18%
	taux d'intérêt des emprunts	5%
	plafond d'augmentation de l'eau en PPI	0,3 DT/m ³
	coût d'extraction de l'eau	cf. équation
	coût de construction d'un puits	cf. équation
	coût de construction d'un forage	50 000 DT
	diversification temporaire des revenus	cf. méthode
	seuils d'endettement pour la vente de parcelles	-20 000 et -50 000
	seuil d'endettement pour la proposition en <i>mouzaraâ</i>	-5000
	caractéristiques socio-économiques pour proposeFVI	cf. méthode
	caractéristiques socio-économiques pour rechercheFVIsec	cf. méthode
	caractéristiques socio-économiques pour rechercheFVIirrigué	cf. méthode
	seuil d'épargne pour la prise en <i>mouzaraâ</i>	23 000
	coût d'approfondissement	cf. méthode
	épargne de départ des exploitants	cf. tab. 42 annexe 3.j
	coût du renouvellement de l'équipement	cf. méthode
sociaux	seuil de réussite pour l'imitation	1000
	processus d'imitation	imitations
	échanges en FVI	FVI
	intérêt d'une parcelle en PPI : prix eau/efficience	<0,1
	marché foncier	marché foncier
	association entre voisins pour la construction d'un puits	associations
	surface minimale pour la construction d'un puits	4 ha
	surface minimale pour la construction d'un forage	20 ha
	nombre d'actifs pour la construction d'un puits	famiRestante-1/puits>1
	caractéristiques des parcelles "reposées"	depuis 3 ans au moins
techniques	portée des interactions	cf. méthodes
	efficience de la distribution de l'eau à partir d'un puits	0,7
	profondeur limite de creusage	70
	capacité d'irrigation des puits (en surface)	6
	efficacité de gestion des PPI	cf. carte PPI
	efficience de distribution des PPI	cf. carte PPI
	profondeur limite d'approfondissement	90
taux d'irrigation	[0-1] selon conditions	
liés au milieu	aléa sur le revenu du maraîchage d'été	[0,1-1] loi discrète
	transmissivité T ₁ et T ₂ des zones 1 et 2	T ₁ =0,01 T ₂ =0,005
	porosité s ₁ et s ₂ des zones 1 et 2	s ₁ =15% s ₂ =10%
	apports des zones 1 et 2 (m ³)	zone 1 : 5.10 ⁶ zone 2 : 0,5.10 ⁶
	climat	moyen ou variable
	probabilité d'échec	[0,01-0,05] selon zone

Annexe 3.e. Aléas sur les cultures maraîchères et sur la valorisation de l'épargne

Aléa sur la production maraîchère d'été : *aléaM*

AléaM est un coefficient fixé chaque année aléatoirement pour l'ensemble de la population, symbolisant des problèmes climatiques, phytosanitaires ou liés au marché, affecté au produit brut sur le maraîchage. Faute de données précises sur ce point, ce coefficient est fixé comme suit :

- $P(\text{aléaM} = 0,1) = 0,1$
- $P(\text{aléaM} = 0,4) = 0,3$
- $P(\text{aléaM} = 0,6) = 0,2$
- $P(\text{aléaM} = 1) = 0,4$

Aléa sur la valorisation de l'épargne : *AléaEp*

De même, AléaEp est un coefficient fixé chaque année aléatoirement pour l'ensemble de la population, symbolisant des problèmes climatiques, phytosanitaires ou liés au marché, touchant les gains réalisés sur le bétail. Faute de données précises sur ce point, ce coefficient est fixé comme suit :

- $P(\text{aléaEp} = 0,5) = 0,1$
- $P(\text{aléaEp} = 0,8) = 0,5$
- $P(\text{aléaEp} = 1) = 0,4$

Annexe 3.f. Probabilité d'échec à la construction et à l'approfondissement d'un puits

P = 5% en zone 1

P = 1% en zone 2

P = 100% si le seuil technique est dépassé ou si au moins 3 puits sont abandonnés dans le voisinage d'ordre 1.

Annexe 3.g. Corrélation entre coûts de l'eau et profondeur

Ces corrélations ont été établies à partir d'enquêtes auprès des agriculteurs et d'un fournisseur de pièces détachées de Kairouan

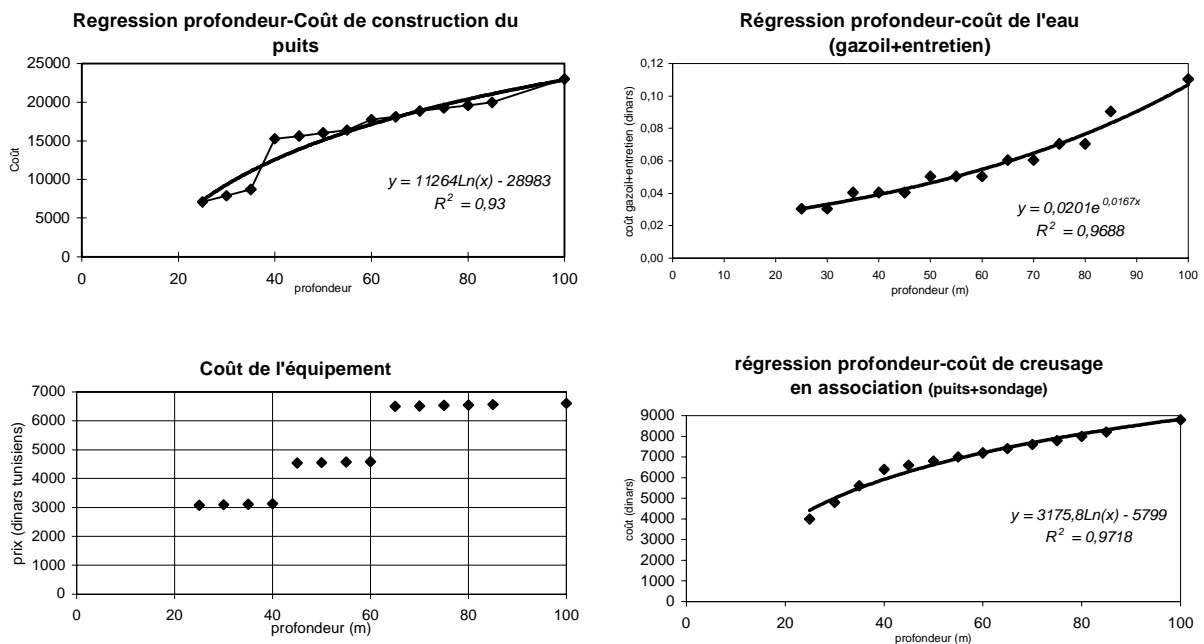


Fig. 19 : Corrélation entre coûts de l'eau et profondeur de l'eau.
Sources : enquêtes

Annexe 3.h. Calcul des marges brutes

Tab. 6 : calcul de marges brutes selon le statut de la terre, son accès à l'eau et la saison

calcul de la marge brute sur la parcelle n		en hiver	en été	
FVD	sec	$MB = s \cdot \sum_k S_k \cdot (P_k - C_k)$		
	$t_n > 0,3$	$MB_n = S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\sum_k S_k \cdot \left(P_k - C_k - \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) + s_d \cdot \left[(P_{dir} - C_{dir}) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,4 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right] \right]$	$MB_n = S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\sum_k S_k \cdot \left(P_k - C_k - \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) + s_d \cdot \left[(P_{dir} - C_{dir}) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,6 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right] \right]$	
	$t_n \leq 0,3$	$MB_n = S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\sum_k S_k \cdot \left(P_k - C_k - \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) + s_d \cdot \left[(P_{dir} - C_{dir}) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,4 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right] + (1 - t_n) \cdot (R_{Gr} \cdot P_{Gr} - C_{Gr}) \right]$	$MB_n = S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\sum_k S_k \cdot \left(P_k - C_k - \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) + s_d \cdot \left[(P_{dir} - C_{dir}) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,6 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right] \right]$	
FVI	avec	preneur	$MB_n = \frac{1}{2} \cdot S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\sum_k S_k \cdot \left(P_k - C_k - \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) + s_d \cdot \left[(P_{dir} - C_{dir}) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,4 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right] \right]$	$MB_n = \frac{1}{2} \cdot S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\sum_k S_k \cdot \left(P_k - C_k - \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) + s_d \cdot \left[(P_{dir} - C_{dir}) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,6 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right] \right]$
	accès	donneur	$MB_n = \frac{1}{2} \cdot S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\sum_k S_k \cdot \left(P_k - C_k - \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) + s_d \cdot \left[(P_{dir} - C_{dir}) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,4 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right] \right]$	$MB_n = \frac{1}{2} \cdot S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\sum_k S_k \cdot \left(P_k - C_k - \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) + s_d \cdot \left[(P_{dir} - C_{dir}) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,6 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right] \right]$
	sans	preneur	$MB_n = \frac{1}{5} \cdot S_n \cdot t_n \cdot \sum_k S_k \cdot P_k$	
	accès	donneur	$MB_n = S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\frac{4}{5} \cdot \sum_k S_k \cdot P_k - \sum_k S_k \cdot \left(Ch_k + \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,4 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right]$	$MB_n = S_n \cdot \left[t_n \cdot \left(\frac{4}{5} \cdot \sum_k S_k \cdot P_k - \sum_k S_k \cdot \left(Ch_k + \frac{D_k \cdot CP_k \cdot PE_n}{E_n} \right) \right) - \frac{hl \cdot CP_{dir} \cdot 0,6 \cdot D_{dir} \cdot PE_n}{E_n} \right]$

Annexe 3.i. Fiches technico-économiques des cultures

Les fiches technico-économiques suivantes ont été établies sur la base de plusieurs sources d'informations (OTD, 1995 ; APIA, 1993 ; Selmi, 1996 ; Ben Hamouda, 1999), en cohérence avec les données des enquêtes réalisées dans ce travail. Le calcul du bilan hydrique effectué pour estimer le besoin en eau des cultures est basé sur les valeurs mensuelles de l'ETP et la chronique des moyennes pluviométriques mensuelles relevées à la station de Chebika (tab.7).

Calcul du besoin en eau et climat

Les valeurs de l'ETP ont été calculées par la SCET-Tunisie (2000), sur la base de la formule donnée par Riou (1980) pour la zone de Kairouan :

$$ETP_n = 0,31 \cdot \frac{(\theta_n + 2 \cdot \theta_{n+1})}{3} - 3,77 \text{ où } ETP_n \text{ (mm/mois) est l'évapotranspiration potentielle du mois } n \text{ et}$$

θ_n la moyenne interannuelle de la température maximale du mois n .

Tab. 7 : ETP et pluviométrie mensuelles de la région

mois	janv	fév	mars	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	total
ETP	59	75	100	141	185	223	252	204	156	109	71	53	1628
Pluviométrie annuelle entre 1978 et 1998													
1978	2,5	32	10	12,5	24	28	0	8	0	42,5	35	2	196,5
1979	0	43	74,5	33,5	0	0	0	6	133	14	7	0	311
1980	0	11	60,5	48,6	23,8	2	0	10,1	17,8	41,3	5,5	50,8	271,4
1981	4	33,2	4	10,2	17,8	9,2	0	17	24,3	43,3	1	6	170
1982	41,9	9,4	11	28,1	21,5	2,3	0	0	21,5	78,5	74,2	28,9	317,3
1983	41,6	3	6,7	3	33,2	10	0	0	3,3	35,7	5,6	7	149,1
1984	0	8,2	34,4	27,6	6,2	0	0	13,4	61	90,8	13,5	35,8	290,9
1985	30	11,7	78,4	16,3	27,8	0	0	0	44,8	9,5	0	0	218,5
1986	9,3	5,3	76,2	3	11	5,7	3,2	5	64,5	14,5	63,9	26,5	288,1
1987	10,3	13,2	39	6,7	12,7	0	0	0	6	16,7	16,4	5	126
1988	0	0	2	50,8	29,2	13,4	0	3	22,2	0	46,6	24	191,2
1989	11,4	20,2	5,5	25	3,4	26,9	0	18,9	32	44,8	24,9	77,2	290,2
1990	265,4	0	38,4	95,2	38,1	0	20,2	62,8	14,2	47	25,2	54,7	661,2
1991	38,7	38,8	115	34,5	17,2	18	0	0	44	15,2	36	0	357,4
1992	61,7	111,7	23	75	38,2	18	0	0	13,4	10,4	66,4	120,5	538,3
1993	3	17,9	39,7	0	41	0	0	4	76,8	28,3	3	29,8	243,5
1994	1	49	19	19	30	2	0	0	14	120	0	0	253,6
1995	0	0	4,5	1,5	0	18,4	0	38	57,4	115	20,9	38,4	293,8
1996	33	25,4	44,7	29,5	25,8	12,2	0	27,5	37,5	0	0	11	246,6
1997	32,2	0,4	21,4	23,7	1,2	3,5	0	10	165	113	6,3	0	376,9
1998	15,5	1,5	18	39,5	18	1	0	31,5	18,6	73,5	14	0	231,1

Le calcul mensuel du bilan hydrique effectué par la suite ne tient pas compte du ruissellement (malgré le fait que la pluviométrie est très irrégulière et souvent concentrée) ni de la réserve utile du sol. Les coefficients culturaux adoptés sont ceux proposés par Doorenbos (1986), dans des conditions de faible humidité du sol et de vent fort. L'utilisation de ces coefficients permet d'estimer les écarts de besoin d'une année à l'autre pour une culture donnée. **Par contre, les valeurs absolues issues de ces calculs sont très supérieures aux volumes apportés en pratique par les agriculteurs de Kairouan** : les coefficients culturaux de la FAO correspondent à des situations de conduite optimale des cultures, et les densités foliaires résultantes, qui influent le coefficient cultural, sont très supérieures à celles qu'obtiennent les fellahs de la zone. Les apports utilisés dans le modèle sont donc basés sur les apports moyens estimés par les enquêtes pour 1997, et sur les écarts relatifs entre années pluviométriques, estimés à l'aide du bilan hydrique.

Polyculture et succession culturale

L'assolement des parcelles dans le modèle est ajusté au début de chaque saison, ce qui permet de tenir compte de stratégies d'irrigation propres aux campagnes d'hiver et d'été (la première étant moins risquée que la seconde), et de la fréquente double culture pratiquée par les agriculteurs de la plaine de Kairouan, en cohérence avec leur logique de diversification. Les dates de semis et de récolte retenues proviennent des dires des agriculteurs. Les coefficients culturaux maximum donnés par la littérature ont été réduits de manière à trouver des besoins en eau se rapprochant de leurs déclarations, sachant que ces coefficients culturaux correspondent à des conditions optimales, et que les rendements dans la plaine de Kairouan sont très souvent bien inférieurs aux rendements optimaux. Concernant les autres intrants que l'eau, les données proviennent surtout des normes officielles et Kairouanaïses, révisées à la baisse après discussion avec des vulgarisateurs des CTV concernés.

Fiche technico-économique des céréales

Que ce soit en périmètre collectif, en irrigation privée ou en sec, les surfaces cultivées en céréales sont globalement composées de blé dur et d'orge à hauteurs respectivement de 80% et de 20%. Constatant que plusieurs exploitants cultivent les deux espèces³, nous représentons un hectare cultivé en céréales par un mélange 0,8*blé dur+0,2*orge.

*En irrigué

Tab. 8 : fiche technico-économique du blé dur en irrigué

BLE DUR	Quantité/ha	Prix unitaire (DT)
semences (qx)	1,5	41
ammonitre (qx)	1,5	22,4
DAP (qx)	1	29
moissonneuse (h)	2	40
traction (h)	8	10
transport (h)	6	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	5	5
total charges sans eau : 345 DT/ha		
production (t/ha)	3 t/ha	285
sous-production	90 balles	2,5 DT/balles

Tab. 9 : coefficients culturaux du blé dur et apports en eau estimés

mois	nov	déc	janvier	février	mars	avril	mai	apports en eau d'après enquête
kc blé dur	0,4	0,8	0,95	1,2	0,75	0,5	0,2	1997 1500 m ³

Tab. 10 : fiche technico-économique de l'orge en irrigué

ORGE	Quantité	Prix unitaire (DT)
semences (qx)	1,5	34
ammonitre (qx)	1,5	22,4
DAP (qx)	1	29
moissonneuse (h)	1	40
traction (h)	8	10
transport (h)	5	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	4	5
total charges sans eau : 284 DT/ha		
production (t/ha)	3	170
sous-production (balles)	90	2,5

La période de culture et les coefficients culturaux de l'orge sont considérés les mêmes que pour le blé dur.

³ le blé dur est utilisé pour le couscous, l'orge pour la fabrication du pain, la *tabouna*, ou comme fourrage pour les animaux

L'impact de la pluviométrie des 20 dernières années sur la demande en eau moyenne est exprimé au moyen du coefficient $cp = \text{demande en eau année } n / \text{demande en eau moyenne estimée pour l'année 1997}$ (d'après enquêtes) :

Tab. 11 : impact de la pluviométrie sur le coefficient de demande en eau du blé dur

an	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
cp	0,9	0,8	0,7	1	0,7	1	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,4	0,5	0,2	0,9	0,9	1,1	0,7	1

**En sec*

Tab. 12 : fiche technico-économique du blé dur en sec

BLE DUR	Quantité/ha	Prix unitaire (DT)
semences (qx)	1	41
ammonitre (qx)	1	22,4
fumier (t)	0,5	20
moissonneuse (h)	1	40
traction (h)	3,5	10
transport (h)	6	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	5	5
total charges : 139 DT/ha		
production (t/ha)	1,2	285
sous-production (balles)	40	2,5

Tab. 13 : fiche technico-économique de l'orge en sec

ORGE	Quantité	Prix unitaire (DT)
semences (kg)	1	34
ammonitre (qx)	0,5	22,4
fumier (t)	0,5	20
moissonneuse (h)	1	40
traction (h)	3,5	10
transport (h)	6	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	5	5
total charges : 128 DT/ha		
production (t/ha)	0,9	170
sous-production (balles)	60	2,5

L'impact de la pluviométrie sur le rendement a été estimé à partir de calculs effectués à l'aide du logiciel BILHY (Lardilleux, 2000). Le coefficient calculé est affecté au rendement, sauf en irrigation d'appoint.

Tab. 14 : Impact de la pluviométrie sur le rendement des céréales

an	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
cp	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,5	0,2	0,3	0,1	0,2	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,1	0,4	0,2	0,3

Maraîchage d'hiver

La sole d'hiver des parcelles irriguée consacrée au maraîchage est constituée en moyenne de fèves et de piment d'arrière saison (lequel devrait être cultivé sous tunnel, mais l'est rarement en pratique, la culture de fève en intercalaire jouant sans doute un rôle protecteur) Un hectare de maraîchage d'hiver en PPI est constitué en moyenne de 90% de fèves et de 10% de piments (nous n'avons pas remarqué de différence significative entre les PPI). Un hectare de cultures maraîchères d'hiver sur les parcelles irriguées par puits est composé en moyenne de 40% de fève, de 50% piment arrière-saison, et de

10% de tomates arrière saison. Notons que la culture en intercalaire fréquemment rencontrée devrait en toute rigueur donner lieu à un itinéraire technique à peu près homogène pour la fève et le piment.

*Fève

Tab. 15 : Fiche technico -économique de la fève

FEVE	Quantité	Prix unitaire (DT)
semences (kg)	60	1,5
phosphate (qx)	2	22,4
DAP (qx)	0,5	23,5
fumier (t)	0,2	29
produits de traitement (DT)		20
traction (h)	6	10
transport (h)	8	10
main d'œuvre ordinaire (jours)	30	6
total charges sans eau : 419 DT/ha		
production (t/ha)	5	225

La fève est récoltée fraîche (en plusieurs fois entre décembre et février) ou sèche (vers mai-juin). Le calcul de la demande en eau est basé sur une situation intermédiaire (fictive) afin de tenir compte de ces deux possibilités.

Tab. 16 : coefficients culturaux mensuels et apports en eau estimés de la fève

mois	sept	oct	nov	déc	janv	fév	mars	apports en eau	
kc fève	0,4	0,75	0,95	1,05	0,95	0,25	0,25	1997	1400 m³
								d'après enquêtes :	

Tab. 17 : Impact de la pluviométrie sur le coefficient de demande en eau de la fève

an	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
cp	1,9	1,7	1,5	1,9	0,7	1,8	1	1,6	1,2	2	2	1,3	1	1,2	0,9	1,4	1,7	1,2	1,6	1

*Piment d'arrière saison

Tab. 18 : Fiche technico-économique du piment d'arrière-saison

PIMENT arrière saison	Quantité	Prix unitaire (DT)
semences (kg)	1	100
ammonitre (qx)	3,5	22,4
phosphate (qx)	1	23,5
DAP (qx)	1	29
fumier (t)	1	20
produits de traitement (DT)	-	10
traction (h)	11	10
transport (h)	20	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	90	5
total charges sans eau : 842 DT/ha		
production (t/ha)	12	600

Tab. 19 : coefficients culturaux mensuels et apports en eau estimés du piment d'arrière-saison

mois	nov	déc	janv	fév	mars	apports en eau	
kc piment AS	0,5	0,7	1,1	0,95	0,9	1997	1000 m³
						d'après enquêtes :	

Tab. 20 : Impact de la pluviométrie sur le coefficient de demande en eau du piment d'arrière-saison

an	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
cp	0,9	0,7	0,8	1,1	0,7	1	0,9	0,8	0,6	0,9	1	0,8	0,6	0,4	0,3	0,9	1	1	0,8	1

**tomate d'arrière-saison*

Tab. 21 : Fiche technico-économique de la tomate d'arrière-saison

TOMATE arrière saison	Quantité	Prix unitaire (DT)
semences (kg)	0,4	100
ammonitre (qx)	1	22,4
phosphate (qx)	2	23,5
DAP (qx)	0,5	29
fumier (t)	1	20
produits de traitement (DT)	-	10
traction (h)	11	10
transport (h)	20	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	90	5
total charges sans eau : 850 DT/ha		
production (t/ha)	35	7500

Tab. 22 : coefficients culturaux mensuels et apports en eau estimés de la tomate d'arrière-saison

mois	août	sept	oct	nov	apports en eau	1997
kc tomate AS	0,5	0,75	1,25	0,65	estimés d'après enquêtes	1500 m ³

Tab. 23 : Impact de la pluviométrie sur le coefficient de demande en eau de la tomate d'arrière-saison

an	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
cp	2,4	1	2,5	2,4	1,9	2,7	1,7	2,6	2	2,7	2,5	2,1	1,6	2,3	2,5	2,2	2	0,8	2,5	1

**Type "maraîchage d'hiver"*

Tab. 24 : caractéristiques du type "maraîchage d'hiver"

	composition	besoin en eau 1997	charges sans eau/ha	produit brut/ha
en PPI	0,9*fèv+0,1*pim	1500 m ³ /ha	460 DT/ha	1283 DT/ha
sur puits	0,4*fèv+0,5*pim+0,1*tom	1900 m ³ /ha	674 DT/ha	2550 DT/ha

Maraîchage d'été

En général les agriculteurs cultivent à la fois de la pastèque, du piment et du melon.

*pastèque

Tab. 25 : Fiche technico-économique de la pastèque

PASTEQUE	Quantité	Prix unitaire (DT)
semences (kg)	3	26
ammonitre (qx)	4	22,4
phosphate (qx)	8	23,5
DAP (qx)	1	29
fumier (t)	1,5	20
produits de traitement (DT)		23
traction (h)	10	10
transport (h)	15	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	128	5
total charges sans eau : 1268 DT/ha		
production (t/ha)	20	300

Tab. 26 : coefficients culturaux mensuels et apports en eau estimés de la pastèque

mois	mars	avr	mai	juin	juil	apports en eau estimés :
kc pastèque	0,5	0,8	1,05	0,9	0,75	1997 5000 m ³

Tab. 27 : Impact de la pluviométrie sur le coefficient de demande en eau de la pastèque

an	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
cp	1	1	0,9	1	1	1	1	0,9	1	1	0,9	1	0,8	0,9	0,9	1	1	1	0,9	1

*Melon

Tab. 28 : Fiche technico-économique du melon

MELON	Quantité	Prix unitaire (DT)
semences (kg)	3	40
ammonitre (qx)	1	22,4
phosphate (qx)	2	23,5
DAP (qx)	1	29
produits de traitement (DT)		86
traction (h)	10	10
transport (h)	10	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	100	5
total charges sans eau : 922 DT/ha		
production (t/ha)	15	275

La période de culture et les coefficients culturaux sont considérés identiques à ceux de la pastèque.

*Piment d'été

Tab. 29 : Fiche technico-économique du piment

PIMENT D'ETE	Quantité	Prix unitaire (DT)
semences (kg)	1	100
ammonitre (qx)	3,5	22,4
phosphate (qx)	1	23,5
DAP (qx)	1	29
fumier (t)	1	20
produits de traitement (DT)		10
traction (h)	11	10
transport (h)	20	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	90	5
total charges sans eau : 867		
production (t/ha)	10	300

Tab. 30 : Coefficients culturaux et apports en eau moyen du piment

mois	juin	juil	août	sept	apports en eau	1997
kc piment	0,4	0,75	1,1	0,9	estimés :	4000 m ³

Tab.31 : Impact de la pluviométrie sur le coefficient de demande en eau du piment

an	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
cp	1	1	0,9	1	1	1	1	0,9	1	1	0,9	1	0,7	0,9	0,8	0,9	1	1,1	0,9	1

Arboriculture

On distingue l'olivier, qui peut être cultivé en sec ou en irrigué, de l'arboriculture fruitière, qui comprend surtout des pommiers et abricotiers.

*Olivier en sec

L'olivier ne produit qu'une année sur deux, d'après les fellahs. On considère une production annuelle uniforme faute de données précises.

Tab. 32 : Fiche technico-économique de l'olivier en sec

OLIVIER EN SEC	Quantité	Prix unitaire (DT)
ammonitre (qx)	0,5	22,4
fumier (t)	0,5	20
traction (h)	6	10
transport (h)	1	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	11	5
main d'œuvre spécialisée	9	11
total charges : 168 DT/ha		
production (t/ha)	1	334

**Olivier en irrigué*

Tab. 33 : Fiche technico-économique de l'olivier en irrigué

OLIVIER EN IRRIGUE	Quantité	Prix unitaire (DT)
ammonitre (qx)	0,9	22,4
fumier (t)	0,5	20
traction (h)	6	10
transport (h)	2	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	100	5
main d'œuvre spécialisée	9	11
total charges sans eau : 700 DT/ha		
production (t/ha)	2,5	334

Tab. 34 : Coefficients culturaux et apports en eau estimés de l'olivier

mois	janv	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	dec
kc olivier	0	0	0,5	0,5	0	0	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0
apports en eau estimés	1997											
	1500 ⁴ m ³											

Tab.35 : Impact de la pluviométrie sur le coefficient de demande en eau de l'olivier

an	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
cp	1,4	1,1	1,1	1,3	1,3	1,5	1	1,3	1,2	1,4	1,4	1,3	0,9	1,2	1,3	1,2	1,3	1,1	1,2	1

**Arboriculture fruitière*

Tab. 36 : Fiche technico-économique de l'arboriculture fruitière

ARBO FRUITIERE	Quantité	Prix unitaire (DT)
ammonitre (qx)	3	22,4
phosphate (qx)	1	23,5
potasse (qx)	0,5	27,5
fumier (t)	2	20
produits de traitement (DT)		59
traction (h)	7	10
transport (h)	4	6
main d'œuvre ordinaire (jours)	74	5
main d'œuvre spécialisée	6	11
total charges sans eau : 740 DT/ ha		
production (t/ha)	6	605

Tab. 37 : Coefficients culturaux et apports en eau estimés de l'arboriculture fruitière

mois	janv	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	dec
kc arbo fruit	0	0	0,5	0,8	1	1,05	1,05	1	0,95	0,9	0,75	0
apports en eau estimés	1997											
	6000 m ³											

Tab.38 : Impact de la pluviométrie sur le coefficient de demande en eau de l'arboriculture fruitière

⁴ Hors intercalaire, l'irrigation des oliviers est souvent bien plus faible dans les faits, sans pour autant provoquer un effondrement des rendements.

an	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
cp	1,2	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1

Annexe 3.j. Initialisation des exploitations

La taille des exploitations, le nombre d'actifs familiaux, d'exploitations ayant des revenus extérieurs, correspondent aux données du sondage.

Taille des exploitations

Tab. 39 : taille des exploitations

<5 ha	46%
5-10 ha	23%
10-15 ha	16%
> 15	15%

Famille

Tab. 40 : nombre d'actifs dans les exploitations

1-2	9%
2-4	17%
4-6	28%
6-10	40%
10-15	6%

Revenus extérieurs fixes

30% des systèmes famille-exploitation comportent des actifs vivant dans le ménage et travaillant en permanence hors de l'exploitation.

Dans le modèle, parmi les 30% des exploitations qui ont des revenus extérieurs, le nombre d'actifs salariés suit la règle résumée dans le tableau 40 :

Tab. 41 : nombre d'actifs ayant un revenu extérieur dans les exploitations concernées

nb d'actifs dans la famille	nb d'actifs ayant un revenu extérieur
<3	1
3-6	1 à 3
>6	1 à 5

Tab. 42 : niveaux de salaires des actifs ayant un revenu extérieur

350 à 1500 DT	18% des cas
1500 à 2500 DT	30%
2500 à 4000 DT	9%
4000 à 6000 DT	40%

Épargne de départ

Tab. 43 : niveaux d'épargne de départ selon l'accès à l'eau et la taille

90% exploitation sans accès à l'eau < 10 ha	0 à 2000 DT
10% exploitation sans accès à l'eau < 10 ha	-5000 à 0 DT
60% exploitation sans accès à l'eau 10-15 ha	0 à 4000 DT
40% exploitation sans accès à l'eau 10-15 ha	-5000 à 0 DT
exploitation sans accès à l'eau > 15 ha	0-6000 DT
70 % exploitations en PPI	0-6000 DT
30% exploitations en PPI	-5000 -0 DT
50% exploitations dotées d'un puits	0 à 7000 DT
40% exploitations dotées d'un puits	-3000 à 0
10% exploitations dotées d'un puits	-10 000 à -3000
50% exploitations dotées de plusieurs puits	0 à 10 000
20% exploitations dotées de plusieurs puits	-3000 à 0
30% exploitations dotées de plusieurs puits	-10 000 à -3000

Annexe 3.k. Lien entre dépenses familiales et revenus

- Si épargne <0 et trésorerie <0 alors dépenses familiales=300 DT/an/actif
- Sinon, si trésorerie<0 et famille >5 alors dépenses familiales=500 DT/an/actif
- Sinon dépenses familiales=1500 DT/an/actif

Annexe 3.I. Diversification des revenus

Une fois la surface à irriguer décidée pour la saison, les actifs n'ayant pas un travail hors exploitation et non sollicités par les travaux aux champs, peuvent devenir ouvriers agricoles pour la saison. Cette méthode a été appelée "diversification des revenus".

- Si la trésorerie, la surface agricole en propriété et l'épargne sont positifs, alors le nombre d'actifs destinés au travail journalier à l'extérieur de l'exploitation est choisi aléatoirement entre 0 et la moitié du nombre d'actifs disponibles.
- Sinon, si le nombre d'actifs disponibles est supérieur à 10, alors 10 personnes sont consacrées aux travaux journaliers à l'extérieurs ; s'il y a moins de 10 actifs disponibles, alors tous deviennent ouvriers agricoles à la saison.

En moyenne, les ouvriers agricoles gagnent 300 DT à la saison.

Pour enrayer la surexploitation des nappes en accès libre, une gestion de la demande en eau est de plus en plus préconisée. Jusqu'alors, la gestion des nappes a été étudiée par des modèles de fonctionnement du système physique, les usages étant modélisés simplement, sans tenir compte des comportements non marchands, des interactions locales entre usagers, et des investissements à long terme.

Le présent travail, fondé sur le cas de la nappe de Kairouan, vise à tenir compte plus explicitement des comportements socio-économiques réels et à fournir un outil d'aide à la décision. Le modèle SINUSE repose ainsi sur l'hypothèse centrale d'importance des interactions locale sur la dynamique globale. Il représente des agents autonomes communiquant et agissant dans un environnement distribué et réactif. Après avoir permis de tester la validité de l'hypothèse centrale, les simulations sont consacrées à l'évaluation des impacts de certains outils techniques, économiques et réglementaires. Dans le contexte du modèle et parmi les scénarios testés, l'instauration d'un quota semble constituer la mesure la plus efficace pour limiter l'abaissement de la nappe et le coût social de l'intervention de gestion. Si les résultats des simulations doivent être interprétés avec prudence, SINUSE, en tant que formalisation conjointe des dynamiques sociales et physiques du système, peut déjà constituer une base commune stimulant les discussions entre chercheurs et acteurs sur la représentation du système et sur les effets de différentes interventions.

TOWARDS A DEMAND MANAGEMENT ON A FREE-ACCESSIBLE WATERTABLE : EXPLORING INTERACTIONS BETWEEN WATER RESOURCE AND USES BY MULTI-AGENT SYSTEMS. Application to the Kairouan watertable, Center of Tunisia.

Demand management of water resources is more and more recommended to prevent the overexploitation of free-accessible watertables. Until now, models on watertable management have been focusing on physical processes, water demand being simply modelled, without taking into account non-market behaviours, local interactions between users, and long term investments.

The present work, based on the Kairouan watertable case, aims at accounting for more explicit socio-economic behaviours and at providing a tool for decision making. A model, named SINUSE, is therefore proposed, which lies on the main hypothesis that local interactions have an impact on the global dynamic of the system. This model represents autonomous agents, communicating and acting in a distributed and reactive environment. After having allowed to test the validity of the central hypothesis, simulations were devoted to assess the impacts of some technical, economical and regulatory tools of demand management. In the model context, and among the tested scenarios, the establishment of water quotas appears to be the most efficient tool to limit both the watertable falling and the social cost of the measure. Provided that the simulations results have to be cautiously interpreted, SINUSE, as a joint implementation of social and physical dynamics, can already constitute a common basis stimulating discussions between researchers and actors, about the system representation and about the effects of different management measures.

Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental

Mots-clés : interactions entre ressource en eau et usages, nappe en accès libre, nappe surexploitée, gestion de la demande, système multi-agents

Laboratoire d'hydrologie de l'IRD - Maison des Sciences de l'Eau - 911, avenue Agropolis, - BP 5045 Montpellier cedex 1