



HAL
open science

Accès à l'eau d'irrigation en Tunisie centrale étude des facteurs explicatifs de l'évolution des systèmes de production et modélisation économique du comportement des agriculteurs

Amal Azizi

► To cite this version:

Amal Azizi. Accès à l'eau d'irrigation en Tunisie centrale étude des facteurs explicatifs de l'évolution des systèmes de production et modélisation économique du comportement des agriculteurs. Sciences de la Terre. Montpellier SupAgro, 2018. Français. NNT : 2018NSAM0051 . tel-04542832

HAL Id: tel-04542832

<https://theses.hal.science/tel-04542832>

Submitted on 11 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

En Sciences Economiques

École doctorale EDEG – Économie et Gestion
Portée par l'Université de Montpellier

Unité de recherche G-Eau

Accès à l'eau d'irrigation en Tunisie centrale: étude des facteurs explicatifs de l'évolution des systèmes de production et modélisation économique du comportement des agriculteurs

Présentée par Amal Azizi
Le 10 décembre 2018

Sous la direction de Marielle Montginoul
Et co-direction de Sylvie MORARDET et Jean Louis FUSILLIER

Devant le jury composé de

Marielle MONTGINOUL, Directrice de recherche HDR, UMR G-Eau – IRSTEA Montpellier

Ali DAOUDI, Directeur de recherche HDR, Ecole Nationale Supérieure Agronomie Hassan Badi El Harrach – Alger

Aude RIDIER, Maître de conférences HDR, AGROCAMPUS OUEST – Rennes

Stefano FAROLFI, Chercheur CIRAD HDR, UMR G-Eau – CIRAD Montpellier

Sylvie MORARDET, Chercheure IRSTEA, UMR G-Eau – INAT Tunisie

Jean Louis FUSILLIER, Chercheur CIRAD, UMR G-Eau – CIRAD Montpellier

Directrice de la thèse

Rapporteur

Rapporteuse

Examineur

Invitée

Invité



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



Le Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques (Montpellier SupAgro) n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; elles doivent être considérées comme propres à son auteur.

REMERCIEMENTS

Je ne pourrai archiver ce document sans inclure mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué à me faire avancer dans cette aventure.

Je tiens à remercier Marielle Montginoul pour avoir accepté de diriger cette thèse et pour l'attention qu'elle a apportée à mon travail. Je vous remercie d'avoir été disponible et attentive. Je vous suis reconnaissante pour la confiance que vous m'avez accordée, les conseils que vous m'avez apportés. Merci de ne m'avoir jamais laissée sortir de vos bureaux sans un sourire aux lèvres et un millier d'idées.

Mes vifs remerciements s'adressent à mon encadrante Sylvie Morardet, de m'avoir suivie continuellement et avec bienveillance et rigueur scientifique, pour l'intérêt et la patience qu'elle a témoignés en suivant et en guidant ce travail et pour le temps qu'elle a consacré à sa relecture et à sa correction. Sylvie, je te remercie pour ton soutien inconditionnel personnel et professionnel, ta compréhension, tes précieux conseils et ta confiance témoignée tout au long de ce travail. Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'aide précieuse que tu n'as cessée de m'apporter.

Je tiens également à remercier Jean Louis Fusillier d'avoir suivi de près mes analyses et encadré mes réflexions parfois embrouillées. Merci pour nos discussions toujours passionnantes.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont accepté d'endosser le rôle de jury, et pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de ce travail de recherche. J'en suis très honorée.

Mes vifs remerciements vont également à tous les membres de mon comité de thèse qui ont joué un rôle prépondérant dans la détermination de mes choix et m'ont encouragé tout au long de cette thèse : Florence Jacquet, Sami Bouarfa et Julien Burte.

J'exprime ma profonde gratitude à Jacques Fabre pour m'avoir toujours aidé durant cette thèse et à chaque occasion que j'ai eu à le solliciter.

Un grand merci à Lassâad Albouchi, pour qui j'exprime toute ma reconnaissance pour sa disponibilité ainsi que pour ses précieux conseils et orientations qu'il m'a prodigués tout au long de l'élaboration de cette thèse.

J'ai également tiré parti, 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 Sylvain Massuel, Jean Christophe Poussin, Bruno Bonté, Christophe Le Page pour ces échanges.

J'ai pu travailler dans un cadre particulièrement agréable, grâce à mes collègues de bureau qui m'ont apporté à un moment ou à un autre, aide, conseil et amitié. Je pense particulièrement au Salem Idda, Houcem Ezzedine Houcem Braiki, Hamza Jerbi, Amal Sebai, Ines Gharbi, Davids Nortés Martinez toujours souriants et toujours disponibles. Merci à tous pour votre bonne humeur et pour toutes les discussions enrichissantes.

Je tiens également à remercier l'UMR G-EAU pour l'accueil et les conditions de travail privilégiées qui m'ont été offertes. Cela m'a permis d'enrichir mon expérience scientifique et humaine à travers les différents échanges et rencontres.

Un grand merci au Commissariat Régional de Développement Agricole de Kairouan (CRDA) ainsi qu'aux Groupements de Développement Agricole (GDA) et aux Cellules Territoriales de Vulgarisation (CTV) dans la zone de Chebika qui nous ont fourni les données nécessaires pour la réalisation de ce travail.

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. Je tiens à remercier Noomen Sakaa et Mouhamed Lotfi Ouhaibi qui, à plusieurs reprises, ont sillonné la plaine avec moi et m'ont fait bénéficier de leur connaissance de la région.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans une pensée pour mon ami Adel Jebali. Merci de m'avoir soutenu et encouragé, merci d'être toujours disponible durant les moments les plus difficiles et pour m'avoir changé les idées quand j'en avais besoin...

Il est difficile de n'oublier personne et je pourrais me contenter de remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin au bon déroulement et à l'aboutissement de cette recherche.

Enfin ma reconnaissance va à celles et ceux qui ont plus particulièrement assuré le soutien affectif de ce travail : mon père et à ma mère et mes sœurs pour leur amour et la bonne éducation qu'ils se sont toujours efforcés de m'inculquer. Leur valeur, leur rôle et leur importance sont immenses et inestimables.

A tous, encore MERCI

AVANT-PROPOS

Cette thèse, proposée par l'UMR G-EAU, a été cofinancée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique (Tunisie) et le CIRAD. Elle s'est effectuée dans le cadre du projet ANR AMETHYST (ANR-12-TMED-0006, <http://www.anr-amethyst.net/>) qui a financé le terrain.

Le projet de recherche AMETHYST (Assessment of changes in MEdiTerranean HYdro-resources in the South: river basin Trajectories), s'est déroulé entre août 2013 et mai 2018. Il a eu pour objectif principal d'analyser l'évolution des ressources en eau et de leur usage sous l'influence des changements climatiques et anthropiques en Afrique du Nord. Ce choix géographique du Maghreb est dû au large panel des évolutions des ressources en eau qu'a connues cette région. Deux cas d'études ont été explorés : le bassin de Merguellil, situé au centre de la Tunisie et le bassin de Tensift, dans la région de Marrakech, au Maroc. Ces deux sites ont été sélectionnés du fait de leur forte représentativité par rapport à la problématique de raréfaction de l'eau. Le projet de recherche a été conduit en interdisciplinarité, combinant sciences géophysiques, sociales, économiques et politiques. Il était divisé en trois axes de recherche. Le premier cherchait à analyser le fonctionnement des processus hydrologiques actuellement à l'œuvre. Le deuxième étudiait l'évolution passée des ressources en eau durant la période des cinquante dernières années. Le troisième axe s'intéressait au futur de la ressource et des usages, en prenant en compte les modifications climatiques et anthropiques. Notre thèse se positionne dans le premier axe, en adoptant cependant un regard rétrospectif sur les dix dernières années. A partir de ces informations, elle ambitionne enfin de pouvoir apporter des éléments de réflexion au troisième axe.

Cette thèse s'inscrit dans le champ de l'Economie. Or l'Economie est une discipline très vaste qui a ses propres domaines spécialisés et qui fait aussi appel à de multiples autres disciplines comme l'Agronomie, l'Hydraulique, la Sociologie, la Modélisation et les Statistiques, pour n'en nommer que quelques-unes. Notre formation d'origine est celui d'un ingénieur agro-économiste qui a travaillé sur des problématiques touchant à la fois l'économie et l'agronomie. Notre travail s'inscrit donc dans une perspective pluridisciplinaire; Nous invitons donc le lecteur spécialiste d'une discipline particulière à considérer notre travail dans cette perspective de pluridisciplinarité.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	4
AVANT-PROPOS.....	6
LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES.....	14
RESUME	15
ABSTRACT.....	17
INTRODUCTION GENERALE	18
CHAPITRE 1 LA PLAINE DE KAIROUAN UNE ZONE EMBLEMATIQUE : UNE NAPPE SOUTERRAINE SUREXPLOITEE ET UN CONTEXTE SOCIOECONOMIQUE CONTRASTE	27
1. INTRODUCTION	28
2. ELEMENTS GEOGRAPHIQUES PHYSIQUES	28
2.1. Localisation géographie de la plaine.....	28
2.2. La nappe, principale ressource en eau.....	31
2.3. Zonage agro-écologique de la plaine.....	33
3. HISTORIQUE DES TRANSFORMATIONS AGRAIRES DANS LA PLAINE DE KAIROUAN DES BERBERES NOMADES AU VINGTIEME SIECLE	34
3.1. Une occupation humaine ancienne marquée par les invasions.....	35
3.2. Une société tribale nomade aux 18 ^{ème} et 19 ^{ème} siècles	35
3.3. Le protectorat français de 1881 à 1956.....	36
3.4. L'indépendance et le développement des grandes infrastructures hydrauliques	36
4. DES SYSTEMES DE CULTURE DIVERSIFIES CONTRAINTS PAR LA DISPONIBILITE DES CAPITAUX	38
4.1. Les capitaux mobilisables par les agriculteurs kairouanais	38
4.2. Des systèmes de culture essentiellement déterminés par l'eau et la terre.....	42
5. UN MODE D'ACCES A L'EAU D'IRRIGATION DUAL	43
5.1. Les périmètres publics irrigués (PPI)	44
5.2. Un développement incontrôlé de l'irrigation privée	46
6. UNE NAPPE SUREXPLOITEE MALGRE LES TENTATIVES DE GESTION MISES EN PLACE	50
6.1. Un niveau en baisse continue dès les années 1980	50
6.2. Des tentatives de gestion insuffisantes de la demande sur la nappe de Kairouan	53
7. CONCLUSION	54
CHAPITRE 2 APPROCHE METHODOLOGIQUE GENERALE.....	55
1. INTRODUCTION	56
2. VUE D'ENSEMBLE SUR LA DEMARCHE GLOBALE.....	56
3. LES APPROCHES DE MODELISATION DE LA DEMANDE EN EAU AGRICOLE	59
3.1. Approche systémique.....	59
3.2. Quel modèle pour étudier le comportement des irrigants face à un accès diversifié à la ressource? 60	
4. USAGE DES MODELES DE PROGRAMMATION MATHEMATIQUE POUR LA GESTION DE L'EAU AGRICOLE	67
4.1. Traiter les problèmes de pénurie d'eau et les comportements d'adaptation qui en découlent	68
4.2. Identifier l'effet de la tarification de l'eau sur la demande en eau	68
4.3. Evaluation de l'adoption d'une nouvelle technologie.....	68
4.4. Modélisation des marchés d'eau.....	69
4.5. Evaluer l'impact des changements globaux.....	69
5. REFLEXION SUR LA MODELISATION DU SYSTEME ETUDIE	70
6. APPROCHE DE TERRAIN ET COLLECTE DES DONNEES	73
6.1. Elaboration des guides d'entretien et questionnaires	74
6.2. L'enquête auprès des GDA	75
6.3. L'inventaire des exploitations	75
6.4. L'enquête auprès des exploitations	76

6.5.	<i>Recueil de références technico-économiques sur les différentes cultures</i>	77
6.6.	<i>Conditions de réalisation de l'étude</i>	78
7.	CONCLUSION	78
CHAPITRE 3 L'EXPANSION DES FORAGES AGRICOLES ILLICITES : CAUSE OU CONSEQUENCE DE LA DEGRADATION DE L'ACCES COLLECTIF A L'EAU ?		80
1.	INTRODUCTION	81
2.	METHODOLOGIE ET CAS D'ETUDE.....	82
2.1.	<i>Cas d'étude</i>	82
2.2.	<i>La démarche adoptée</i>	82
3.	LA PROMOTION DES ASSOCIATIONS D'USAGERS EN TUNISIE POUR FAVORISER LE DEVELOPPEMENT AGRICOLE : HISTORIQUE ET ETAT DES LIEUX SUR L'AQUIFERE DE KAIROUAN	83
3.1.	<i>L'accès collectif à l'eau d'irrigation en Tunisie : historique</i>	83
3.2.	<i>L'accès collectif à l'eau d'irrigation : état des lieux sur l'aquifère de Kairouan</i>	86
4.	L'ACCES COLLECTIF A L'EAU. BILAN DE LA SANTE DES GDA	88
4.1.	<i>Construction d'une grille d'analyse et typologie des GDA</i>	88
4.2.	<i>Analyse des écarts de performance entre les différents GDA: Etude de cas de 3 GDA</i>	91
4.3.	<i>Résumé des principaux enseignements</i>	97
5.	L'EXPANSION DES FORAGES PRIVES : PARFOIS CAUSE PARFOIS CONSEQUENCE DE LA DEGRADATION DE L'ACCES COLLECTIF A L'EAU.....	98
5.1.	<i>Un recours généralisé aux forages privés</i>	98
5.2.	<i>Une décision de forer prise pour maximiser son intérêt individuel et rendue possible par la faiblesse du pouvoir de police</i>	99
5.3.	<i>Une expansion des forages individuels aux effets collectifs hautement négatifs</i>	100
6.	CONCLUSION : LA DIFFICILE RESOLUTION DE L'EQUATION DU DEVELOPPEMENT DURABLE CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	101
CHAPITRE 4 SITUATIONS DIVERSIFIEES, TRAJECTOIRES CONTRASTEES DES EXPLOITATIONS AGRICOLES AUTOUR D'UNE NAPPE SUREXPLOITEE EN TUNISIE CENTRALE		104
1.	INTRODUCTION	105
2.	REVUE DES METHODES D'ELABORATION DES TYPOLOGIES D'EXPLOITATIONS.....	107
2.1.	<i>Principes et applications dans la région du kairouanais</i>	107
2.2.	<i>Finalité de la typologie des exploitations agricoles</i>	109
2.3.	<i>Les méthodes typologiques</i>	110
2.4.	<i>La prise en compte des dynamiques dans les typologies</i>	111
3.	APPROCHE METHODOLOGIQUE	114
3.1.	<i>Collecte des données et échantillonnage</i>	114
3.2.	<i>Analyse multivariée</i>	117
3.3.	<i>Analyse des trajectoires individuelles des exploitations</i>	120
4.	RESULTATS.....	120
4.1.	<i>Dynamique globale de la zone d'étude entre 2005 et 2015</i>	120
4.2.	<i>Analyse de la diversité des exploitations agricoles dans la plaine de Kairouan en 2005 et 2015</i> 133	
4.3.	<i>Description des types d'exploitations</i>	141
5.	LES TRAJECTOIRES DES EXPLOITATIONS AGRICOLES FRUIT DES CHOIX STRATEGIQUES DANS UN ENVIRONNEMENT PARTAGE.....	148
5.1.	<i>Aperçu des trajectoires individuelles des exploitations entre 2005 et 2015</i>	149
5.2.	<i>Environnement partagé des exploitations</i>	152
5.3.	<i>Mécanismes d'évolution des exploitations agricoles</i>	159
6.	CONCLUSION	170
CHAPITRE 5 DU TERRAIN AU MODELE : QUELLE DEMANDE EN EAU EN PRESENCE DE DIFFERENTS MODES D'ACCES A LA RESSOURCE ?.....		174
1.	INTRODUCTION	175
2.	MODELISATION DU COMPORTEMENT DES IRRIGANTS	175

2.1.	<i>Description générale du modèle.....</i>	175
2.2.	<i>Définition des activités de production.....</i>	177
2.3.	<i>Les contraintes modélisées.....</i>	178
2.4.	<i>Fonction objectif et prise en compte du risque.....</i>	185
3.	CALIBRAGE ET VALIDATION DU MODELE	188
4.	LES SCENARIOS SIMULES	189
5.	ANALYSE DES RESULTATS	190
5.1.	<i>Analyse des résultats du modèle dans la situation de référence.....</i>	190
5.2.	<i>Analyse des résultats des simulations.....</i>	193
6.	CONCLUSION	211
	CONCLUSION GENERALE ET DISCUSSION.....	216
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	224

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS A DIRES D'ACTEURS DANS LE SECTEUR D'EL HAMMEM (BRAIKI, 2013).....	236
ANNEXE 2 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS MARAICHERES SUR LES SECTEURS DE CHEBIKA ET BEN SALEM (GHILEB, 2014).....	237
ANNEXE 3 : GRILLE D'ANALYSE DES CINQ CAPITAUX D'UNE EXPLOITATION AGRICOLE (BOUAZIZI, 2016).....	239
ANNEXE 4 : TYPOLOGIE DES SYSTEMES DE PRODUCTION ET SYSTEMES TECHNIQUES ASSOCIES DANS LE SECTEUR D'ABIDA (MAULINE, 2012).....	240
ANNEXE 5 : IDENTIFICATION ET CARACTERISTIQUES GENERALES DES PPI PAR SECTEUR (CRDA KAIROUAN) .	242
ANNEXE 6 : ENTRETIEN AVEC LES AGENTS DU CRDA	243
ANNEXE 7 : ENTRETIEN AVEC LES AGENTS DU GDA.....	245
ANNEXE 8 : ENTRETIEN AVEC LES AGENTS DE LA CTV.....	248
ANNEXE 9 : ENTRETIEN AVEC LES AGRICULTEURS.....	250
ANNEXE 10 : ENQUETE PRELIMINAIRE AUPRES DES AGRICULTEURS DE LA PLAINE DE KAIROUAN	254
ANNEXE 11 : ENQUETE TECHNICO-ECONOMIQUES « USAGE-RESSOURCE » AUPRES DES AGRICULTEURS DE LA PLAINE DE KAIROUAN	261
ANNEXE 12 : STATISTIQUES DES 150 EXPLOITATIONS ENQUETEES EN 2005 (DONNEES DE STRUCTURE ET D'ASSOLEMENT).....	273
ANNEXE 13 : STATISTIQUES DES 69 EXPLOITATIONS COMMUNES ENQUETEES EN 2005 (DONNEES DE STRUCTURE ET D'ASSOLEMENT)	274
ANNEXE 14 : STATISTIQUES DES 126 EXPLOITATIONS ENQUETEES EN 2015 (DONNEES DE STRUCTURE ET D'ASSOLEMENT).....	275
ANNEXE 15 : STATISTIQUES DES 69 EXPLOITATIONS COMMUNES ENQUETEES EN 2015 (DONNEES DE STRUCTURE ET D'ASSOLEMENT)	276
ANNEXE 16 : LES CARACTERISTIQUES DES GROUPES D'EXPLOITATIONS IDENTIFIES EN 2005.....	277
ANNEXE 17 : LES CARACTERISTIQUES DES GROUPES D'EXPLOITATIONS IDENTIFIES EN 2015.....	278
ANNEXE 18 : CARACTERISTIQUES DES FORAGES PAR TYPE D'EXPLOITATION.....	279
ANNEXE 19 : CALCUL DE LA DIFFERENCE DE RENDEMENT ENTRE UNE CULTURE EN INTERCALAIRE ET UNE CULTURE EN PLEIN CHAMP (EXEMPLE TOMATE)	280
ANNEXE 20 : LES HYPOTHESES DE CALCUL DE LA DISPONIBILITE MENSUELLE EN EAU POUR LE CAS DU GDA ET DU FORAGE.....	281
ANNEXE 21 : LES PRIX RELATIFS DES PRODUITS AGRICOLES (2005, BASE 100)	282

LISTE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1-1 : LOCALISATION DU BASSIN VERSANT MERGUELLIL ET DECOUPAGE ADMINISTRATIF EN DELEGATIONS -	29
.....	
FIGURE 1-2 : LOCALISATION ET CARACTERISATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	31
FIGURE 1-3 : LA NAPPE DE KAIROUAN ET SES ECHANGES AVEC D'AUTRES AQUIFERES.....	32
FIGURE 1-4 : L'EMERGENCE DU BARRAGE EL HOUWAREB.....	33
FIGURE 1-5 : ZONAGE AGRO-ECOLOGIQUE DE LA PLAINE DE KAIROUAN.....	34
FIGURE 1-6 : LES INONDATIONS DE 1969 DE LA PLAINE DE KAIROUAN.....	37
FIGURE 1-7 : ZONAGE INFLUENCE DE L'ACCES AUX FACTEURS DE PRODUCTION SUR LES SYSTEMES DE CULTURES (EXPLOITATION AGRICOLE FAMILIALE : EAF).....	43
FIGURE 1-8 : EVOLUTION DES APPORTS ET DES PRELEVEMENTS D'IRRIGATION DU BARRAGE EL HOUWAREB ENTRE 1989 ET 2014.....	45
FIGURE 1-9 : ETAT DU BARRAGE EL HOUWAREB EN 2015 (*).....	45
FIGURE 1-10 : LE MOUVEMENT D'APPROFONDISSEMENT ET DE CREUSEMENT DES FORAGES PRIVES QUI FONCTIONNENT EN MAJORITE PAR LE GASOIL.....	49
FIGURE 1-11. PRODUCTIVITE AGRICOLE DU PIMENT ET VALORISATION DE L'EAU SELON L'ACCES A L'EAU.....	49
FIGURE 1-12 : POSITION DES DIFFERENTS PIEZOMETRES DANS LA ZONE D'ETUDE.....	51
FIGURE 1-13 : LA BAISSSE MOYENNE ANNUELLE DES PIEZOMETRES DE LA ZONE D'ETUDE (M).....	51
FIGURE 1-14 : EVOLUTION ANNUELLE MOYENNE DU NIVEAU DE LA NAPPE POUR DIFFERENTS PIEZOMETRES (M)..	52
FIGURE 2-1 : DEMARCHE D'ENSEMBLE DE LA THESE.....	58
FIGURE 2-2 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU SYSTEME ETUDIE.....	71
FIGURE 3-1 : EVOLUTION DE LA GESTION INSTITUTIONNELLE DE L'IRRIGATION EN TUNISIE.....	85
FIGURE 3-2 : SYSTEME ETUDIE.....	87
FIGURE 3-3 : EVOLUTION DE LA PART DES GDA FONCTIONNELS ENTRE 2007 ET 2015.....	89
FIGURE 3-4 : LOCALISATION DU PERIMETRE EL HOUWAREB ET DES ZONES JBISSA ET SWENI.....	93
FIGURE 3-5 : REPARTITION DES FORAGES PRIVES DANS LA ZONE D'ETUDE.....	99
FIGURE 3-6 : LES POLITIQUES DE GESTION DES RESSOURCES SOUTERRAINES EN TUNISIE.....	102
FIGURE 4-1 : APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	115
FIGURE 4-2 : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES EXPLOITATIONS ENQUETEES EN 2015.....	116
FIGURE 4-3 : REPARTITION DES EXPLOITATIONS PAR ORIENTATION DE PRODUCTION ET IMADA (EFFECTIF D'EXPLOITATIONS).....	123
FIGURE 4-4 : PART DE L'EFFECTIF DES EXPLOITATIONS IRRIGUEES EN 2005 ET 2015.....	124
FIGURE 4-5 : EVOLUTION DES SYSTEMES DE CULTURE ENTRE 2005 ET 2015 (ECHANTILLON GLOBAL : 126 EXPLOITATIONS ET 2005 HA EN 2015 ET 150 EXPLOITATIONS ET 2839 HA EN 2005) EN % DE LA SUPERFICIE TOTALE.....	127
FIGURE 4-6 : EVOLUTION DE LA CONSOMMATION EN EAU AGRICOLE DANS LA PLAINE DE KAIROUAN ENTRE 1999 ET 2015.....	132
FIGURE 4-7 : PROJECTION DES VARIABLES DE STRUCTURE 2005 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,2).....	134
FIGURE 4-8 : PROJECTION DES VARIABLES DE STRUCTURE 2005 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,3).....	134
FIGURE 4-9 : PROJECTION DES VARIABLES D'ASSOLEMENT 2005 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,2).....	135
FIGURE 4-10 : PROJECTION DES VARIABLES D'ASSOLEMENT 2005 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,3).....	135
FIGURE 4-11 : PROJECTION DES VARIABLES DE STRUCTURE ET D'ASSOLEMENT DE 2005 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,2) DE CO-INERTIE.....	136
FIGURE 4-12 : PROJECTION DES VARIABLES DE STRUCTURE ET D'ASSOLEMENT DE 2005 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,3) DE CO-INERTIE.....	136
FIGURE 4-13 : PROJECTION DES VARIABLES DE STRUCTURE 2015 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,2).....	137
FIGURE 4-14 : PROJECTION DES VARIABLES DE STRUCTURE 2015 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,3).....	137
FIGURE 4-15 : PROJECTION DES VARIABLES D'ASSOLEMENT SUR LE PLAN FACTORIEL (1,2).....	138
FIGURE 4-16 : PROJECTION DES VARIABLES D'ASSOLEMENT SUR LE PLAN FACTORIEL (1,3).....	138
FIGURE 4-17 : PROJECTION DES VARIABLES DE STRUCTURE ET D'ASSOLEMENT DE 2015 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,2) DE CO-INERTIE.....	139
FIGURE 4-18 : PROJECTION DES VARIABLES DE STRUCTURE ET D'ASSOLEMENT DE 2015 SUR LE PLAN FACTORIEL (1,3) DE CO-INERTIE.....	139

FIGURE 4-19 : PROJECTION DES CLASSES D'EXPLOITATIONS SELON LES STRUCTURES EN 2005 SUR LE PLAN FACTORIEL 1-2 DE L'ACP.....	141
FIGURE 4-20 : PROJECTION DES TYPES D'EXPLOITATIONS EN 2015 SUR LE PLAN FACTORIEL 1-2 DE L'ACP SUR LES VARIABLES DE STRUCTURE.....	144
FIGURE 4-21 : EVOLUTION DES SYSTEMES DE CULTURES ENTRE 2005 ET 2015 (69 EXPLOITATIONS COMMUNES) EN % DES SURFACES AGRICOLES	151
FIGURE 4-22 : EVOLUTION DES PRIX AU MARCHE DE GROS DES CULTURES MARAICHERES PLAINES DE KAIROUAN 2005 - 2015	154
FIGURE 4-23 : EVOLUTION DES PRIX AU STADE MARCHE DE GROS DE QUELQUES PRODUITS ARBORICOLES	155
FIGURE 4-24 : EVOLUTION DE PRIX DE KWH D'ELECTRICITE : TARIF AGRICOLE	157
FIGURE 4-25 : EVOLUTION DE PRIX DE GASOIL (PAR LITRE).....	157
FIGURE 4-26 : LES TRAJECTOIRES D'EVOLUTION DES EXPLOITATIONS ENTRE 2005 ET 2015.....	168
FIGURE 4-27 : LES MECANISMES ET STRATEGIES ADOPTEES DANS UN ENVIRONNEMENT PARTAGE.....	169
FIGURE 5-1 : OBJECTIF DU MODELE CONSTRUIT	176
FIGURE 5-2 : LA VARIATION DES BESOINS MENSUELS EN EAU D'IRRIGATION ENTRE QUELQUES CULTURES PRATIQUEES PAR LES AGRICULTEURS	183
FIGURE 5-3 : COMPARAISON DE L'ASSEMBLEMENT D'UNE EXPLOITATION POSSEDANT UN FORAGE ET D'UNE AUTRE QUI IRRIGUE SEULEMENT A PARTIR DU GDA	191
FIGURE 5-4 : SIMULATION 1 : EFFETS D'UNE VARIATION DU PRIX DE L'EAU DU GDA POUR UNE EXPLOITATION QUI IRRIGUE UNIQUEMENT A PARTIR DU GDA	195
FIGURE 5-5 : SIMULATION 2 : EFFETS D'UNE VARIATION DU COUT DE POMPAGE POUR UNE EXPLOITATION QUI IRRIGUE SEULEMENT A PARTIR D'UN FORAGE.....	198
FIGURE 5-6 : SIMULATION 3 : EFFETS D'UNE VARIATION DU COUT DE POMPAGE DANS LE CAS D'UN PRIX FAIBLE DE L'EAU DU GDA (0,160 DNT/M ³).....	201
FIGURE 5-7 : SIMULATION 4 : EFFETS D'UNE VARIATION DU COUT DE POMPAGE DANS LE CAS D'UN PRIX ELEVE DE L'EAU DU GDA (3 DNT/M ³).....	204
FIGURE 5-8 : SIMULATION 5 : EFFETS D'UNE VARIATION DU PRIX DE L'EAU DU GDA DANS LE CAS D'UN COUT DE POMPAGE FAIBLE (0,500 DNT/M ³)	205
FIGURE 5-9 : SIMULATION 6 : EFFETS D'UNE VARIATION DU PRIX DE L'EAU DU GDA DANS LE CAS D'UN COUT DE POMPAGE ELEVE (3 DNT/M ³)	206
FIGURE 5-10 : SIMULATION 7 : EFFETS D'UNE VARIATION DE L'EFFICIENCE DU GDA POUR UNE EXPLOITATION QUI IRRIGUE SEULEMENT A PARTIR DU GDA	208
FIGURE 5-11 : SIMULATION 8 : EFFETS D'UNE VARIATION DE L'EFFICIENCE DU GDA POUR UNE EXPLOITATION QUI IRRIGUE A PARTIR DU GDA ET DU FORAGE.....	210
FIGURE 5-12 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE LA DEMANDE EN EAU GLOBALE SELON LE COUT DE POMPAGE DU FORAGE POUR DIFFERENTES SITUATIONS D'ACCES A L'EAU	213
FIGURE 5-13 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE LA DEMANDE EN EAU GLOBALE SELON LE PRIX DE L'EAU DU GDA POUR DIFFERENTES SITUATIONS D'ACCES A L'EAU.....	213

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1 : REPARTITION DES PERIMETRES PUBLICS IRRIGUES ET PRIVES DANS LES DELEGATIONS DE CHEBIKA ET HAFFOUZ	44
TABLEAU 1-2 : EVOLUTION DU NOMBRE DES PUIITS ET DES PRELEVEMENTS SUR LA NAPPE	46
TABLEAU 1-3 : REPARTITION DES PUIITS PRIVES PAR IMADA ET PERIODE DE CONSTRUCTION	47
TABLEAU 1-4 : REPARTITION DES PUIITS PRIVES SELON LE TYPE D'EQUIPEMENT ET L'IMADA	48
TABLEAU 1-5 : BILAN DE LA NAPPE EN 2015	50
TABLEAU 3-1 : IDENTIFICATION ET CARACTERISTIQUES GENERALES DES PPI PAR SECTEUR	87
TABLEAU 3-2 : CARACTERISTIQUES MOYENNES DES TROIS TYPES DE GDA	91
TABLEAU 3-3 : REPARTITION DES TYPES DE GDA PAR SECTEUR	91
TABLEAU 4-1 : NOMBRE D'EXPLOITATIONS RECENSEES ET ENQUETEEES EN 2005 ET 2015	116
TABLEAU 4-2 : LES VARIABLES UTILISEES DANS LA CONSTRUCTION DES TYPOLOGIES	118
TABLEAU 4-3 : EVOLUTION DES EFFECTIFS ET SUPERFICIES DES EXPLOITATIONS PAR IMADA ENTRE 2005 ET 2015	121
TABLEAU 4-4 : CLASSIFICATION DES EXPLOITATIONS EN 2005 ET 2015 : CARACTERES DOMINANTS, EFFECTIFS ET SUPERFICIE EN % DU TOTAL, SUPERFICIE MOYENNE	125
TABLEAU 4-5 : LES SYSTEMES DE CULTURES PRATIQUES DANS L'ECHANTILLON DE 2005 (150 EXPLOITATIONS) ET 2015 (126 EXPLOITATIONS)	128
TABLEAU 4-6 : LA VARIATION DE LA DEMANDE EN EAU PAR MODE D'ACCES A LA RESSOURCE	130
TABLEAU 4-7 : LA VARIATION DE LA CONSOMMATION EN EAU PAR CLASSE DE SUPERFICIE	130
TABLEAU 4-8 : ESTIMATION DES PRELEVEMENTS PAR LES FORAGES PRIVES.....	131
TABLEAU 4-9 : ESTIMATION DES PRELEVEMENTS PAR ZONE AGRICOLE	132
TABLEAU 4-10 : RECAPITULATIF SUR LES VARIABLES STRUCTURANT LES TYPOLOGIES EN 2005 ET 2015	140
TABLEAU 4-11 : MATRICE DE PASSAGE DES EXPLOITATIONS ENTRE 2005 ET 2015.....	150
TABLEAU 5-1 : COMPARAISON DES INDICATEURS ECONOMIQUE, ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL POUR TROIS SITUATIONS D'ACCES A L'EAU POUR UNE EXPLOITATION DU GROUPE 4.....	190
TABLEAU 5-2 : SUPERFICIES CULTIVEES ET STRATEGIES D'IRRIGATION APPLIQUEES POUR CHAQUE SITUATION D'ACCES A L'EAU	192

LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIC	Associations d'Intérêt Collectif
ASIH	Associations Spéciales d'Intérêt Hydraulique
BVM	Basse Vallée de Madjerda
CA	Conseil d'Administration
CES	Conservation des Eaux et du Sol
CRDA	Commissariat Régional Au Développement Agricole
CTV	Techniques de Mise en Valeur
DHW	Directions de l'Hydraulique des Wilayas
DNT	Dinar Tunisien (1 DNT = 0.308 EUR au 4 ^e trimestre 2018)
DPH	Domaine Public Hydraulique
DT	Directeur Technique
EAF	Exploitation Agricole Familiale
ETM	Evapotranspiration Maximale
GAMS	General Algebraic Modelling System
GDA	Groupements de Développement Agricole
GIC	Groupement d'Intérêt Collectif
GIH	Groupement d'Intérêt Hydraulique
GRN	Gestion des Ressources Naturelles
INS	Institut Nationale de Statistique
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
Kc	Coefficients Culturels
LEMA	Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques
MARH	Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques
MOTAD	Minimization of Total Absolute Deviation
OMIVA	Offices de Mise en Valeur Agricole
OUGC	Organisme Unique de Gestion Collective
PAC	Politique Agricole Commune
PASA	Plan d'Ajustement Structurel Agricole
PML	Programmation Mathématique Linéaire
PMP	Programmation Mathématique Positive
PPI	Périmètres Publics Irrigués
PSD	Programmation Stochastique Discrète
SAU	Superficie Agricole Utile
STEG	Société Tunisienne d'Electricité et Gaz
UTAP	Union Tunisienne de l'Agriculture et de la Pêche
WPM	Water Programming Models

RESUME

Le développement rapide de l'usage des eaux souterraines pour l'irrigation en Tunisie a permis une croissance agricole considérable. Mais, dans de nombreuses régions, un tel développement devient « non durable ». C'est le cas pour la plaine de Kairouan en Tunisie centrale qui connaît actuellement une expansion exacerbée des forages illicites difficilement contrôlés.

Le présent travail cherche à identifier les évolutions qui ont accompagné cette « révolution silencieuse » et vise à comprendre le comportement des irrigants face à une diversité accrue des modes d'accès à la ressource. Cela a été fait en trois temps.

Nous avons d'abord cherché à évaluer la performance de la gestion collective de l'eau en se basant sur une grille d'analyse co-construite avec les acteurs. Cette grille permet de proposer une typologie des situations rencontrées et d'expliquer les écarts de performance observés et estimer leur impact sur le recours à l'irrigation privée. Nous avons ensuite analysé les dynamiques récentes d'évolution des systèmes de production et estimé la demande en eau agrégée qui en résulte. Cette analyse globale a été complétée par une analyse des comportements individuels qui a permis d'affiner la compréhension des différents modes d'accès à la ressource, les réorientations productives et les stratégies adaptatives des irrigants. Elle a permis enfin de modéliser le comportement des irrigants face à différents modes d'accès à l'eau et en tenant compte de plusieurs stratégies d'irrigation. L'objectif poursuivi a été alors de comprendre la façon dont les agriculteurs font leurs choix, d'identifier les déterminants clés de leur demande et le degré de flexibilité de leur assolement. Le modèle construit a ainsi permis d'explorer différents scénarios (prix de l'eau collective, l'efficacité de l'accès à l'eau collectif et coût de pompage) qui peuvent apporter quelques éléments d'éclairages aux gestionnaires de la ressource pour enrayer la surexploitation des nappes.

Pour conduire cette recherche, des entretiens et des enquêtes ont été menés sur la plaine de Kairouan auprès d'autorités locales, des gestionnaires de structures de gestion collective et d'agriculteurs. Une enquête a notamment été réalisée en 2015 auprès de 126 exploitations irrigantes de 7 secteurs de la plaine de Kairouan, dont 69 avaient déjà été enquêtées en 2005. Elle a permis de construire une typologie d'exploitations en 8 types sur la base des données de structure, de comparer la diversité des systèmes de production entre les deux dates et de retracer les trajectoires d'évolution.

Les résultats concluent à une dégradation du service de distribution collective de l'eau, ce qui a accentué le recours aux forages, illustrant la classique « tragédie des communs ». Les dynamiques agricoles sont marquées par un morcellement aigu, une généralisation de l'irrigation et une régression du potentiel agricole mais compensé par une grande intensification. Ces évolutions ont été accompagnées par une hausse de la demande en eau régionale qui atteint environ 55 Mm³. Freiner cette évolution est difficile, la modélisation effectuée semble montrer que deux leviers intéressants pourraient toutefois y contribuer :

Résumé

renchérir le coût du pompage via une augmentation du coût de l'électricité et améliorer l'efficiency des services de distribution collective.

Mots clés : eau souterraine, surexploitation, dynamiques agricoles, diversité, trajectoires, modélisation, simulati

ABSTRACT

The rapid development of the use of groundwater for irrigation in Tunisia has led to considerable agricultural growth. But in many regions, such development becomes "unsustainable". This is the case for the Kairouan plain in central Tunisia, which is currently experiencing an exacerbated expansion of illicit drilling that is difficult to control.

The objective of this work is to identify the changes that have accompanied this "silent revolution" and to understand the behaviour of irrigators in the face of increased diversity in terms of access to the resource. This was done in three stages.

We first tried to evaluate the performance of collective water management based on an analysis grid co-constructed with the stakeholders. This grid allows proposing a typology of the situations encountered and to explain the observed performance gaps and estimate their impact on the use of private irrigation. We then analysed the recent dynamics of changes in production systems and estimated the resulting aggregate water demand. This global analysis was complemented by an analysis of individual behaviours that helped to refine the understanding of the different modes of access to the resource, productive reorientations and adaptive strategies of irrigators. Finally, it allows modelling the behaviour of irrigators with regard to different modes of access to water and taking into account several irrigation strategies. The objective was then to understand how farmers make their choices to identify the key determinants of their demand and the degree of flexibility of their crop rotation. The model thus allows exploring different scenarios (collective water prices, the efficiency of access to collective water and the cost of pumping) that can provide some insights for resource managers to prevent overexploitation of groundwater.

In order to conduct this research, interviews and surveys were conducted on the Kairouan plain with local authorities, managers of collective management structures and farmers. In particular, a survey was carried out in 2015 on 126 irrigating farms in 7 sectors of the Kairouan plain, 69 of which had already been surveyed in 2005. It allows the construction of a typology of farms into 8 types on the basis of structural data, to compare the diversity of production systems between the two dates and to trace the evolutionary trajectories.

The results conclude that the collective water distribution service is deteriorating, which has increased the use of boreholes, illustrating the classic "tragedy of the commons". Agricultural dynamics are marked by acute fragmentation, widespread irrigation and a decline in agricultural potential, but offset by a major intensification. These developments have been accompanied by an increase in regional water demand to around 55 Mm³. Curbing this trend is difficult, but the modelling carried out shows that two interesting levers could nevertheless contribute to it: increasing the cost of pumping through an increase in the cost of electricity and improving the efficiency of collective distribution services.

Keywords: groundwater, overexploitation, agricultural dynamics, diversity, trajectories, modelling, simulation.

INTRODUCTION GENERALE

Des ressources souterraines d'importance majeure

Le recours à l'eau souterraine dans le monde est de plus en plus accentué. En Europe entre 70 et 80 % de l'eau provient des ressources souterraines, 52 % en Algérie (Faysse et al. 2012) et plus de 90 % dans des pays comme la Tunisie (Massuel et al. 2017; Kuper et al. 2016), Malte, l'Arabie Saoudite ou le Danemark (Zektser et Everett 2004). A l'échelle mondiale, elle répond ainsi à 50 % des besoins en eau potable, 40 % de la demande industrielle et 20 % des besoins agricoles (Figureau 2015).

Dans un contexte de changement climatique et de stress hydrique qui affecte plusieurs pays dans le monde, le recours aux ressources en eau souterraines dans l'agriculture est primordial. Elles constituent même dans certaines régions arides (Libye, Arabie Saoudite) la seule source d'approvisionnement. Dans les pays méditerranéens elle assure en moyenne 25% des besoins en eau d'irrigation.

En Tunisie, les ressources globales en eau sont estimées en 2008 à environ 4 700 Mm³ (INS 2016), dont 2 000 Mm³ sont des ressources souterraines (R. A. Atiri 2006). Plus de 43% de l'eau utilisée pour l'irrigation provient des ressources souterraines et 75% des eaux souterraines sont utilisées par les activités agricoles (Code des eaux 2015). Comme c'est le cas dans plusieurs pays, l'accès aux ressources souterraines a constitué un axe privilégié des politiques publiques permettant d'assurer le développement de l'agriculture irriguée et ainsi de répondre à la demande en produits agricoles et de préserver l'emploi en zone rurale. Cette agriculture a ainsi joué le rôle de moteur du développement régional et a permis la restructuration de l'espace rural par la diversification des activités économiques qui y sont menées.

Des motivations diverses expliquant un accès individuel accru aux ressources en eau souterraine par les agriculteurs

Plusieurs raisons expliquent le recours croissant des agriculteurs à un accès individuel à l'eau souterraine, qui peut paraître sous-optimal du point de vue de la collectivité. Tout d'abord il permet, aux agriculteurs qui ont les moyens d'investir dans un puit ou un forage, de s'affranchir des négociations avec les autres agriculteurs et les responsables gouvernementaux, qui sont nécessaires lorsque l'accès à l'eau est organisé de façon collective. Cela leur permet ainsi de réduire les coûts de transaction associés (coûts d'information, de négociation, de contestation...) (Llamas et Martínez-Santos 2005 ; Hammani et al. 2009).

Un deuxième motif est la résilience plus importante des aquifères aux périodes sèches, en comparaison avec les eaux de surface : sa grande inertie lui permet de résister aux changements climatiques jouant ainsi le rôle d'un tampon en supportant des pics de prélèvements exceptionnels en période de sécheresse (Figureau 2015 ; Schlager 2006 ; Ross et Martínez-Santos 2010). Elle est aussi facilement utilisable vu sa grande extension géographique qui le rend accessible sur tout le territoire irrigué (FAO 2003 ; Shah 2008).

D'autres facteurs expliquent cette croissance rapide de l'irrigation à partir d'eaux souterraines : la baisse des coûts d'installation et d'exploitation des forages grâce aux progrès techniques ; la diminution des surfaces moyennes par exploitation qui a conduit à une pression pour intensifier les systèmes de culture ; une demande croissante en eau due à une croissance démographique dans les pays de sud et des changements dans les assolements dans les pays de nord ; des politiques d'extension des zones irriguées et de subvention des équipements d'irrigation dans les pays de sud visant à diminuer la vulnérabilité du secteur agricole aux aléas climatiques et des incitations financières à l'irrigation par la Politique Agricole Commune (PAC) en Europe (jusque dans les années 1990) (Shah 2008).

Enfin, l'utilisation des ressources souterraines contribue à la transition économique et sociale de nombreux agriculteurs, permettant d'irriguer des cultures à forte valeur ajoutée, évolution qualifiée de « révolution silencieuse » par certains auteurs (Llamas et Martínez-Santos 2005).

Des ressources fragiles à usage non durable

Malgré les résultats enregistrés en termes d'extension des superficies irriguées et de développement socioéconomique dans différents pays, ce recours à l'eau souterraine est fragile. L'exploitation de cette ressource est très majoritairement non durable, en particulier en Afrique du Nord (Bzioui 2004), engendrant une baisse des niveaux des aquifères due à un déséquilibre entre le taux de renouvellement et de prélèvement de la ressource (Faysse et al. 2012)¹. Ceci est le résultat notamment de ce recours croissant aux ressources souterraines pour satisfaire les différents usages et notamment d'irrigation et de la multiplication des points de prélèvement dans un contexte réglementaire peu contraignant, marqué soit par l'absence de régulation (nappe en libre accès) et un contrôle inefficace des prélèvements, soit par des politiques mal adaptées (tarifs élevées ou inadéquation entre volumes autorisés et volumes disponibles).

En Tunisie, le nombre de puits avec des pompes électriques est ainsi passé de 60 000 en 1980 à 128 000 en 2000, soit une croissance annuelle de 5,6 %. Cette tendance a également été observée pour les puits équipés avec des pompes modernes à énergie solaire, dont le nombre est passé de 23 000 en 1980 à 87 000 en 2000, soit une augmentation annuelle de 6,8 % (Frija et al. 2015). En conséquence, il existe de nombreux signes d'épuisement des aquifères partout dans le pays : sur 273 aquifères, 71 sont surexploités avec un taux moyen d'exploitation de 146 % tels que l'aquifère de Sisseb el Alem et la plaine de Kairouan (TICET 2009).

Dans les zones méditerranéennes, les modèles de changement climatique prévoient ainsi une accentuation de ces déséquilibres : la hausse des températures conduisant à l'augmentation de l'évapotranspiration et à la diminution des précipitations engendrera une baisse des niveaux des aquifères et un recours plus important à la ressource pour satisfaire les besoins des cultures (pour compenser la croissance du déficit entre évapotranspiration et pluviométrie).

La surexploitation des nappes a plusieurs répercussions. Tout d'abord des conséquences environnementales (Changming, Jingjie, et Kendy 2001 ; Shah et al. 2003 ; Figureau 2015) :

¹ C'est en particulier le cas des aquifères du Souss, du Tadla, de Berrechid et du Saïss au Maroc (rabattement de 3 m par an), de ceux du Bas-Cheliff, de la plaine de Mascara et du plateau de Mostaganem en Algérie (Bahir et Mennani 2002), (Boudjadja, Messahel, et Pauc 2003).

pour les nappes peu profondes, cela provoque une baisse rapide des débits qui conduit à long terme par un dénoyage des pompes et ainsi à un retour à l'agriculture pluviale. Cela entraîne aussi des problèmes d'affaissement de terrain en surface et cause des dommages sur les écosystèmes (zones humides). Lorsque la nappe est située en zone côtière, la surexploitation peut conduire à l'intrusion saline : c'est ainsi le cas de la zone littorale de la Chaouia côtière au Maroc, de nombreux aquifères côtiers algériens (Boudjadja, Messahel, et Pauc 2003) et tunisiens (zone côtière du Cap Bon au nord-est de la Tunisie et quelques régions de sud (Nefzawa) (Zammouri et al. 2007). Dans d'autres cas, l'irrigation avec des eaux salées provoque une salinisation secondaire des sols (Douaoui, Hartani, et Lakehal 2006).

La surexploitation a aussi des effets économiques au niveau individuel comme pour la collectivité dans son ensemble. La baisse des niveaux des nappes entraîne des externalités de stock puisqu'elle génère une augmentation des coûts de forage et d'exhaure. Les exploitations de petite taille se trouvent incapables de surmonter les charges d'investissement et d'extraction tout en ne pouvant trouver des sources alternatives d'approvisionnement en eau. La pénurie d'eau souterraine de bonne qualité affecte aussi le développement économique local quand les agriculteurs ne sont pas en mesure de s'y adapter. Au niveau national, une telle situation peut amener à un exode rural ou à un transfert de la stratégie de chasse vers d'autres zones provoquant ainsi de nouveau la pression sur les eaux souterraines dans d'autres régions.

La surexploitation a aussi un effet sur la sécurité alimentaire des pays. Au niveau mondial, Postel (1999) estime ainsi à 10% la part de la production mondiale agricole fondée sur une surexploitation des nappes (Faysse et al. 2012).

La surexploitation a également des répercussions sociales (Ameur 2017), puisqu'elle affecte les agriculteurs les plus pauvres incapables de financer un investissement dans un forage privé (Mukherji 2006) ou de surmonter un coût supplémentaire d'exhaure. Elle génère ainsi des conflits entre les usagers.

Des agriculteurs qui s'adaptent individuellement à la surexploitation des nappes

Ces situations de surexploitation obligent les agriculteurs à s'adapter. Plusieurs stratégies sont ainsi développées : dans le cas des nappes profondes, les agriculteurs approfondissent leurs forages, adoptant ainsi une « stratégie verticale » ; lorsque la nappe est peu profonde et que les forages atteignent déjà son substrat, les agriculteurs mobilisent des stratégies « horizontales » : en créant des nouveaux forages plus loin (Faysse et al. 2012), en investissant dans des conduites d'irrigation pour amener l'eau à l'exploitation ou en allant cultiver des terres où l'eau est encore accessible.

D'autres stratégies sont développées : certains agriculteurs adaptent ainsi leurs assolements et leurs itinéraires techniques au niveau de disponibilité de la ressource sur leurs parcelles. De telles stratégies peuvent être conduites de manière collective : au Maroc (la nappe de Souss), face à la diminution du débit des forages, les agriculteurs ont converti collectivement leur système en irrigation localisée (Faysse et al. 2012). Dans d'autres cas, lorsque l'eau devient trop rare ou salée, certains choisissent de revenir à des cultures pluviales et de combler le déficit

de revenu par un revenu extra-agricole. Dans quelques périmètres de la région du Cap Bon en Tunisie, face à la salinisation des eaux, les agriculteurs mélangent l'eau souterraine avec l'eau du réseau public, de meilleure qualité, mais d'un coût plus élevé (Faysse et al. 2012).

Des dispositifs institutionnels et des initiatives locales pour lutter contre la surexploitation

Le constat des différents impacts de la surexploitation et des difficultés d'adaptation conduit les décideurs publics à mettre en place des politiques de régulation pour assurer le compromis entre la préservation de la ressource et le maintien de développement agricole.

Les modèles de gestion développés dans différents pays reposaient depuis des décennies sur la mobilisation d'une offre suffisante à travers l'investissement dans des grands projets hydrauliques. Ce modèle a vite montré ses limites et des conflits parfois violents finissent par s'installer entre les usagers (PNUE 2007) du fait de l'inégalité spatiotemporelle de la répartition de la ressource (FAO 2003). Le budget colossal que requiert la mobilisation des ressources en eau de surface pour la réalisation de nouvelles infrastructures et pour l'entretien de celles existantes (Imache 2008) constitue une lourde contrainte surtout pour les pays en voie de développement qui peinent à y faire face.

Dans les pays méditerranéens, notamment en Afrique du Nord, l'insuffisance des ressources en eau de surface rend l'accès aux nappes souterraines comme l'ultime solution pour les irrigants (Foster et al. 2000, S. Feuillette, Bousquet, et Le Goulven 2003).

Face à cette situation et suite aux échecs de la gestion centralisée de l'eau basée sur l'offre, un autre modèle de gestion basé notamment sur la demande en eau a été promu (FAO 2003). Cette transition a été accompagnée par la mise en place de différents instruments de gestion de la demande de nature autoritaire, consensuelle ou incitative.

Les différents instruments observés dans le monde sont basés sur la définition d'un volume de prélèvement durable sur la base des études hydrogéologiques. Ce volume extrait est réparti entre les différents usagers. Chacun a une allocation à ne pas dépasser. Ce système est appliqué dans plusieurs pays : l'ouest des Etats-Unis (Schlager 2006 ; Blomquist, Schlager, et Heikkila 2004), l'Australie (Ross et Martinez-Santos 2010), l'Espagne (Garrido, Martínez-Santos, et Llamas 2005), au Chili (Hearne et Donoso 2005). Plus récemment, des systèmes de régulation similaires sont encouragés en Europe, notamment en France (Figureau, Montginoul, et Rinaudo 2014). La répartition du volume alloué entre les usagers peut être réalisée soit de façon centralisée par l'Etat, soit par une autorégulation par les usagers ou en laissant faire le marché.

En France, la gestion de la demande a commencé avec la loi sur l'eau de 1992 par l'application des mécanismes volumétriques de gestion et de tarification (S. Loubier et al. 2005) en se basant sur des analyses coûts-efficacité et coûts-avantages, avec une prise en compte de divers paramètres et impacts socioéconomiques (OCDE 2006). La gestion a été centralisée, orchestrée par les services de l'Etat.

En 2006, la loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) préconise une gestion décentralisée des prélèvements, qui permet de prendre des mesures préventives pour éviter les crises de surexploitation et les conséquences socioéconomiques et environnementales qui en découlent.

Les mesures de restrictions appliquées par les services de l'Etat ne sont qu'une solution curative pour assurer la durabilité de la ressource mais qui a des mauvaises répercussions sur les rendements et les revenus dégagés par le secteur agricole. Inspirée d'initiatives locales en Beauce et en Poitou-Charentes (Figureau 2015), cette gestion a été confiée à l'OUGC (Organisme Unique de Gestion Collective des prélèvements d'eau pour l'irrigation), qui assure la répartition du volume autorisé entre les irrigants. Ces institutions témoignent de la volonté de l'Etat de déléguer une partie de ses missions régaliennes aux institutions et acteurs locaux.

Les pays de Maghreb sont aussi dotés d'une loi sur l'eau : le code des eaux de 1975 en Tunisie, la loi sur l'eau de 2005 en Algérie et la loi sur l'eau de 1995 au Maroc. Tous ces codes prévoient la délivrance d'autorisations pour l'utilisation d'eau souterraine, de façon systématique en Algérie, pour des forages supérieurs à 50 m en Tunisie et pour des forages supérieurs à des seuils définis localement au Maroc.

Les dispositifs institutionnels de gestion des eaux souterraines sont très différents d'un pays à l'autre. Au Maroc, la gestion est assurée par les agences de bassin sous la responsabilité du Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement. Elles sont en charge des études hydrauliques et des politiques de régulation. En Tunisie, ce sont les CRDA -les Commissariats Régionaux de Développement Agricole- sous tutelle du Ministère de l'Agriculture et de l'Environnement qui sont chargés du suivi et du contrôle de l'exploitation des eaux souterraines. En Algérie, les rôles sont bien plus séparés : l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) est en charge des études sur les aquifères, les Agences de Bassin sont principalement responsables du cadastre des usagers et les Directions de l'Hydraulique des Wilayas (DHW) sont en charge de la police de l'eau (Faysse et al. 2012).

Les incitations pour freiner l'utilisation des ressources en eau ont initialement consisté en un appui à la reconversion des exploitations vers des techniques économes en eau (en particulier l'irrigation localisée en accordant des subventions pour accéder à ces équipements). Au Maroc, le taux de subvention atteint 80 à 100 % des coûts d'investissement, en Algérie les subventions couvrent 100 % de financement des équipements puis redescendu à environ 50 %, en Tunisie, les subventions sont de l'ordre de 40 à 60 % du montant total de l'investissement. Cette politique est alourdie par les procédures administratives (Bekkar et al. 2007) : pour bénéficier de la subvention, il faut déposer un dossier qui nécessite la présence d'une autorisation de prélèvement. Au Maroc, certains acteurs préfèrent ne plus conditionner l'octroi de subventions à la détention d'une autorisation de prélèvement pour garantir la pérennité des exploitations agricoles et assurer une économie d'eau même chez celles sans autorisation.

Ces mesures incitatives ont accru la productivité et assuré des niveaux d'intensification plus élevés engendrant une meilleure rentabilité des exploitations agricoles. Mais elles n'ont pas assuré une diminution des quantités d'eau consommées (R. Atiri 2007). Elles étaient donc des

mesures d'adaptation à la pénurie par une meilleure valorisation de la ressource en eau plutôt qu'un instrument pour freiner les prélèvements.

Plusieurs mesures de tarification sont aussi développées dans les pays de Maghreb pour inciter à l'économie d'eau et financer des actions de développement d'infrastructure. En Tunisie, pour des considérations d'ordre essentiellement social, les prix de l'eau d'irrigation ont été longtemps maintenus à des niveaux très faibles, déconnectés des coûts de mobilisation et de la valeur économique de la ressource (Albouchi 2005a). A partir de 1989 et suite à une réforme profonde du secteur agricole, dans le cadre du Plan d'Ajustement Structurel Agricole (PASA), qui a démarré en 1986, les agriculteurs sont soumis à des politiques tarifaires qui n'ont cessé de changer. L'administration réfléchit d'abord à une tarification « trinôme » dans les GDA tenant compte des charges fixes et variables du fonctionnement du GDA et de l'utilisation des eaux souterraines ; elle a aussi étudié l'intérêt d'une tarification binôme consistant en une composante fixe qui donne le droit d'accès à l'eau d'irrigation et une composante variable proportionnelle au volume d'eau consommé. Dans plusieurs régions, une tarification monôme est aussi appliquée proportionnellement au volume extrait.

D'autres politiques incitatives existent, bien que de moindre ampleur, comme la publication des données climatiques au Maroc (nappe de Sousse) cherchant à permettre aux agriculteurs de bien piloter l'irrigation (Faysse et al. 2012). Un mécanisme d'assurance a également été proposé par des agriculteurs de Berrchid au Maroc : accorder une assurance aux agriculteurs faisant le choix de ne pas forer de façon à ce que leur revenu issu des cultures conduites en pluvial (notamment le blé) soit garanti même en cas d'année sèche.

Dans ces pays, contrôler les volumes prélevés dans les forages et les puits est très coûteux. Les administrations ont choisi alors de contrôler le creusement des nouveaux forages et l'approfondissement des anciens, le recours aux foreuses étant facilement détectable. Au Maroc, les administrations commencent ainsi à contrôler les forages illicites par la mise en fourrière des foreuses. En Algérie les agriculteurs ont effectué des peines de prison pour avoir creusé de façon illégale. En Tunisie, le contrôle est très faible et s'est affaibli suite aux événements de janvier 2011, les administrations publiques ayant alors une présence et une activité bien plus faibles dans les zones rurales.

Les différentes instruments et initiatives locales prouvent un intérêt croissant porté à la question de la surexploitation des nappes même si, pour l'instant, ces initiatives n'ont pas encore permis dans la majorité des pays de restaurer l'équilibre entre ressource et usage. Ces expériences montrent l'intérêt des approches intégratives basées sur des coalitions d'acteurs locaux. Au Maroc le contrat de nappe est envisagé et peut être une opportunité pour identifier la capacité des acteurs locaux à s'organiser à condition que ce contrat soit co-construit entre tous les acteurs.

Dans le même contexte, une solution en cours d'élaboration par l'administration tunisienne est de confier le contrôle des forages sur des petites nappes à des associations d'agriculteurs. Les résultats de cette approche au niveau international ne sont pas univoques. Elle a connu un échec au Mexique (Wester, Hoogesteger, et Vincent 2009). En Espagne, elle n'a fonctionné que

lorsque les associations d'usagers de l'eau ont émané d'un projet porté par les agriculteurs et non lorsqu'elles ont été créées par l'administration (Rica, Lopez-Gunn, et Llamas 2011).

De plus, en France, si les agriculteurs reconnaissent parfois la pertinence d'une régulation des forages, ils ne souhaitent souvent pas gérer directement le contrôle de l'usage des eaux souterraines et préfèrent en confier la responsabilité à l'Etat (entretiens dans la Beauce et pour le cas du Roussillon) (Rinaudo et al. 2011). L'organisation collective et la création des démarches participatives au niveau local et national pour concevoir et mettre en œuvre des politiques constituent la tendance actuelle de gestion des nappes souterraine, ainsi des efforts sont consacrés pour sensibiliser les agriculteurs et les différents acteurs concernées à l'enjeu de la surexploitation des nappes par le transfert des connaissances sur le fonctionnement des aquifères et le niveau de leur surexploitation.

La connaissance de la demande en eau agricole (et sa modélisation) paraît ainsi nécessaire pour la comparer aux disponibilités de la ressource. Elle permet aussi d'identifier l'effet de plusieurs changements climatiques, économiques et règlementaires, ce qui constitue un support d'aide à la décision et un moyen pour convaincre les agriculteurs par les mesures prises pour assurer une utilisation durable de la ressource.

La nécessaire estimation de la demande en eau d'irrigation pour mieux gérer la ressource

La demande en eau d'irrigation est une notion qui varie selon la question de recherche abordée et l'échelle à laquelle on se déplace (Maton 2006) : elle peut être définie par les besoins en eau des cultures, par les quantités d'eau consommées dans un système d'irrigation ou par les quantités prélevées d'une ressource bien déterminée (Margat 1996). Plusieurs modèles utilisent les besoins en eau des cultures (Allen et al. 1998), l'estimation de ces derniers se base sur le calcul de bilan hydrique et des données sur l'évapotranspiration, le coefficient cultural, les caractéristiques des sols, les précipitations et l'efficacité du système d'irrigation.

Ces besoins sont qualifiés de théorique. L'estimation de la demande en eau à partir de ces données sous ou sur-estime l'eau réellement consommée par l'agriculteur (Labbe et al. 2000 ; Weatherhead et Knox 2000).

Se baser seulement sur les besoins théoriques en eau ne suffit pas pour calculer une demande réelle. La demande en eau est une notion différente des besoins en eau des cultures. Selon la Banque Mondiale, « gérer la demande en eau » consisterait à mettre en place des actions susceptibles d'agir sur l'ensemble des déterminants de la demande en eau. Il est donc nécessaire de prendre en compte d'autres déterminants de comportement des irrigants.

Dans le cadre de la thèse, nous avons estimé les besoins moyens des cultures tout en tenant en compte des différentes stratégies de l'agriculteur. L'irrigant selon les contraintes qui pèsent sur son exploitation (disponibilité de la ressource, débit...) décide la pratique d'irrigation à adopter, cette dernière se traduit par différents niveaux de rendement. C'est cette notion que nous appellerons dans ce travail « demande en eau d'irrigation ».

Nous accorderons une attention toute particulière à la source d'eau utilisée. En présence de plusieurs sources d'irrigation dans la même exploitation, le volume total demandé n'est pas suffisant : il est nécessaire d'estimer la demande décomposée pour chaque modalité d'accès possible. L'estimation de la demande en eau d'irrigation à moyen terme doit tenir compte aussi des incertitudes sur l'impact qu'auront les changements de contexte sur les exploitations agricoles (variation des rendements, variation des prix sur le marché...). Les choix productifs de l'agriculteur ne sont qu'une traduction du comportement et des contraintes de l'irrigant. Le choix aussi de la modalité d'accès à la ressource révèle diverses stratégies et affectent les décisions tactiques des agriculteurs. Elle nous permet aussi de comprendre le comportement d'installation des forages privés.

Objectif et architecture de la thèse

L'objectif de la thèse est d'identifier les déterminants de la demande en eau agricole en présence d'une nappe souterraine en libre accès et d'estimer des fonctions de demande pour différentes modalités d'accès à la ressource. Ces fonctions de demande vont nous servir après pour simuler plusieurs scénarios de changement de prix, de politique énergétique (prix d'électricité) et d'efficacité des structures collective de gestion de l'eau d'irrigation. Ces scénarios pourront alors constituer un support de discussion et d'aide à la décision pour les acteurs concernés.

Nous appuierons notre analyse sur un cas d'étude particulier : celui de la nappe de Kairouan, situé en Tunisie centrale et qui peut être considéré comme l'archétype des problèmes rencontrés en Tunisie et à l'échelle mondiale. Cette nappe est confrontée en effet au développement rapide de son usage pour l'irrigation, ce qui permet une croissance agricole considérable, mais aussi conduit à la surexploitation de cette ressource en eau.

La thèse est construite sous forme de chapitres qui représentent autant d'étapes pour atteindre l'objectif fixé.

Le premier chapitre (Chapitre 1) décrit l'historique et les caractéristiques de la plaine de Kairouan. Nous caractérisons le système d'étude et identifions les liens entre ses différentes composantes, en mobilisant des données statistiques et des résultats issus d'autres travaux effectués sur la même zone.

Le deuxième chapitre (Chapitre 2) expose la méthodologie globale de la thèse, les approches et méthodes utilisées pour traiter nos questions de recherche et décrit les différentes phases de collecte des données. Ce chapitre se limite à donner une vue d'ensemble sur la méthodologie générale, l'explication et l'argumentation de chaque méthode mobilisée sont présentées en détail dans les chapitres concernés.

Le troisième chapitre (Chapitre 3) fait un diagnostic de la situation des différentes associations d'irrigants (Groupement d'Agriculteurs – GDA) et évalue la performance de la gestion collective de l'irrigation. En effet la consommation de l'eau de GDA constitue une partie de la demande globale en eau dans la région. Cette analyse nous permet de chercher à identifier les causes et les conséquences de la frénésie d'installation des forages privés.

Le quatrième chapitre (Chapitre 4) vise d'abord à évaluer les changements globaux dans la plaine de Kairouan de point de vue de la structure et du système de production et l'impact de ces changements sur la consommation globale en eau. Nous tentons de cerner la diversité des exploitations agricoles pour estimer leur demande en eau et étudier les dynamiques récentes d'évolution de ces exploitations. Nous retraçons ainsi les trajectoires d'évolution des exploitations en cherchant à expliquer les mécanismes responsables à ces changements. Dans ce chapitre nous avons tenté à répondre aux questions suivantes : y a-t-il des changements importants dans la structure des exploitations ? Les agriculteurs continueront-ils à irriguer les mêmes surfaces, changeront-ils leurs pratiques d'irrigation en concentrant par exemple leur ressource en eau sur moins de surface ou au contraire en pratiquant une irrigation plus extensive ? Garderont-ils les mêmes systèmes de culture face à un risque de manque d'eau et de fluctuation des prix et surtout un coût croissant d'accès à une nappe de plus en plus profonde ? Les systèmes de culture pourront-ils rentabiliser l'investissement dans des forages à grande profondeur ? La modalité d'accès à la ressource affecte-t-elle les choix de production de l'agriculteur ?

Le cinquième chapitre (Chapitre 5) cherche à quantifier les observations faites dans le Chapitre 4. Il présente la modélisation du fonctionnement d'une exploitation type en tenant compte des contraintes qui pèsent sur son fonctionnement et du risque des changements climatiques qui affectent les rendements et des changements de prix des produits agricoles. Nous avons cherché à chaque fois à tester une modalité d'accès à la ressource pour cerner l'effet de pénurie ou de disponibilité de l'eau dans l'exploitation tout en appliquant plusieurs stratégies d'irrigation. Le modèle construit permet de retracer les fonctions de demande et de simuler plusieurs scénarios de changement.

Cette thèse se clôture par une discussion des principaux résultats de cette recherche et sur les perspectives envisageables.

CHAPITRE 1

La plaine de Kairouan une zone emblématique : une nappe souterraine surexploitée et un contexte socioéconomique contrasté

1. INTRODUCTION

Ce chapitre caractérise le territoire étudié, en mettant en valeur ses spécificités qui font de lui une zone emblématique et un terrain d'investigation pour plusieurs institutions et projets de recherche. La compréhension de l'histoire agraire, des ressources naturelles, des aménagements et des contraintes de développement dans cette zone, permettra après, sans doute, de bien situer notre question de recherche et de mieux renforcer nos interprétations. Les différentes parties de ce chapitre sont le résultat des recherches bibliographiques et travaux de recherche effectués depuis de nombreuses années dans la plaine par des chercheurs, doctorants et mais aussi étudiants².

2. ELEMENTS GEOGRAPHIQUES PHYSIQUES

La Tunisie centrale compte principalement trois grands bassins versants drainant le versant sud de la dorsale tunisienne jusqu'à la plaine de Kairouan : celui drainé par l'oued Zeroud, celui du Merguellil drainé par l'oued Merguellil et celui drainé par l'oued Nebhana (Albouchi 2005). Ces oueds connaissent d'importantes crues automnales et printanières qui les transforment alors en des torrents immenses et rapides qui s'étalent sur la plaine et l'isolent des alentours (telle la crue de 1969). Cette zone est caractérisée par un relief fort qui atteint une altitude maximale de 1226 m et un dénivelé de 600 mètres. 80 % du bassin versant du Merguellil est situé dans le gouvernorat de Kairouan englobant les délégations de Chbika, Haffouz, El Alaa, Oueslatia et Hajeb El Ayoun ; le reste appartient au gouvernorat de Siliana (Albouchi 2005).

2.1. Localisation géographique de la plaine

Le bassin versant de l'oued Merguellil est limité au nord par la retombée sud des Djebel Ouslat, au sud par le plateau d'El Alâa, à l'ouest par le Djebel Barbrou et le haut plateau de la Kesra, et à l'est par la plaine de Kairouan qui constitue son exutoire naturel (Figure 1-1) (Albouchi 2005).

²Nous nous sommes ainsi en particulier appuyés sur les enquêtes ponctuelles réalisées en 2005, 2013, 2014 et 2015 par des étudiants de master de l'INAT et de Montpellier SupAgro (Ben Mihoub 2005) ; (Braiki 2013) ; (Snoussi 2013) ; (Ghileb 2014) ; (Bouazizi 2016).

Figure 1-1 : Localisation du bassin versant Merguellil et découpage administratif en délégations -



Source : Leduc 2016

Il draine un immense impluvium de 15 300 km², qui prend naissance au sud de la ville de Makthar vers son exutoire : la plaine de Kairouan. Les écoulements sont caractérisés par leur soudaineté et variabilité (Ben Mihoub 2005).

D'une superficie totale de l'ordre de 1 540 km² (Morardet et al. 2017), le bassin versant du Merguellil est constitué de deux zones (interconnectées par le barrage d'El Houwareb) aux caractéristiques différentes :

➤ **Une partie amont :**

Étalée sur une superficie de 1 180 km², avec une densité d'habitat de 59 hab./km², caractérisée par un relief accidenté, un réseau hydrographique très dense, des sols compactés et très affectés par l'érosion (Morardet et al. 2017). Les précipitations moyennes peuvent atteindre 510 mm, les températures sont généralement inférieures à 10°C entre décembre et février et autour de 25°C en été (Le Goulven et al. 2009). Cette partie est marquée par l'importance des parcours et des forêts et connue par ses nombreux aménagements de conservation des eaux et des sols perturbant fortement l'écoulement vers la partie aval.

➤ **Une partie aval :**

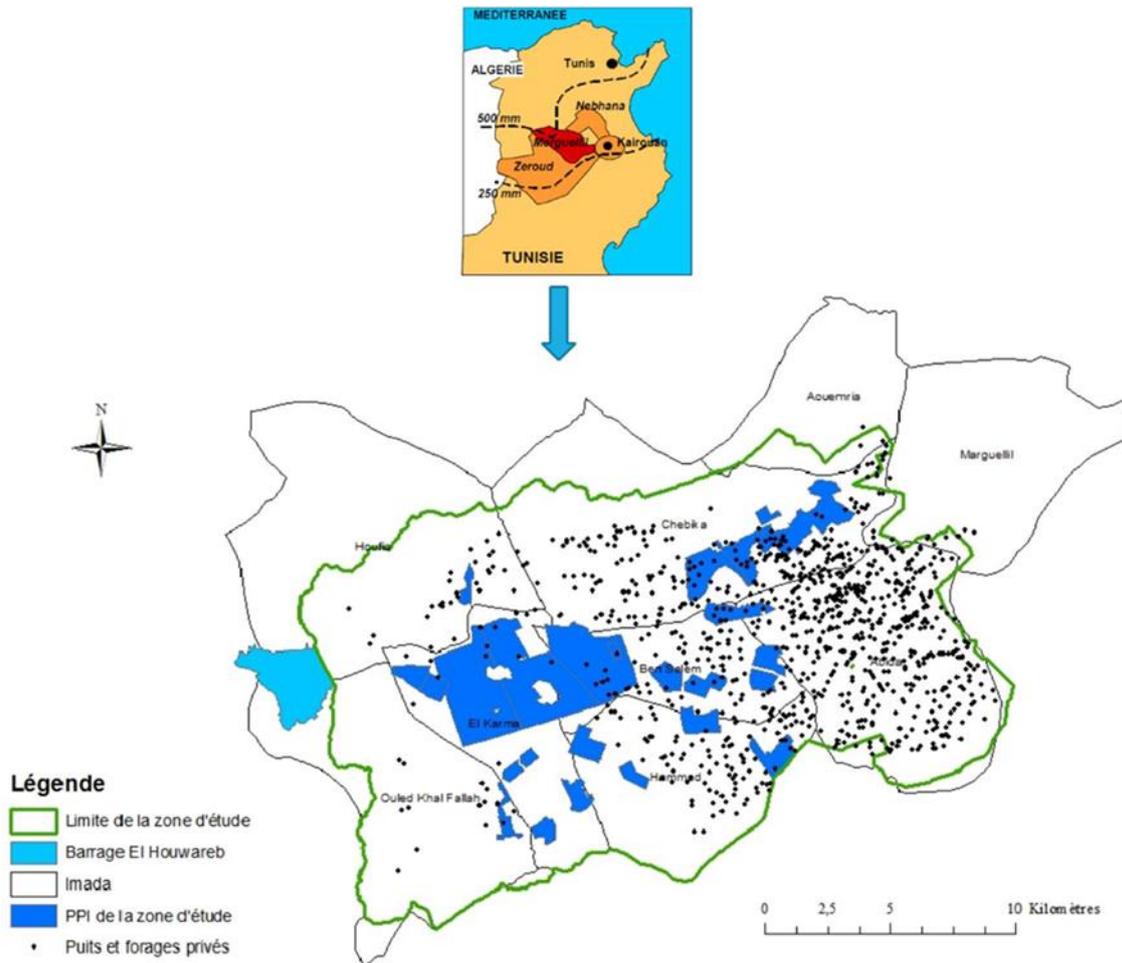
Elle correspond à la zone d'infiltration de l'Oued Merguellil en aval du barrage El Houwareb. Elle s'étend sur 350 km² avec une densité d'habitat de 71 hab./km². Ses sols sont formés d'alluvions fluviales très profondes et peu évoluées (Morardet et al., s. d.). Elle est connue pour son potentiel agricole important. Les précipitations sont variables et irrégulières et enregistrent en moyenne 300 mm avec une température moyenne de 19,2 °C (station Chebika), (Le Goulven et al. 2009).

Vu l'importance de l'échelle spatiale de la plaine et le nombre d'utilisateurs concernés, il est délicat d'envisager une étude approfondie des dynamiques usages-ressources sur la totalité du système. Notre recherche s'est donc concentrée sur la partie aval du Merguellil (qui représente un sous-système de la nappe de Kairouan). Le choix de cette zone, qui était celle du projet de recherche MERGUSIE (MERguellil : Ressources, Gestion et Usages Intégrés de l'Eau), a été motivé par la volonté de pouvoir comparer la situation actuelle avec celle décrite au début des années 2000 par l'équipe du projet MERGUSIE (Sarah Feuillette 2001 ; Albouchi 2005 ; Poussin, Ben Mihoub, et Beji 2008 ; Poussin et al. 2008 ; Poussin, Pouget, et D'hont 2010) ; mais aussi par le fait que cette partie de la nappe est confrontée à la plus forte densité de forages individuels du gouvernorat (Figure 1-2), compte tenu des bonnes potentialités agricoles des sols et de la proximité du marché de Kairouan.

La zone d'infiltration du Merguellil (partie aval de El Houwareb) est limitée au Sud par l'Oued Zroud (colline Drâa Affane) au nord par les montagnes de Chérichira, à l'ouest par celles d'El Houwareb. A l'Est, la limite retenue tient compte des limites administratives et du sens d'écoulement de la nappe. Elle est étendue sur une superficie totale de 35 519 ha en aval du barrage, entre 26 740 ha (55%) dans la délégation Chébika et 8 792 ha sur celle de Haffouz (14,5 %) (Albouchi 2005).

Cette zone comprend 7 secteurs (appelés imada) : Abida, Chebika, El Karma, Hammad, Sidi Ali Ben Salem et partiellement Houfia et OuledKhalfallah qui sont à cheval sur la plaine et le bassin amont du Merguellil (Figure 1-2).

Figure 1-2 : Localisation et caractérisation de la zone d'étude



Source : Azizi et al. 2016

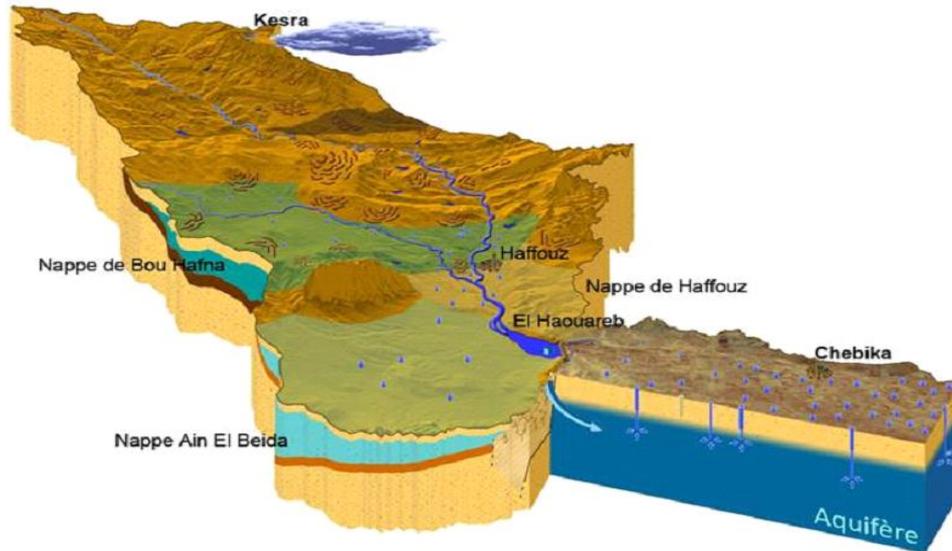
2.2. La nappe, principale ressource en eau

La plaine de Kairouan bénéficie d'un large bassin d'eau souterraine peu profonde. Cette nappe phréatique est contenue dans les alluvions de la plaine et constitue une zone non saturée très épaisse. D'une granulométrie très variable verticalement et latéralement, elle s'épaissit de l'ouest vers l'est et dépasse presque partout 100 m d'épaisseur, elle est bien plus importante à l'aval.

Cette nappe alluviale est principalement alimentée par l'infiltration des crues exceptionnelles des oueds eux-mêmes alimentés par le drainage des montagnes de la partie amont (Leduc, Beji, et Calvez 2003). Le niveau ruisselé dépend de l'intensité de la pluie, de la couverture du sol, de la capacité d'infiltration du sol, de la forme du bassin et de l'état de saturation du sol au moment de la pluie. La lame d'eau moyenne annuelle ruisselée varie de 40 mm à l'amont du Merguellil au niveau du haut plateau de la Kesra, à 15 mm à l'aval du bassin. En dehors des crues exceptionnelles (telle que celle survenue en 1969), l'eau des oueds ne s'écoule pas jusqu'à la mer mais au niveau des sebkhet Kelbia et Sidi El Hani, lacs salés constituant de vastes surfaces d'évaporation, situées en aval de la nappe.

Cette nappe est également alimentée par les aquifères amont : à l'amont du barrage d'el Haouareb, les aquifères (Bou Hafna, Haffouz et Aïn el Beidha) de moindre extension stockent saisonnièrement et inter-annuellement de l'eau. Les échanges entre ceux-ci et le réseau hydrographique existent dans les deux sens mais n'ont pu être estimés de manière fiable, que ce soit en termes de bilans, de flux ou de stock (Leduc, Beji, et Calvez 2003).

Figure 1-3 : La nappe de Kairouan et ses échanges avec d'autres aquifères



Source : IRD, 2017

Enfin, la construction de l'évacuateur de crue du barrage El Haouareb en 1989 sur une zone de faille limite le profond fossé d'effondrement de la plaine de Kairouan, a accru la résurgence de la nappe d'Aïn Beidha (« l'émergence ») et provoqué sa vidange superficielle en aval du barrage, d'un niveau proportionnel à la charge du barrage (Sarah Feuillet 2001) (voir Figure 1-4). D'un débit d'environ 400 l/s, elle s'étend sur 6 kilomètres dans le lit de l'oued en aval du barrage, pour s'infiltrer progressivement dans le sol.

Figure 1-4 : L'émergence du Barrage El Houwareb



Source : Azizi (Avril, 2016)

Avant, les eaux de l'oued s'écoulaient et rechargeaient la nappe de Kairouan. Le barrage arrête désormais tous les écoulements assurant parfaitement son rôle de protecteur de la plaine de Kairouan contre les inondations.

Une partie des eaux stockées dans le barrage s'évaporent mais l'essentiel s'infiltré sous le lac du barrage et rejoint ainsi le système aquifère complexe³.

2.3. Zonage agro-écologique de la plaine

La plaine de Kairouan repose sur un socle calcaire du Quaternaire donnant naissance à des vertisols profonds riches en argile. Cela donne à ces sols une grande capacité d'échange cationique et de réserve utile qui les rendent bien adaptés aux céréales et aux maraîchages.

Le relief, bien que globalement plat, présente des entailles correspondant aux lits des oueds (Morardet et al., s. d.). Les vertisols sont couverts d'une couche de sable et limons issue des alluvions apportées par les crues successives. Ces alluvions, plus grossières en amont de l'oued et à proximité de son lit, sont de plus en plus fines à mesure que l'on s'en éloigne, et que l'on se trouve en aval de l'oued. Les zones d'alluvions grossières sont plus favorables à l'arboriculture (oliviers et arbres fruitiers).

Trois zones agro-écologiques en fonction du gradient d'accessibilité à l'eau d'irrigation :

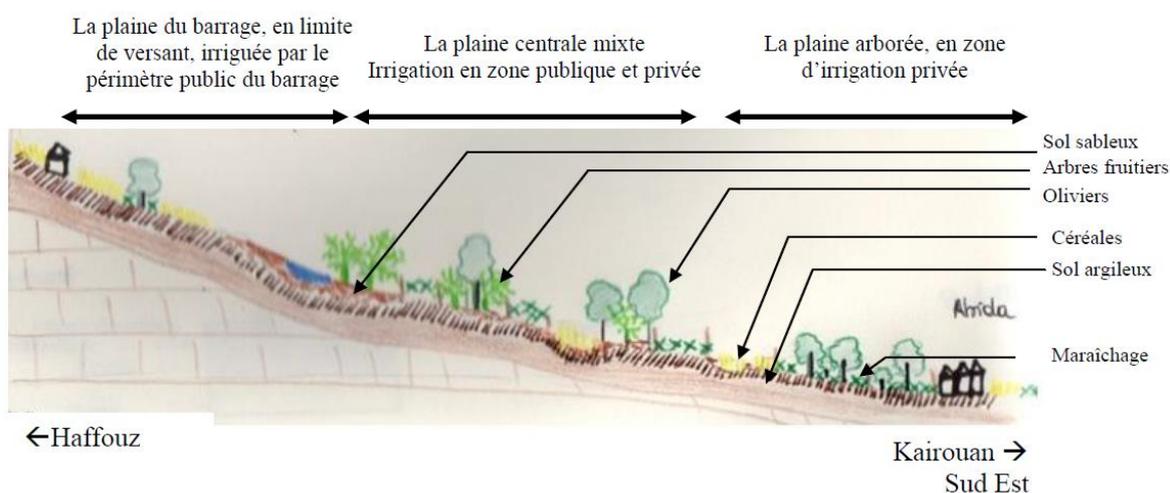
- *La plaine en limite de versant* : caractérisée par des sols argileux et argilo-limoneux lourds et peu perméables. Le système de culture dominant est la céréaliculture avec

³ Les interactions entre les diverses composantes hydrologiques régionales sont nombreuses et encore insuffisamment quantifiées. Kingumbi (Ahmadi Kingumbi 1999) a estimé, en 1999, que 25 % de l'eau arrivée au barrage s'évapore et que 63 % de l'eau recharge les nappes, le reste allant principalement à l'alimentation du périmètre El Houwareb qui se situe en aval immédiat du barrage.

des friches, entrecoupées par quelques parcelles d'olivier. Les exploitations sont généralement de grande taille (entre 3 et 10 ha).

- *La plaine centrale* : les sols dans cette partie de la plaine sont sableux et sableux limoneux. Elle concentre plusieurs périmètres publics irrigués qui sont dominés par les céréales. Avec le développement de l'irrigation privée, cette zone devient de plus en plus arborée spécialement par l'olivier. Des cultures maraîchères sont développées en intercalaire des oliviers. La taille des parcelles est variable et n'est pas homogène et diminue à mesure que l'on se rapproche de la dernière partie de la plaine.
- *La plaine arborée* : caractérisée par un parcellaire très fragmenté, constitué par des petits lots de terre de 1 à 5 ha, séparées par des haies de cyprès, de jujubiers et de figuiers de barbarie. L'arboriculture est très présente en association avec des cultures annuelles (céréales et cultures maraîchères).

Figure 1-5 : Zonage agro-écologique de la plaine de Kairouan



Source : Mauline 2012

Les différents types de sols dans la plaine de Kairouan et la répartition des cultures qui en découle dépend principalement du régime hydrique caractéristique de la zone.

Dans la plaine centrale et la plaine arborée, l'arboriculture se développe fortement sous deux formes : soit par l'installation des nouvelles plantations d'oliviers et d'arbres fruitiers soit par la densification des plantations déjà existantes par l'installation d'autres arbres en intercalaire.

3. HISTORIQUE DES TRANSFORMATIONS AGRAIRES DANS LA PLAINE DE KAIROUAN DES BERBERES NOMADES AU VINGTIEME SIECLE

L'histoire commune vécue par ses habitants a fait de cette région un système agraire homogène. Comprendre l'historique de cette zone et les principaux événements qui ont marqué ses transformations paraît donc intéressant pour mieux contextualiser nos questions. Quatre grandes phases peuvent être ainsi distinguées : depuis la période de pré-histoire passant par la

colonisation française (1881-1956) jusqu'à la post-indépendance. Après l'indépendance, deux périodes peuvent être différenciées : celle correspondant aux premières générations de PPI (1956-1988) et celle postérieure à la construction du barrage El Houwareb annonçant la seconde génération des PPI et le développement de la micro-irrigation (Le Goulven et al. 2009 ; Géroutet 2004) considèrent aussi quatre grandes périodes dans l'histoire agraire du bassin-versant⁴.

3.1. Une occupation humaine ancienne marquée par les invasions

L'histoire agraire de la zone débute avec les berbères, premier peuple connu en Afrique de nord. La civilisation tunisienne était alors fondée sur la culture des céréales et l'élevage du petit bétail (ovins, ânes, bovins). Elle était importatrice d'huile d'olive de Sicile et exportatrice de céréales vers Rome. Avec la colonisation phénicienne vers 800 avant JC, les vergers commencent à se multiplier. La présence romaine à partir de 146 avant JC et jusqu'au 5^{ème} siècle de notre ère développe l'oléiculture dans la steppe tunisienne, permise par l'amélioration des techniques des Carthaginois et le développement des périmètres irrigués sophistiqués et des aménagements hydrauliques adoptés (citernes, tanks et aqueducs) (Morardet et al. 2017). La Tunisie, à cette époque, était connue pour la qualité de son huile d'olive et constituait un véritable grenier à blé pour l'empire romain.

Le développement de l'oléiculture a été surtout présent dans les zones montagneuses : la plaine à cette époque était constamment inondée et la nature de ses sols argilo-limoneuses était défavorable à l'olivier sans recours à l'irrigation (Ben Mihoub 2005). Ce développement s'est accompagné d'un enrichissement global de la zone (naissance des échanges, construction de la ville de Kairouan...).

Mais l'invasion des Beni Hillel en 1051 a détruit la région devenue instable et insécure : une partie importante des oliviers romains est arrachée ; les populations se réfugiant dans les montagnes, l'agriculture a été remplacée dans la plaine par l'élevage nomade.

3.2. Une société tribale nomade aux 18^{ème} et 19^{ème} siècles

La plaine était dans cette période une vaste steppe pastorale habitée par les tribus Zlass, pasteurs nomades et semi-nomades (Sarah Feuillet 2001). Les immensités steppiques de la plaine étaient dominées par des parcours d'ovins, de caprins et de dromadaires, avec de très petites emblavures cultivées en blé dur et des ressources pastorales exploitées en commun de façon extensive. Les individus n'existaient qu'en tant que membre d'une tribu, les limites spatiales étaient définies socialement par l'occupation des différentes tribus.

La sédentarisation des bédouins, dans les zones où la densité de population était plus importante, a donné lieu à un habitat dispersé en petits hameaux familiaux et à une absence d'organisation communale. Cette population a préservé les petites infrastructures héritées des romains pour la conservation de l'eau et des sols. L'eau des oueds était peu utilisée du fait de la

⁴ Cette division de l'histoire agraire du bassin-versant en 4 grandes périodes est également reprise par (Le Goulven et al. 2009) et (Géroutet 2004).

violence des crues. L'usage de l'eau était régulé par des droits coutumiers sophistiqués (Morardet et al. 2017). Les propriétés de la terre s'approprièrent l'eau et les bénéficiaires participaient par la force de travail à la construction des ouvrages de déviation dirigeant les inondations vers les champs de céréales ou d'oliviers. Le droit d'usage de la ressource en eau impliquait aussi la participation dans la maintenance et la gestion des infrastructures d'irrigation.

3.3. Le protectorat français de 1881 à 1956

Pendant le protectorat, les terres collectives de la zone ont été confiées à l'administration ou à des propriétaires privés mais sans disposer d'un titre foncier qui justifie leurs propriétés. La seule propriété du colon français dans la plaine de Kairouan était la ferme d'El Haouareb (3 700 ha) à l'emplacement actuel du barrage. Cette exploitation a développé l'arboriculture en sec mais en causant la destruction de plusieurs aménagements de conservation des eaux et de sol pour faciliter l'utilisation de la mécanisation sur ses parcelles (tracteur) (Morardet et al. 2017).

L'installation du colon dans la plaine a conduit à une meilleure sédentarisation de la population. La croissance démographique et la division de la propriété entre héritiers a conduit à l'intensification agricole qui a amené à une pression sur les ressources naturelles.

3.4. L'indépendance et le développement des grandes infrastructures hydrauliques

L'irrigation est apparue dès l'indépendance avec des aménagements de l'Etat (PPI-les périmètres publics irrigués) et la construction de puits, encouragée par des subventions publiques et par l'usage des motopompes. L'Etat tunisien a voulu, au début des années 1960, libérer les individus de la structure tribale, encourager la sédentarisation et leur assurer une meilleure distribution en eau.

L'agriculture est toutefois restée majoritairement vivrière et pluviale, l'irrigation étant limitée et localisée, en grande partie, autour de la ville de Kairouan à partir de puits généralement peu profonds ou de prélèvements dans les fonds d'oueds.

Les premiers aménagements (banquettes, quelques lacs collinaires) sur le bassin du Merguellil ont débuté à partir des années 60 sous l'impulsion d'un projet américain. En 1965, l'oued Nebhana était aménagé. Mais ces ouvrages n'ayant pas modifié les écoulements n'ont pas réduit le problème d'érosion du sol.

L'année 1969 a marqué un tournant dans la politique d'aménagements du fait des événements hydrologiques exceptionnels : le débit du Merguellil a dépassé 3 000 m³/s, la plaine de Kairouan était totalement inondée, les pertes économiques et humaines ont été dramatiques.

Figure 1-6 : Les inondations de 1969 de la plaine de Kairouan



Source : IRD

Cet événement a été le moteur des grands aménagements construits dans la région. Quelques années plus tard, les oueds Zeroud et Merguellil sont ainsi barrés par des grands barrages (respectivement Sidi Saad en 1981 et El Houareb en 1989) construits pour protéger la ville et donc dimensionnés en conséquence. Pour lutter contre leur envasement, l'Etat a lancé sur le bassin versant de Merguellil une politique volontariste de travaux de conservation des eaux et des sols (plus de 200 km² de banquettes) et de construction de lacs et barrages collinaires (38 lacs et 5 barrages réalisés). Certains de ces ouvrages ont permis l'apparition d'une petite irrigation très localisée (Cudennec, Beji, et Bachta 2003). Mais de nombreux aménagements n'ont pas été exploités pour le développement agricole pour plusieurs raisons : insuffisance d'une ressource stable dans le temps, conditions physiques défavorables, manque de maîtrise technique de la population, difficultés foncières, ...

Dans les années 1970, des coopératives de production ont été expérimentées visant à rassembler les petites entités de production. Mais cette expérience a échoué du fait de l'opposition manifestée par le monde rural. La zone est alors entrée dans une période de sous-développement marquée par l'analphabétisme, des niveaux de vie médiocres et d'importantes vagues d'exode rurale (Trabelsi 1976).

Dans les années 1970-1980, des programmes d'aides (Programmes de Développement Régional) ont permis la construction des routes, l'électrification, l'introduction des nouvelles techniques agricoles (Trabelsi 1979) ; la création des offices régionaux de mise en valeur (1988) a permis à l'Etat de construire les premiers périmètres publics irrigués. En 1989, le barrage El Haouareb est mis en eau avec comme principal objectif la protection contre les crues de la ville de Kairouan et, secondairement, l'irrigation et la recharge de la nappe. Cela a permis l'extension des superficies cultivées en maraîchage. Mais cette extension des superficies irriguées induit un recours massif à la nappe, faisant émerger la question de sa viabilité (El Aamami 1987). L'irrigation a conduit à un changement progressif dans les systèmes de production, d'un système de polyculture-élevage assorti d'une symbiose exploitation-famille (Sarah Feuillette 2001), à un système intensif spécialisé dans le maraîchage et/ou l'arboriculture et ouvert aux

marché régional et local. Une série de changements institutionnels à l'échelle nationale a accompagné ces transformations agraires dans la plaine de Kairouan (dissolution des offices de mise en valeur (1987), création des AIC, GIC, GDA...).

4. DES SYSTEMES DE CULTURE DIVERSIFIES CONTRAINTS PAR LA DISPONIBILITE DES CAPITAUX

Les systèmes de culture rencontrés sur la plaine sont très variés. Ainsi, en 2012, Martine Mauline (2012) en identifie 24 au sein d'une trentaine d'exploitations du secteur d'Abida (voir en ANNEXE 4):

- 4 systèmes d'oliviers en monoculture se distinguant par la densité de plantation, le type de sol, le mode d'irrigation (gravitaire ou goutte-à-goutte) et l'apport de fertilisation ;
- 4 systèmes d'arboriculture fruitière en monoculture (agrumes, pommiers, pêchers, abricotiers) ;
- 4 systèmes associant des oliviers et diverses espèces d'arbres fruitiers ;
- 4 systèmes associant céréales et maraîchage ;
- 4 systèmes maraîchers purs ;
- 2 associations céréales – légumineuses ;
- 2 systèmes « agro-forestiers » associant oliviers (avec ou sans arbres fruitiers) et maraîchage.

A ces systèmes de culture s'ajoutent 4 systèmes d'élevage (Mauline, 2012) : petit élevage ovin (moins de 50 brebis), petit élevage bovin (1 à 3 vaches), grand élevage ovin en stabulation, élevage bovin en stabulation, ces deux derniers n'étant présents que dans les grandes exploitations de type capitaliste.

Comment expliquer cette diversité ? C'est l'objet de cette partie qui va d'abord décrire les différents capitaux disponibles dans la plaine de Kairouan, avant d'en présenter les principaux.

4.1. Les capitaux mobilisables par les agriculteurs kairouanais

Nous nous appuyons sur la grille des cinq types de capitaux (humain, naturel, financier, physique et social) popularisée notamment par l'approche des moyens de subsistance durable (*Sustainable Livelihood Approach*, voir notamment (Ashley et Carney 1999) ; (DFID 1999) ; (Morardet et al. 2017)).

4.1.1 Un capital naturel dominé par plusieurs modalités d'échanges

Le capital naturel se décompose en cheptel et en capital foncier.

L'élevage est une pratique quasiment généralisée sur toute la plaine : il constitue une forme d'épargne pour les petites exploitations qui n'ont pas accès aux services financiers. L'élevage ovin domine. Cependant la taille de cheptel connaît une régression importante qui a démarré dans les années 1970 suite à la décolonisation qui a réduit les superficies destinées au pâturage mais aussi du fait du développement de l'irrigation et de l'orientation vers des cultures plus rémunératrices.

L'accès au foncier dans la plaine de Kairouan se fait essentiellement au travers des successions, les descendants exploitant la part héritée de la terre en faire-valoir direct. Ces divisions successives ont abouti à un morcellement des exploitations.

Cette situation a été accentuée par deux facteurs qui expliquent la rareté des opérations d'achat et de vente : la plupart des propriétaires ne possédant pas le titre foncier (ou titre bleu), les transactions foncières sont souvent impossibles ; l'attachement moral à la terre est également très fort, représentant l'histoire familiale et la dignité de leurs familles.

Pour donner de la souplesse au marché foncier, la location et le métayage se sont développés. Ces échanges peuvent être réalisés de façon informelle surtout si le propriétaire et le preneur de la même famille ; dans d'autres cas, un contrat fixant la durée (annuel ou sur plusieurs années) et le montant de la location doit être signé. L'annuité foncière varie selon le type de sol, l'état de la parcelle (arborée ou non) et l'accès à l'eau. Le propriétaire des parcelles d'oliviers peut aussi céder la terre sans contrepartie monétaire s'il n'a pas les moyens de l'irriguer, à condition que le preneur cultive des cultures en intercalaires et assure un apport suffisant d'eau à ses oliviers. Le métayage se fait par cycle de production, le métayer peut être agriculteur ou un salarié qui veut investir son épargne dans l'agriculture. Il renferme plusieurs modalités : on distingue l'association ou métayage à moitié (appelé *Cherka b Chtar* dans le dialecte local) où les coûts de production sont partagés à parts égales entre le propriétaire et le métayer, il y a aussi le métayage au 1/5 et 1/3 (appelé localement *Cherka b Khmoss ou thloth*), où le métayer selon sa contribution dans le coût de production négocie sa part dans la marge brute de la production. Le métayage à la moitié tend à diminuer au profit du métayage au 1/5 (Faidani 2014).

Quelle que soit la nature de transaction location ou métayage, les motivations des preneurs sont d'ordre économique (assurer une marge supplémentaire garantissant la viabilité de l'exploitation) et agronomique (ne pas fatiguer leurs sols en pratiquant des cultures très exigeantes en produits phytosanitaires sur la même parcelle et appliquer la rotation). Inversement les propriétaires cédants sont intéressés à valoriser leurs terres via le faire-valoir indirect en cas d'absence de moyens financiers au début de la campagne pour investir ou par manque de main d'œuvre. En louant leurs terres, ils bénéficient ainsi de l'irrigation des oliviers apportée par les preneurs sur les cultures maraîchères ou des reliquats d'engrais pour les céréales (Amichi et al. 2016).

L'accès à l'eau (et la disponibilité en capital) joue un rôle important dans le rapport de force entre propriétaire et preneur, influençant la forme des contrats fonciers : le métayage est appliqué généralement si le propriétaire possède une source d'eau ; la location sera préférée lorsque le preneur apporte l'eau. On observe ainsi plusieurs cas de location de longue durée (jusqu'à 10 ans) d'une parcelle sans eau lorsque le preneur construit un puits.

4.1.2 Un capital financier limité aux revenus agricoles

L'absence des titres de propriétés de la terre pour la majorité des agriculteurs de la plaine les empêche d'obtenir des crédits bancaires ou des subventions publiques. Le capital financier de la zone provient des revenus agricoles dégagés. Les seules autres sources de financement

proviennent des activités extérieures à l'agriculture : comme le montre les trajectoires d'exploitations décrites par Braiki en 2013 une part importante de la population agricole s'est ainsi déplacée vers le sahel pour travailler dans le domaine de tourisme et de textile ; une autre proportion (jeune homme) est absorbée par les travaux de construction des bâtiments ; d'autres personnes, moins nombreuses, exerçant une profession libérale (médecins, avocats), commerçants, ou cadres de la fonction publique, réinvestissent dans l'agriculture des revenus de ces activités plus qualifiées et rémunératrices.

Ces difficultés d'accès au financement expliquent le développement de sociétés de service agricole qui accordent aux agriculteurs des crédits d'intrants au début des campagnes agricoles.

4.1.3 Un capital physique influencé par la rareté de la ressource

Le capital physique comporte principalement les moyens d'accès à l'eau et, dans une moindre mesure, les équipements agricoles (Morardet et al. 2017).

Le climat semi-aride de la zone d'étude incite les agriculteurs à rechercher à mobiliser de l'eau pour produire ou augmenter leurs rendements. Ils y accèdent principalement de deux manières : via les périmètres publics irrigués (PPI) et via les ouvrages privés (puits ou sondage). Ces deux modes d'accès seront développés dans la section 5 de ce chapitre.

On s'intéresse dans cette partie de décrire les équipements d'irrigation et le niveau de confort dans chaque cas.

Au niveau des GDA (Groupements de Développement Agricole), la disponibilité de l'eau dépend de l'architecture et de l'état du réseau et des débits des forages qui l'alimentent. Le débit des forages des GDA varie de 36 et 198 m³/h. Le réseau est constitué de plusieurs lignes d'irrigation qui comportent chacune des bornes (équipées ou non par des compteurs). Le GDA, ne pouvant pas desservir l'ensemble des agriculteurs d'une même ligne simultanément, procède donc à des tours d'eau. Pour un GDA doté d'un bon débit, 6 agriculteurs sur une même ligne peuvent irriguer en même temps ; pour un GDA qui fait face à des problèmes de fuite et de faible débit, seuls 4 usagers peuvent irriguer ensemble.

Concernant l'accès privé à l'eau, différents niveaux de confort peuvent être distingués selon le type d'énergie utilisée : les puits ou puits-sondages illicites (ce qui est majoritairement le cas) fonctionnent avec une pompe diesel (profondeur limitée à 55 m, débit de 2 à 3 l/s) ou une pompe électrique alimentée par le réseau domestique (débit de 3 à 4 l/s) dans la plupart des cas de type centrifuge ; lorsque le forage est profond et autorisé, il est doté d'une pompe électrique immergée alimentée en triphasé (pas de limite de profondeur, débit d'environ 12 l/s pour une pompe de 12 cv et de 7 l/s pour une pompe émergée de 7 cv). Les prix des pompes diffèrent selon leurs caractéristiques, variant de 2000 DNT à 8000 DNT. A ces coûts, il faut ajouter les coûts régulièrement supportés d'approfondissement des forages (en moyenne d'environ 120 DNT/m), lié au rabattement annuel de la nappe de Kairouan.

L'accès à la ressource est lié aussi à l'équipement d'irrigation à la parcelle : l'irrigation localisée s'est généralisée dans les années 2000 pour les cultures maraîchères et l'arboriculture fruitière, l'aspersion étant réservée aux grandes cultures (céréales et cultures fourragères). Le type de

matériel d'irrigation acheté dépend du niveau financier des agriculteurs. On distingue des équipements goutte-à-goutte de longue durée (pouvant dépasser les 5 ans) utilisés surtout pour l'arboriculture d'autres équipements moins chers renouvelables annuellement.

D'autres équipements agricoles existent bien que limités à un petit nombre d'exploitations. La possession d'un tracteur ou d'une moissonneuse batteuse peut constituer une autre source de revenu pour leurs propriétaires via la location de matériel ou le travail à façon chez les agriculteurs non équipés.

Les agriculteurs qui possèdent un matériel de transport sont favorisés : ils peuvent se déplacer pour vendre leurs productions sur des marchés où les prix sont plus intéressants, pour accéder aux différents marchés d'intrants et surmonter ainsi la dépendance aux sociétés de service de la zone.

4.1.4 Un capital humain marqué par l'importance de main d'œuvre familiale

Les différentes activités agricoles nécessitent l'intervention de la main d'œuvre, l'exploitation agricole ne possédant pas un niveau d'équipement suffisant qui lui permette de mécaniser toutes les tâches agricoles. Cette main d'œuvre est majoritairement familiale principalement constituée par de femmes et d'hommes âgés. Si dans les années 1980 et 1990, de nombreux jeunes ont migré vers le Sahel, Tunis ou l'étranger, la crise économique actuelle subie par la Tunisie et l'Europe a provoqué leur retour à l'activité agricole.

Les exploitations recrutent en plus de la main d'œuvre occasionnelle faiblement rémunérée souvent féminine pour assurer des travaux spécifiques comme le repiquage, le binage, le désherbage ou la récolte. En période de pointe, cette main d'œuvre n'est pas toujours disponible, ce qui peut constituer une contrainte qui pèse sur le fonctionnement de l'exploitation.

Les grandes exploitations patronales sont dirigées par des personnes qui ne résident pas sur place, employant de la main d'œuvre salariée permanente. Ils recrutent dans la plupart des cas alors toute une famille, qui s'installe sur l'exploitation. Le chef de famille en assure alors la gestion quotidienne et le reste des membres participent aux différentes tâches agricoles. Cette main d'œuvre permanente est complétée par de la main d'œuvre salariée occasionnelle. Ces exploitations restent en nombre très limité dans la zone d'étude et se sont surtout orientées vers l'arboriculture.

L'utilisation de la main d'œuvre enfantine encore fréquente dans les années 1960-70 a quasiment disparu du fait de développement de l'éducation primaire à partir des années 1970-80 et secondaire, plus récemment (Morardet et al. 2017).

Le problème dans la plaine de Kairouan est que la majorité de la main d'œuvre recrutée est non qualifiée. Même les chefs d'exploitation sont rarement formés du fait du manque de vulgarisation agricole. De la responsabilité des CTV (Cellule territoriale de vulgarisation), cette dernière a démarré dans les années 1970 avec la mise en place des PPI, puis s'est généralisée à l'ensemble des exploitations. Du fait d'un manque de moyens financiers, humains et logistiques, ces centres n'arrivent pas assurer parfaitement leur rôle de formation et de

vulgarisation agricole. Ainsi, d'un seul vulgarisateur couvre l'ensemble de la plaine. Au final, une part importante du conseil technique provient aujourd'hui des vendeurs d'intrants (pépiniéristes, vendeurs de produits phytosanitaires et de matériel d'irrigation).

4.1.5 Un capital social annonçant le début d'une organisation collective

Le capital social dans la plaine de Kairouan est construit autour des relations familiales, ce qui facilite les échanges de foncier, d'eau et de main d'œuvre. Une sorte d'entraide qui se développe chez les exploitations familiales influence énormément leur orientation culturelle (emprunt d'argent pour creuser un forage ou financer un investissement au début de campagne, échange d'eau...). Les agriculteurs commencent à communiquer entre eux sur les choix des cultures, la rareté de la ressource et la recherche des solutions collectives. Les liens de confiance qui se développent entre les agriculteurs permettent d'imaginer la possibilité d'une gestion collective de la ressource dans la plaine. L'établissement des relations sociales avec les intermédiaires et les fournisseurs des plants et des intrants a facilité chez certains agriculteurs l'accès à des intrants de qualité (plants maraîchers) et la commercialisation de leur production dans des marchés plus rémunérateurs (exemple : exportations illicites de produits maraîchers vers la Libye).

Au-delà des liens familiaux, le capital social est aussi construit entre les agriculteurs et les gestionnaires de la ressource et se manifeste dans plusieurs occasions : en cas de présence des bonnes relations (entente) avec le conseil administratif des GDA, le lien de confiance est établi et la communication plus facile, ce qui se répercute sur le fonctionnement du GDA, la solvabilité de ses clients et la maintenance de ses équipements.

D'autres relations sociales avec les détenteurs de l'autorité (les représentants locaux de l'Etat que sont les CRDA : Commissariats Régionaux Au Développement Agricole et qui dirigent les GDA,) aboutissent à un contournement de la loi : certains ferment ainsi les yeux sur le creusement de forages illicites, d'autres favorisent certains agriculteurs dans l'organisation des tours d'eau au sein des GDA ou attribuent de l'eau à des agriculteurs hors PPI aux dépens de la desserte des usagers de GDA.

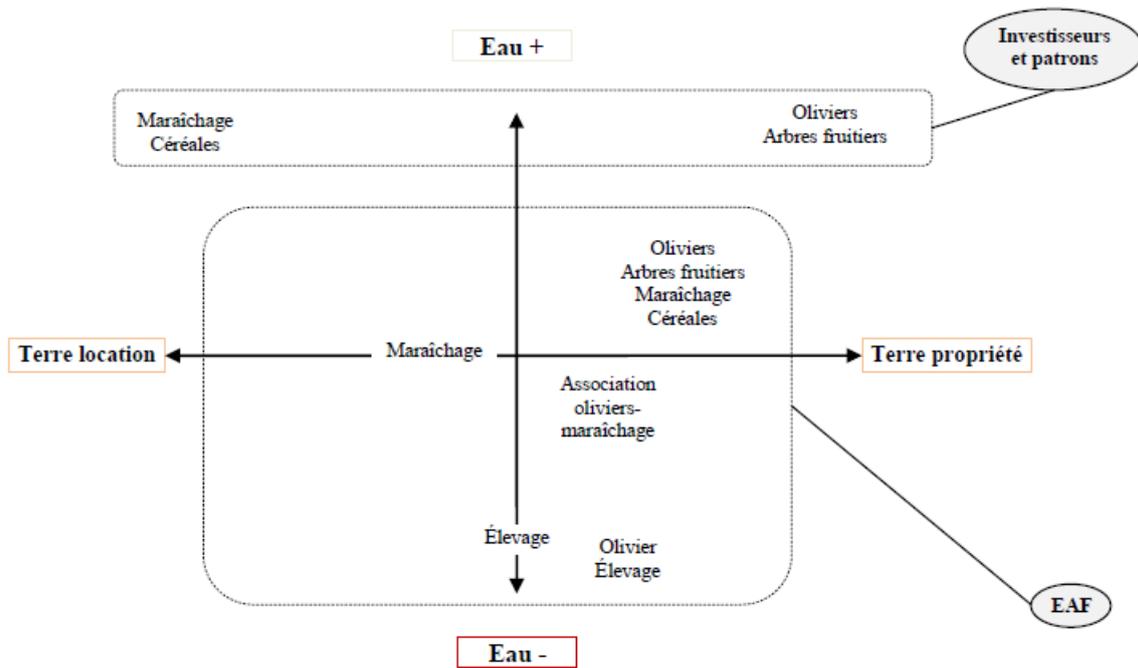
4.2. Des systèmes de culture essentiellement déterminés par l'eau et la terre

Les différents travaux de recherche effectués sur la plaine de Kairouan montrent que la diversité des systèmes de culture dépend essentiellement de la disponibilité de l'eau et de la terre (Poussin, Ben Mihoub, et Beji 2008). Cela est confirmé par les enquêtes réalisées entre 2012 et 2016 dans le cadre des travaux de mémoires d'étudiants (Mauline, 2012 ; Braiki, 2013 ; Ghileb, 2014 ; Bouazizi, 2016) : ainsi, les agriculteurs de secteur el Hammem, dans la délégation de Kairouan sud, à la limite sud de la zone d'étude⁵ (Braiki, 2013 – voir ANNEXE 1) l'ont signalé ; ceci a été aussi vérifié par la typologie réalisée sur les exploitations maraîchères des secteurs de Chebika et Ben Salem (Ghileb, 2014) (ANNEXE 2) puis synthétisé sous la forme d'une grille d'analyse (Bouazizi, 2016) (ANNEXE 3).

⁵ Ce secteur n'est pas à strictement parlé situé dans notre zone d'étude mais les dynamiques agricoles y sont proches de celles observées dans notre zone d'étude.

Ainsi, les exploitations patronales (grands terriens) sont orientées en présence des ressources suffisantes en eau vers l'olivier et l'arboriculture fruitière, les locataires sont spécialisés en maraîchage en pur, tandis que les propriétaires ayant un bon accès à l'eau sont caractérisés par des systèmes diversifiés basés sur l'olivier et des cultures en intercalaires pour ceux qui ont un manque d'eau le système de production est basé sur l'élevage et l'olivier (Figure 1-7).

Figure 1-7 : Zonage Influence de l'accès aux facteurs de production sur les systèmes de cultures (exploitation agricole familiale : EAF)



Source : Mauline 2012

Nous détaillons dans la partie suivante l'accès à l'eau d'irrigation.

5. UN MODE D'ACCES A L'EAU D'IRRIGATION DUAL

Notre zone d'étude, du fait d'une nappe facile d'accès, possède un potentiel d'irrigation important et de bonnes terres adaptées à différents types de cultures (maraîchage, arboriculture, céréaliculture...). La superficie totale irriguée en 2014 est de 58 124 ha, soit 14% des superficies totales irriguées en Tunisie. Cette superficie est répartie entre irrigation privée (puits de surface, forages profonds, oueds, lacs collinaires...) qui couvre une superficie de 41 066 ha et irrigation collective dans les PPI (basée soit sur des barrages soit sur des forages) étendue sur 17 058 ha (29% des superficies irriguées à Kairouan). La délégation de Chebika y représente à elle seule 20%.

Tableau 1-1 : Répartition des périmètres publics irrigués et privés dans les délégations de Chebika et Haffouz

Délégation	Périmètres irrigués publics	Périmètres irrigués privés	Superficie totale
	<i>ha</i>	<i>ha</i>	<i>ha</i>
Chebika	4 555	6 830	11 385
Haffouz	724	2 300	3 024
Total	5 279	9 130	14 409

Source : Rapport annuel de la division de l'exploitation des périmètres irrigués, (CRDA, 2014)

5.1. Les périmètres publics irrigués (PPI)

La plaine de Kairouan dispose 22 périmètres publics irrigués installés en majorité dans les années 1970. L'analyse de leur fonctionnement sera détaillée dans le Chapitre 3. Nous présentons ici uniquement les principales caractéristiques en se basant sur les statistiques du CRDA, (ANNEXE 5).

La superficie totale équipée dans notre zone d'étude est de 4 573 ha, le nombre de bénéficiaires 1 365. Si leur gestion avait initialement été confiée au CRDA, la décentralisation progressive de l'Etat a conduit les usagers, via la création de GDA, à l'assurer.

La majorité des PPI de la zone sont destinés à l'irrigation (19 PPI), seulement 3 PPI sont mixtes qui desservent aussi l'eau potable.

Le secteur Karma détient à lui seul 9 PPI et contient les plus grands périmètres en terme de superficie (3 PPI Houwareb). Les deux secteurs Abida et Wled khalfalah ne possèdent pas de PPI, l'irrigation est assurée par des prélèvements privés.

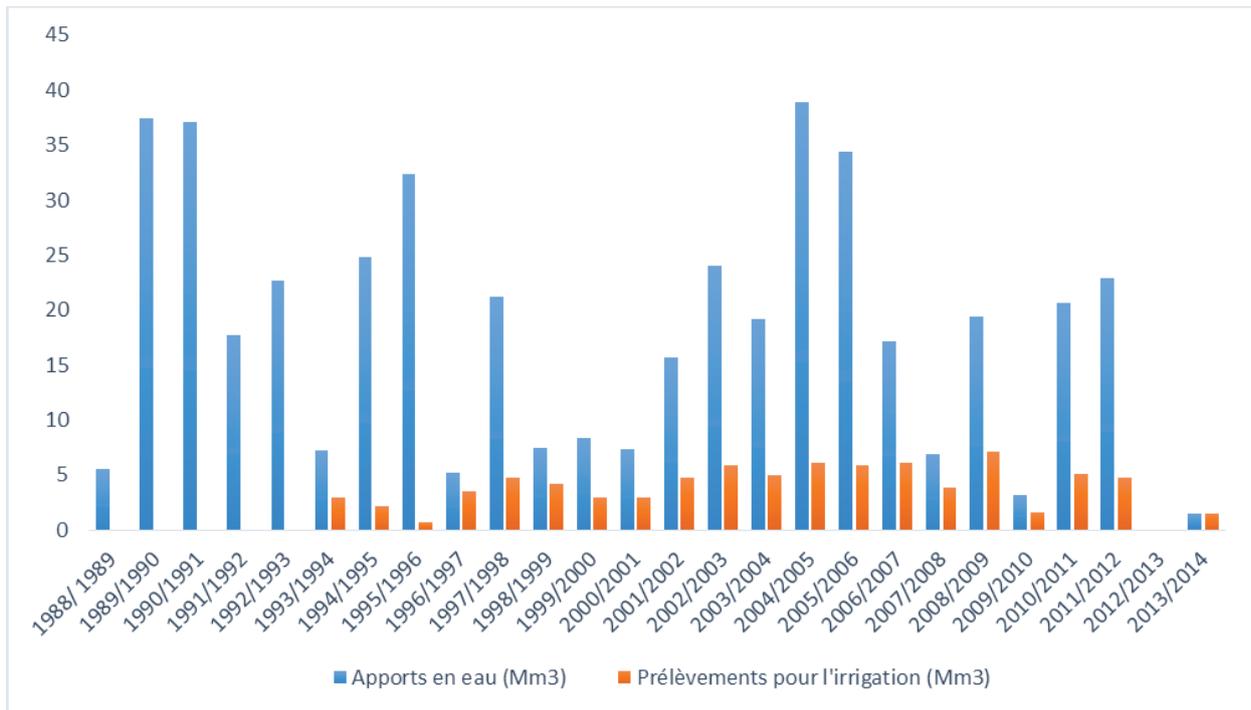
L'arboriculture est développée surtout dans les périmètres Chebika et Karma, quant aux cultures maraîchères, elles sont surtout concentrées dans le périmètre Henchir Jefna, mais aussi en grande proportion chez les PPI de Hammad et Ben Salem qui sont caractérisés par une grande intensification.

- **Le barrage El Houwareb**

Le plus grand périmètre de la zone d'étude était irrigué à la fois par l'eau de surface (barrage El Houwareb) et l'eau souterraine (forages publics). Le barrage El Houwareb a permis le développement de l'agriculture irriguée sur le bassin du Merguellil. Même les agriculteurs situés en dehors du périmètre public en ont profité.

Ce barrage a une capacité maximale de 95 millions de m³, mais n'a jamais été totalement rempli. L'apport annuel moyen depuis 1989 a varié entre 3 et 38 millions de m³ (moyenne de 17,64 millions de m³), ce qui correspond à un ruissellement global du bassin amont compris entre 5 et 10 %, ce qui est très éloigné de la capacité maximale du barrage. Kingumbi et al. (A. Kingumbi et al. 2004), estiment que les apports au barrage sont constitués à 5 % par les pluies tombant sur la retenue, à 12 % par les débits de base et à 83 % par les débits de crue.

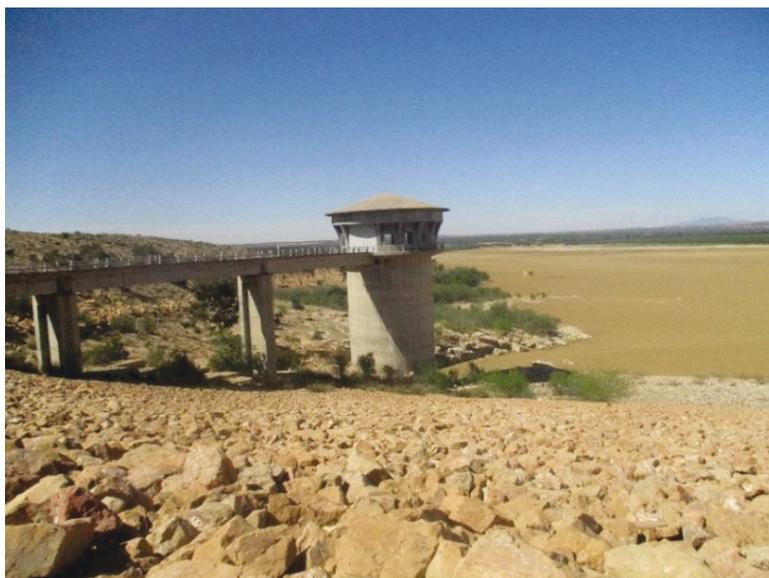
Figure 1-8 : Evolution des apports et des prélèvements d'irrigation du barrage El Houwareb entre 1989 et 2014



Source : Rapport annuel de la division exploitation des PPI, Campagne 2014-2015 (CRDA, 2015)

Les apports au barrage ont beaucoup baissé ces dernières années (faible pluviométrie, les aménagements CES qui ont perturbé les écoulements). En 2014 la totalité des quantités apportées est utilisée dans l'irrigation, le barrage se trouve donc à sec.

Figure 1-9 : Etat du barrage El Houwareb en 2015 (*)



Source : Azizi (avril, 2015)

(*) le barrage est vide et cela peut donner une idée sur les difficultés

L'irrigation dans le périmètre El Houwareb est basée actuellement sur les 6 forages de renforcement. Ces forages ne suffisent pas pour subvenir aux besoins des agriculteurs. Trois stations de pompage ont été créées sur l'émergence de barrage pour combler le manque d'eau dans les 3 périmètres d'El Houwareb.

5.2. Un développement incontrôlé de l'irrigation privée

Dans les années 1970, parallèlement au développement des PPI, les agriculteurs ont aussi massivement investi dans des puits et forages individuels. Ce mouvement est soutenu dès cette époque par les projets de développement : ainsi, le projet tuniso-canadien recommande l'augmentation de l'exploitation et conseille même aux usagers de forer jusqu'à des couches plus profondes (Pantu 1973). La prolifération des puits se poursuit et l'exploitation de la nappe s'accroît à la fin des années 1980 avec la construction des barrages Sidi Sâad et El Haouareb (Kallali 1989).

Cette dynamique s'intensifie dans les années 1990 et 2000 grâce aux incitations financières de l'Etat et à l'introduction des motopompes centrifuges (Albouchi, 2006) (Tableau 1-2). Selon Feuillette (2001), l'Etat creusait lui-même les puits dans les années 60 ; vers les années 70, il fournissait du matériel aux agriculteurs (Pantu 1973) ; dans les années 80, il commence à accorder les subventions. Ce n'est qu'à partir des années 1990, que des politiques d'économie d'eau ont été mises en place. Mais elles ont permis aux irrigants de dégager plus de revenu, leur permettant après quelques années d'investir dans des forages privés. Suite au constat de la "prolifération alarmante" des puits et d'une surexploitation de la nappe, un périmètre de sauvegarde a finalement été déclaré en 1991 (décret n° 91-1167), après avoir été proposé à plusieurs reprises (Kallali et Gharbi 1986).

Si ce décret a conduit à l'arrêt des subventions accordées par l'Etat, il n'a pas empêché la prolifération des captages. La construction de nouveaux puits a toutefois diminué des deux tiers sur la période 1990-95 par rapport à la période 1985-90 mais celui des forages a doublé. Cette situation peut s'expliquer notamment par le morcellement des exploitations, le processus d'héritage ayant accéléré le rythme de leur expansion.

Tableau 1-2 : Evolution du nombre des puits et des prélèvements sur la nappe

Année	1980	1985	1990	1995	2000	2010
Nombre total des puits	2039	2833	3776	4026	4576	2255
Exploitation annuelle (Mm³)	22.4	24.7	26.1	27.5	28.8	44.34
Ressources exploitables (Mm³/ an)	26	26	26	26	26	31
Taux d'exploitation (%)	86.2	95	100.4	105.8	110.8	143

Source : Inventaire des puits 2010, DGRE de Kairouan (Salhi, 2005), CRDA (RE, 2015)

Depuis la Révolution de 2011, l'approfondissement des puits existants et le creusement de nouveaux forages augmentent avec un rythme très accéléré suite à un manque de contrôle exercé par les autorités publiques dans ce contexte de transition.

Tableau 1-3 : Répartition des puits privés par imada et période de construction

Imada	Date inconnue	avant 1960	1960-69	1970-79	1980-89	1990-99	2000-10	Total général
Abida	126	5	34	91	63	65	74	458
Chebika	54			2	7	48	101	212
El Karma	18	1	2	3	1	3	2	30
Hammad	17	2	2	4	3	40	64	132
Houfia	13	-	-	-	-	5	8	26
Ouled Khalfallah	3	-	-	-	-	-	3	6
Ben Salem	15	-	-	-	2	21	60	98
Total général	246	8	38	100	76	182	312	962

Source : Inventaire des puits 2010

La Figure 1-2 et le Tableau 1-3 illustrent l'importante multiplication des puits et forages dans la quasi-totalité des imadas de la zone d'étude⁶, avec une concentration dans les secteurs Abida et Chebika. En effet, la construction des puits a démarré dès les années 1960 dans le secteur d'Abida où il n'existe pas de PPI et la nappe est facilement accessible (profondeur moyenne : 109 m contre 133 m dans les autres imadas). Elle s'est étendue aux secteurs de Chebika, Hammad et Ben Salem, à partir de 1990 avec une accélération dans la dernière période (Morardet et al., s. d.).

Malgré l'interdiction de la loi, les puits et forages sont développés aussi dans les PPI, avec des dynamiques différentes en fonction des secteurs : à l'ouest de la zone (Houfia, Karma et Ouled Khalfallah), le développement de l'irrigation privée est plus limité, plus récent et plus souvent à base de forages (53 % des puits contre 4 % à l'est). Ces différences s'expliquent, par la présence de nombreux PPI dans le secteur Karma, par un relief très difficile dans les secteurs Houffia et ouled khalfalah, une qualité de sol moins adaptées aux cultures maraîchères et une nappe plus profonde et difficile d'accès.

⁶ Les données de l'inventaire des exploitations réalisé en 2016 et de l'inventaire des puits de 2010 sont assez concordantes tant en termes de nombre total de puits ou forages que de répartition spatiale. Ainsi l'inventaire des exploitations recense environ 999 exploitations ayant un puits ou un forage contre 962 puits ou forages identifiés en 2010 par le CRDA, avec près de la moitié dans les deux cas localisés dans le secteur d'Abida. Les plus gros écarts concernent les secteurs de Ben Salem, Hammad et Ouled Khalfallah.

Tableau 1-4 : Répartition des puits privés selon le type d'équipement et l'imada

Imada	Pompe diesel	Pompe électrique	Type de pompe non précisé	Total puits équipés	Abandonnés	Non équipés ou non utilisés	Total général
Abida	90	259	0	349	56	53	458
Chebika	68	70	3	141	43	28	212
El Karma	2	10	12	24	4	2	30
Hammad	35	37	0	72	46	14	132
Houfia	9	8	1	18	3	5	26
Ouled Khalefallah	4	0	0	4	1	1	6
Ben Salem	24	35	0	59	26	13	98
Total général	232	419	16	667	179	116	962

Source : Inventaire des puits 2010

Une part non négligeable des puits et forages recensés en 2010 sont soit abandonnés (18.6 % des puits), soit non équipés de pompes ou non utilisés (12 %) (Tableau 1-4). Ainsi seuls 69 % des puits recensés sont équipés d'une pompe (puits-sondages).

Au début, les agriculteurs ont creusé des puits dont la profondeur autorisée est limitée à 50 mètres. Mais avec le rabattement continu de la nappe, ces puits sont rapidement prolongés par des forages à bras⁷. Ainsi les pompes électriques (63 % des puits équipés) tendent à supplanter les pompes diesel qui équipaient les puits construits dans les années 1990-2000. L'abaissement de niveau de la nappe a provoqué l'abandon de ces forages à bras remplacés par des nouveaux sondages construits à leur proximité. Seuls les forages autorisés sont équipés par de pompes à fort débit puisqu'ils sont alimentés en triphasé ; les forages illicites sont alimentés à partir du réseau électrique domestique ou fonctionnent avec un moteur à gasoil.

⁷ L'opération du "forage à bras" commence par un faux-puits, approfondi par un enfouissement ("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.

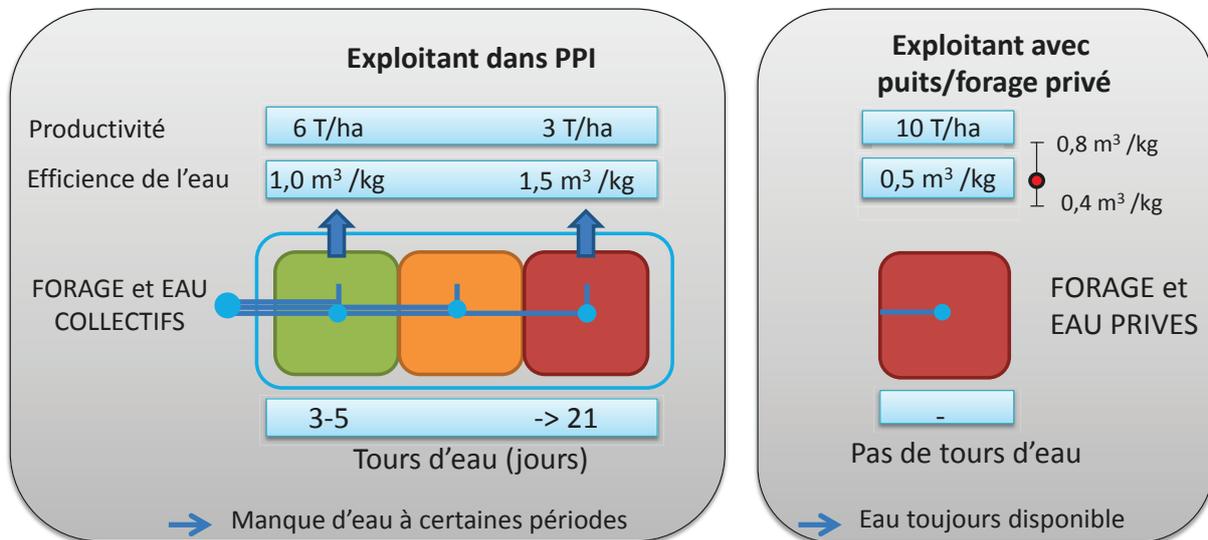
Figure 1-10 : Le mouvement d’approfondissement et de creusement des forages privés qui fonctionnent en majorité par le gasoil



Source : Azizi (mai, 2016)

La dynamique observée s’explique par la sécurité qu’offre un forage privé et la souplesse qu’il procure dans les choix tactiques et stratégiques de l’exploitation. L’importance de la valeur ajoutée de plusieurs cultures irriguées comme le maraîchage encourage les agriculteurs à investir dans des forages privés pour garantir un accès continu à la ressource. La Figure 1-11 compare les résultats technico-économiques de trois producteurs de piments placés dans des situations variées d’accès à l’eau.

Figure 1-11. Productivité agricole du piment et valorisation de l’eau selon l’accès à l’eau



Source : Snoussi 2013

Les exploitations appartenant à un PPI peuvent subir un manque d’eau parfois sur de longues périodes, dont l’ampleur dépend de la longueur des tours d’eau et de l’emplacement de l’exploitation (proche ou éloigné de la tête du réseau). Cela réduit ainsi l’efficience de l’eau utilisée et peut fortement affecter le rendement des cultures. L’investissement dans un forage privé permet ainsi de surmonter ces contraintes.

Les modes d'accès à la ressource impactent ainsi significativement le choix du système de culture, le degré de valorisation de la ressource et le niveau de la rentabilité.

6. UNE NAPPE SUREXPLOITEE MALGRE LES TENTATIVES DE GESTION MISES EN PLACE

6.1. Un niveau en baisse continue dès les années 1980

Les premières alertes concernant le niveau de la nappe débutent dès les années 1970 : Billib (1971) estime qu'en moyenne les volumes pompés dépassent les apports. La nappe de Kairouan commence réellement à baisser au début des années 1980. Cette situation de surexploitation est aggravée par une longue période de sécheresse entre 1982 et 1988, durant laquelle aucun lâcher n'a été effectué ni du barrage El Houwareb (depuis sa mise en eau en réalité), ni du barrage Sidi Sâad.

Trois principaux éléments expliquent cette situation : le changement climatique, la construction du barrage bloquant tous les écoulements à l'aval et l'intensification de son exploitation.

Tableau 1-5 : Bilan de la nappe en 2015

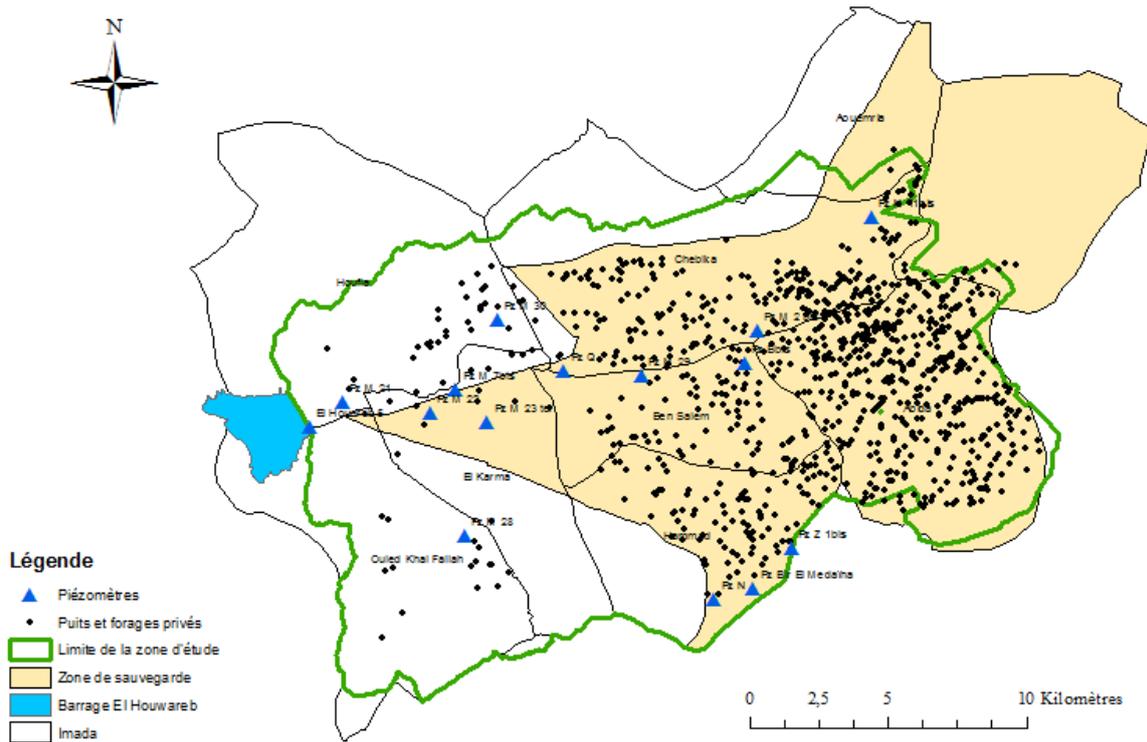
Ressources exploitables		Ressources exploitées		
		Forages	Exploitation	Taux d'exploitation
<i>l/s</i>	<i>Mm³/an</i>	-	<i>Mm³/an</i>	%
983	31	433 (dont 385 pour l'irrigation : 186 autorisés et 199 illicites)	44.34 (dont 28.53 Mm ³ prélèvement agricole)	143.05 (taux d'exploitation agricole 92%)

Source : CRDA Kairouan 2015

Ainsi cette surexploitation atteint 143 % en 2015 (Tableau 1-5). Elle est d'abord liée au développement agricole régional, qui représente de loin la principale ponction dans la nappe (environ 30 millions de m³ prélevés annuellement selon les chiffres officiels sans compter le reste des prélèvements illicites). Bien que le CRDA déclare en 2015 seulement 433 forages dans la plaine de Kairouan, ce nombre est estimé à 2 253 selon l'inventaire réalisé en 2010 par un bureau d'étude. Le manque de contrôle et de la fiabilité des statistiques constitue une des contraintes qui entrave la gestion de cette ressource. Malgré de multiples mesures de terrain et études entreprises depuis plusieurs décennies, il reste encore de nombreuses incertitudes qui rendent le bilan actuel de la nappe très incertain, à la fois sur les flux entrants et sortants.

Un réseau de 36 piézomètres de profondeurs différentes a été mis en place. Notre zone d'étude renferme 15 piézomètres équipés de limnigraphes et indiquant l'abaissement de la nappe.

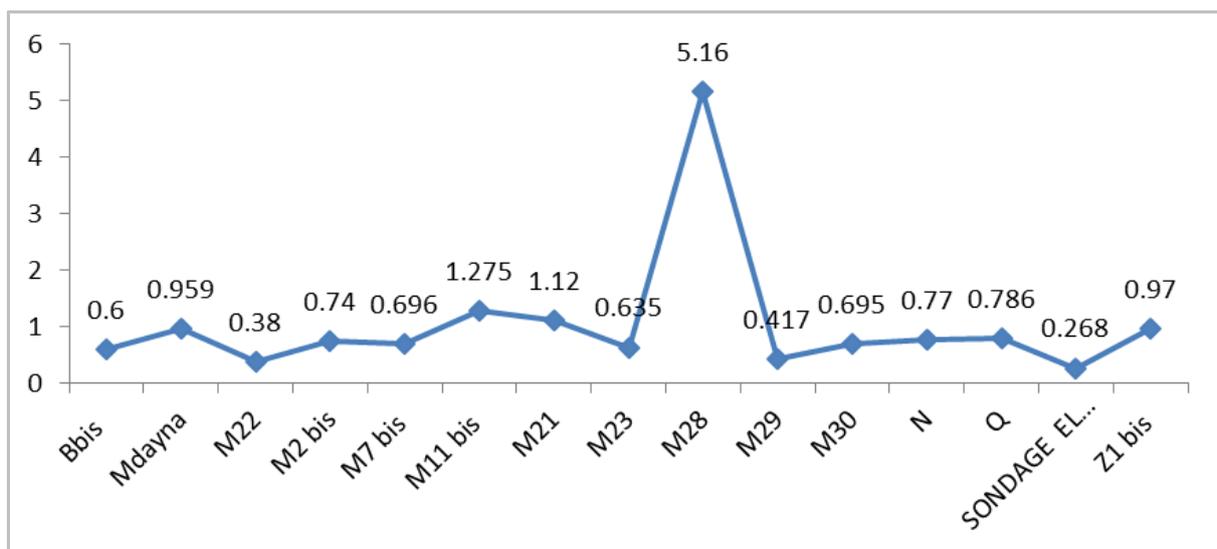
Figure 1-12 : Position des différents piézomètres dans la zone d'étude



Source : CRDA (arrondissement ressource en eau RE, 2015)

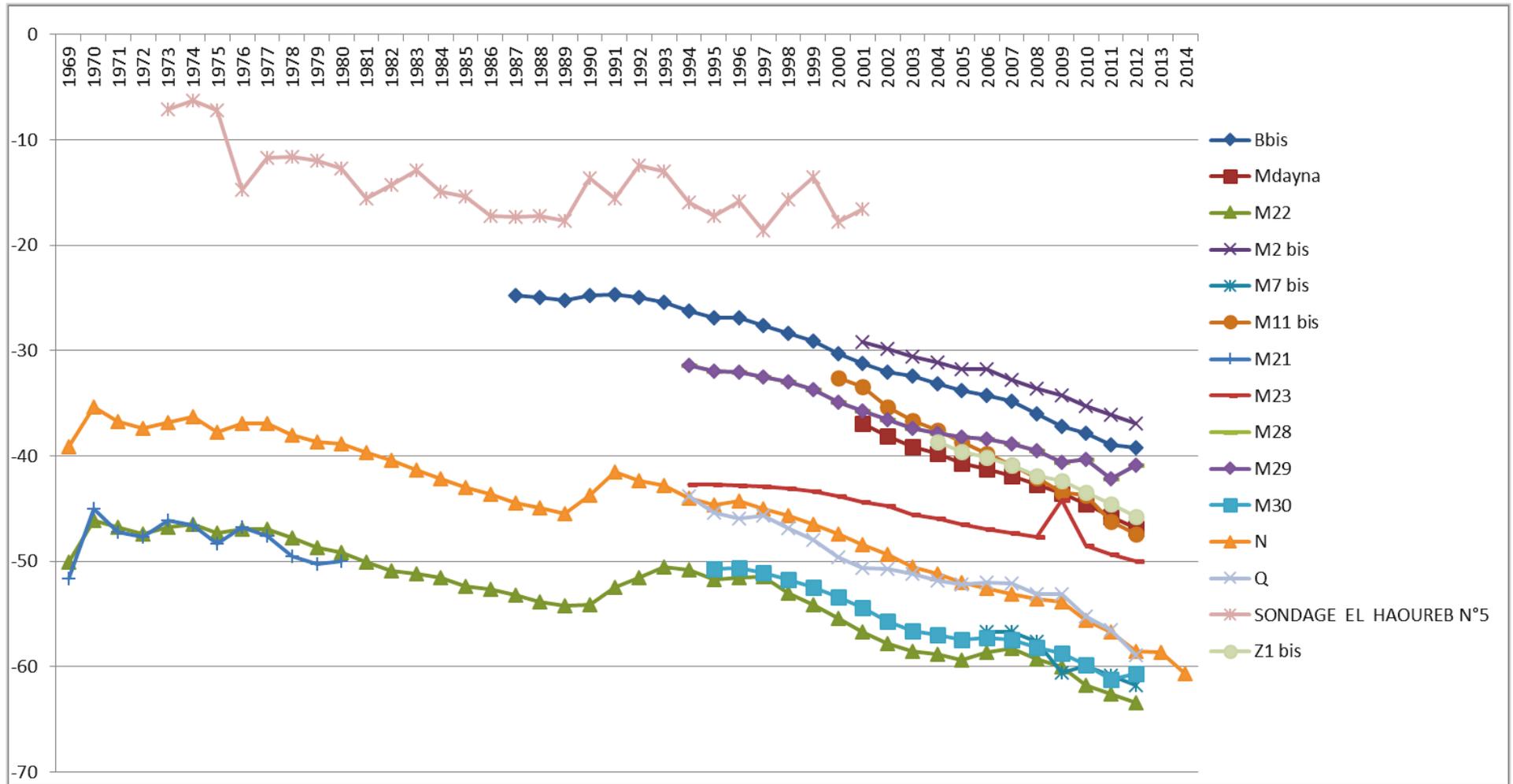
En 2015, la baisse moyenne annuelle est de 1 mètre par an avec des différences observées selon l'emplacement des différents piézomètres.

Figure 1-13 : La baisse moyenne annuelle des piézomètres de la zone d'étude (m)



Source : CRDA (arrondissement ressource en eau RE, 2015)

Figure 1-14 : Evolution annuelle moyenne du niveau de la nappe pour différents piézomètres (m)



Source : CRDA (arrondissement ressource en eau RE, 2015)

Cette représentation simplifiée repose sur les séries temporelles piézométriques enregistrées depuis 1969 (année des grandes inondations). Indépendamment des différences de niveau, principalement dues à la pente du toit de la nappe, la forme des courbes permet de dégager un constat général de baisse du niveau piézométrique dans notre zone d'étude (dont le fonctionnement semble homogène).

La baisse la plus importante est observée dans les secteurs Chebika, Karma et Hammad. L'unique piézomètre qui ne montre pas les mêmes fluctuations que les autres est celui du sondage el Houwareb 5, c'est la zone la plus proche du barrage et des écoulements de l'amont.

6.2. Des tentatives de gestion insuffisantes de la demande sur la nappe de Kairouan

La nappe de Kairouan est gérée de façon centralisée par le CRDA : il n'y a pas d'organisations collectives locales chargées de la définition et de l'application des règles d'utilisation. Elle peut ainsi être considérée comme une source collective en libre accès. Malgré la définition d'une zone de sauvegarde, les agriculteurs continuent de creuser des nouveaux forages ou d'approfondir les anciens au-delà de la limite officielle fixée pour les forages non autorisés (50 m). Et l'exercice de la police des eaux est difficile du fait de leur nombre et de leur dispersion. C'est pourquoi l'administration a cherché à s'appuyer également sur des outils indirects de contrôle, tels que la réglementation des entreprises de construction des puits et forages (décret n° 97-2082) (Sarah Feuillette 2001), Mais, faute de moyens humains et de l'agilité des entrepreneurs, les entreprises déclarées illégales n'ont pas cessé leurs activités pour autant. Les agriculteurs ne comprennent pas les raisons de l'instauration de la loi de sauvegarde, remettant en cause les discours concernant le rabattement de la nappe. Cette défiance provient notamment du fait que ce sont les mêmes institutions qui encourageaient l'installation et l'électrification des puits, accordaient les subventions pour les matériels d'irrigation et subventionnaient le gasoil. Cette rupture dans la politique est due à la double fonction de l'ETAT (administration) comme promoteurs de développement régional mais aussi à son rôle d'assurer la protection et la durabilité des ressources naturelles. Cependant cette contradiction est mal assimilée par les agriculteurs et risque d'attiser un sentiment d'iniquité pour les nouveaux irrigants.

Le CRDA en tant que responsable du contrôle des prélèvements dans la zone ne connaît ni le nombre exact des forages, ni les profondeurs et le rythme des prélèvements. Les moyens de contrôle à la parcelle manquent également (pas de compteurs automatiques pour contrôler les prélèvements). Les seules informations disponibles proviennent de projets de recherche conduits sur la zone d'étude : les premiers travaux de l'équipe MERGUSIE (Feuillette et al., 1998), l'inventaire effectué en 2010 par un bureau d'étude et les données collectées dans le cadre du projet ANR AMETHYST.

Les irrigants ressentent le rabattement de la nappe et la dégradation de la qualité de l'eau mais ne communiquent pas entre eux. Chacun cherche des solutions individuelles pour s'adapter, continuant ainsi à approfondir leurs puits et à creuser des forages pour préserver leurs assolements tant que l'augmentation du coût du pompage est acceptable.

Des tentatives de gestion collective et d'organisation spontanée de règles de gestion ont commencé à apparaître autour de l'émergence vu le déséquilibre ressource/usage, démontrant ainsi la capacité des agriculteurs de Kairouan à gérer une ressource collectivement dès lors qu'ils y trouvent un intérêt commun. L'histoire de la zone comporte aussi un exemple de gestion collective de la ressource qui a eu lieu avant la mise en eau du barrage : les syndicats d'inondation chargés de dévier les eaux de crues via des ouvrages manuels se sont organisés pour irriguer leurs parcelles. La mise en place d'institutions de gestion participative à l'échelle de la nappe, à l'image des GDA existant actuellement au niveau des périmètres irrigués, pour gérer un volume alloué à l'ensemble des puits privés peut être un élément à discuter.

7. CONCLUSION

La plaine de Kairouan est ainsi un système agraire très compliqué qui combine à la fois l'irrigation privée et l'irrigation collective basées toutes les deux sur une nappe souterraine en libre accès. Trois facteurs semblent déterminer le choix des cultures et donc le niveau de consommation en eau des agriculteurs : le mode d'accès à l'eau, le foncier et le capital financier. On observe ainsi de nombreuses associations entre les détenteurs de ces différents types de capitaux, le plus souvent de façon informelle et éphémère. La diversité de ces arrangements explique en partie la mosaïque des systèmes de culture existants et leur dynamique, dont il est difficile cependant de quantifier l'étendue respective. La forte rentabilité économique des cultures irriguées a conduit à un développement incontrôlé de puits et des forages, le plus souvent illicites. Le rythme de creusement des puits et forages s'est encore accru après la révolution de 2011. Cette expansion des forages privés a engendré un rabattement annuel important de la nappe.

Devant une telle situation on se demande pourquoi les irrigants n'accèdent pas à l'eau du GDA, quelles sont les attentes des irrigants de l'investissement dans des forages assez coûteux ? Cette frénésie de prélèvements privés est-elle accompagnée par un changement dans les systèmes de culture et quel est son impact sur l'évolution de la consommation en eau dans la plaine ? On essaiera dans les chapitres suivants de trouver quelques réponses à ces interrogations.

CHAPITRE 2

Approche méthodologique générale

« Le propre de la méthode, est d'aider à comprendre au sens le plus large, non les résultats de la recherche scientifique, mais le processus de recherche lui-même » (Kaplan 1964)

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)

1. INTRODUCTION

Comme expliqué dans la problématique, notre recherche porte sur un terrain d'étude emblématique, qui connaît des dynamiques très importantes marquées par une expansion extraordinaire des forages privés, qui a causé un rabattement important de la nappe et met actuellement en danger le développement agricole dans la zone. L'objectif principal de cette recherche est d'identifier les déterminants de la demande en eau d'irrigation et des dynamiques observées, spécifiquement l'expansion des forages privés, qui constitue actuellement la préoccupation majeure de l'administration tunisienne dans la plaine de Kairouan. Nous voulons ainsi modéliser le comportement des irrigants face à une diversité de modalités d'accès à l'eau (différents niveaux de disponibilité), pour construire les fonctions de demande en eau individuelles, analyser leur logique d'investissement dans des forages privés et simuler quelques scénarios de gestion (Chapitre 5).

L'approche méthodologique retenue pour répondre aux questions que nous nous sommes posées, est présentée dans ce chapitre ainsi que les raisons ayant présidé au choix des outils et méthodes d'investigation et d'analyse. Dans la section 2 nous nous limitons à décrire l'approche globale et les principales caractéristiques des méthodes utilisées, la description détaillée de chaque étape étant présentée dans les chapitres concernés.

Les sections 3 et 4 de ce chapitre décrivent les différents types de modèles capables de représenter les comportements des agriculteurs et justifie le choix du modèle retenu. La section 5 revient sur les traits caractéristiques du système agricole de la plaine de Kairouan que nous souhaitons représenter dans le modèle. Enfin, la section 6 est consacrée au protocole de collecte des données, qui découle de l'approche théorique du fonctionnement des exploitations et des options de modélisation retenues.

2. VUE D'ENSEMBLE SUR LA DEMARCHE GLOBALE

L'objectif de la démarche globale présentée ci-après est d'expliquer les mécanismes responsables des dynamiques observées dans la plaine de Kairouan et de modéliser le comportement des irrigants face à différents modes d'accès à l'eau dans la perspective d'analyser le phénomène d'expansion des forages privés et d'estimer la demande en eau agricole. Cette démarche est fortement inspirée par les travaux antérieurs sur la plaine notamment ceux de Feuillet (Feuillet 2001) et Poussin, (Poussin, Ben Mihoub, et Beji 2008) et l'opportunité de pouvoir analyser l'évolution des exploitations agricoles sur 10 ans, en mobilisant les bases de données issues des enquêtes antérieures.

Notre approche méthodologique est structurée en 5 étapes :

- Dans un premier temps, le travail de terrain a consisté à réaliser des entretiens avec le CRDA, la CTV et les GDA un deuxième temps, Les entretiens avec les membres des GDA ont servi à évaluer les performances de ces derniers et caractériser la demande en eau collective dans la plaine, qui constitue une des composantes de la demande globale dans ce territoire irrigué. Ils nous ont aussi permis d'identifier les déterminants

qui expliquent les écarts de performance entre les GDA et d'analyser les conséquences des dysfonctionnements de ces entités de gestion pour les exploitations agricoles (Chapitre 3). Cette analyse a alimenté notre réflexion pour la préparation des questionnaires des deux enquêtes auprès des exploitations. Cette première phase de terrain a été menée de concert avec une recherche bibliographique fouillée qui a permis de mobiliser les données existantes issues des études antérieures, des cartes, et des données climatiques et hydrauliques (profondeur de la nappe, débit des forages, types de pompe...)

- Dans un deuxième temps, nous avons réalisé un inventaire d'exploitations de toute la zone à dire d'acteurs, une enquête typologique auprès d'un échantillon d'agriculteurs de la plaine (en aval du barrage) et une enquête technicoéconomique détaillée auprès d'un échantillon plus réduit. L'enquête typologique nous a permis de cerner la diversité des situations et de décrire la structure globale des exploitations et leurs orientations de production. Cette enquête typologique a été suivie d'une enquête technicoéconomique pour collecter des données sur le fonctionnement détaillé des exploitations nécessaires à la spécification du modèle : les rotations, les pratiques culturales et d'irrigation et les résultats technico-économiques.
- En se basant sur les données collectées auprès des agriculteurs et pour simplifier la diversité observée dans la réalité et la rendre plus facile à appréhender, nous avons construit une typologie d'exploitations. Nous avons suivi une approche diachronique⁸ en actualisant la typologie réalisée en 2005 par Poussin (Poussin, Ben Mihoub, et Beji 2008), d'abord pour analyser les trajectoires d'évolution des exploitations, ensuite pour évaluer la nouvelle demande en eau agricole à l'aval du barrage d'El Houwareb (Chapitre 4).
- Après l'analyse des dynamiques globales de la région et des mécanismes d'évolution des exploitations agricoles, nous sommes passés à la modélisation d'une exploitation type sous différentes conditions d'accès à la ressource et en essayant d'analyser les stratégies qui en découlent (Chapitre 5). Le modèle utilisé dans ce travail est un modèle microéconomique (construit avec le logiciel GAMS⁹). Celui-ci ne cherche pas à identifier les décisions optimales d'agriculteurs parfaitement rationnels (ce qu'ils devraient faire) mais vise à décrire le fonctionnement des exploitations, à représenter les contraintes qui pèsent sur les agriculteurs et à comprendre de manière fine leurs stratégies et la façon dont ils prennent leurs décisions en termes d'usage de l'eau en fonction des différentes composantes climatiques et socio-économiques. Le modèle micro-économique est alimenté par un modèle agronomique (logiciel Cropwat, (Smith 1992), cité par Souissi (2014), qui permet la simulation des rendements des cultures en fonction de différentes conditions climatiques et d'apports d'irrigation. La combinaison des deux modèles permet ainsi de construire les fonctions de demandes en eau en fonction du mode d'accès à l'eau d'irrigation.

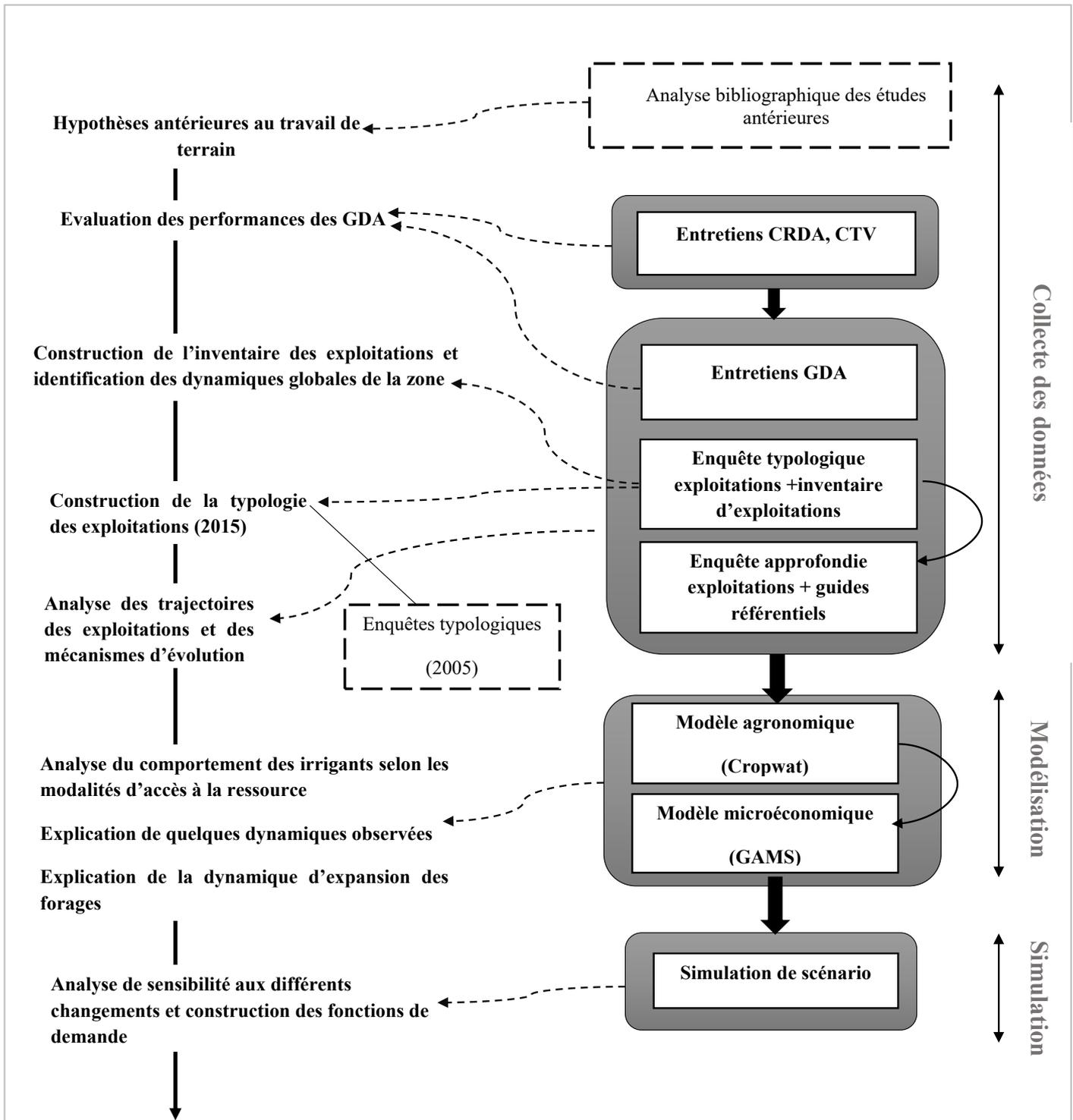
⁸ Nous avons enquêté 126 exploitations agricoles dont 69 avaient déjà été enquêtées en 2005 par Jean Christophe Poussin.

⁹ GAMS : General Algebraic Modelling System, GAMS Development Corp., Washington DC, USA

- Finalement, nous avons utilisé les modèles individuels construits pour simuler les réponses possibles des agriculteursquelques scénarios de gestion (politiques de prix de l'eau des GDA, politique énergétique, et efficacité des GDA) .

La Figure 2-1 ci-après résume notre approche méthodologique.

Figure 2-1 : Démarche d'ensemble de la thèse



Les outils mobilisés dans ce travail ont beaucoup évolué au fil des discussions avec les différents acteurs et des réflexions actualisées à chaque étape d'avancement. Plusieurs pistes de

collecte et d'analyse des données, mais aussi de modélisation, ont été envisagées puis abandonnées face aux caractéristiques du terrain et aux contraintes de disponibilité des données.

3. LES APPROCHES DE MODELISATION DE LA DEMANDE EN EAU AGRICOLE

Après avoir décrit notre démarche globale nous allons dans cette section établir un état de l'art sur les approches théoriques qui peuvent être utilisées pour représenter notre système d'étude, décrit en détail dans le Chapitre 1. Le type de modélisation à choisir dépend de l'objet d'étude qui peut concerner une partie ou un ensemble du système global, de l'objectif du modélisateur (modèle de gestion, d'optimisation, modèle heuristique) et des techniques de formalisation utilisées. Les caractéristiques de plusieurs types de modèles, et leurs limites par rapport aux objectifs de notre travail sont présentées ci-dessous, pour déboucher enfin sur l'intérêt présenté par les modèles microéconomiques et leurs domaines d'utilisation.

L'étude de l'exploitation agricole et du comportement des irrigants se fait dans un environnement très complexe caractérisé par la diversité des relations des exploitations avec leur milieu physique, le contexte local, les conditions sociales et économiques, les politiques passées ou en vigueur... Ceci nous invite à suivre une approche systémique.

3.1. Approche systémique

L'approche systémique s'est développée ces dernières décennies pour prendre en compte la complexité de l'agriculture en tant qu'activité qui se trouve à l'interface entre sciences sociales, sciences biologiques et sciences de la terre (Aubriot 2002). Elle s'est développée notamment au travers du concept de système agraire et ses constantes évolutions (Jouve et Tallec 1994). C'est une démarche pluridisciplinaire qui vise à considérer l'agriculture dans sa globalité et qui cherche à comprendre ses transformations en tenant compte de différents disciplines, tout en s'appuyant sur une analyse des différents systèmes de cultures et de production. Comme le définit P. L. Osty, « *étudier l'exploitation agricole comme un système c'est considérer d'abord l'ensemble avant d'étudier à fond les parties que l'on sait aborder. L'exploitation agricole est un tout organisé qui ne répond pas à des critères simples et uniformes d'optimisation* » (Osty 1978).

Appliquer cette approche dans des problématiques liées à la gestion en eau est particulièrement indiqué. En effet le thème de la gestion de l'eau invite à une démarche intégrant plusieurs domaines puisqu'il se rapporte à la fois à des aspects hydrologiques, socio-économiques, agronomiques et environnementaux (Brossier 1987).

Nous avons appliqué cette approche dans le recueil des données, l'analyse de l'effet de l'environnement partagé des exploitations sur leurs trajectoires d'évolution (Chapitre 4, section 5), ainsi que dans la phase de modélisation en tenant en compte des différents types de contraintes qui pèsent sur le fonctionnement de l'exploitation.

Cette vision systémique, appliquée à notre zone d'étude, permet d'approcher le terrain dans sa complexité et de dégager les principaux éléments qui l'affectent. La phase de modélisation

permet par la suite de représenter les phénomènes qui paraissent les plus importants vis-à-vis de nos questions de recherche.

3.2. Quel modèle pour étudier le comportement des irrigants face à un accès diversifié à la ressource?

Dans un contexte de rareté des ressources naturelles, il est de plus en plus nécessaire d'évaluer la demande en eau et d'identifier ses déterminants pour une meilleure gestion de la ressource. Le défi pour les économistes est de bien comprendre et représenter le comportement des agriculteurs dans leur allocation des ressources entre les différentes cultures, afin d'évaluer ensuite les impacts économiques des politiques et des changements dans la disponibilité de ces ressources et les adaptations qui pourraient être mises en œuvre par les agriculteurs en réaction à celles-ci.

L'allocation des ressources en eau induite par divers changements : climatiques et socio-politiques, constitue une préoccupation majeure des économistes. La rareté de ces ressources constitue dans certains cas une contrainte pour le développement socio-économique des pays.

Les économistes agricoles ont développé différentes approches pour modéliser l'allocation en eau et estimer la demande qui en découle. Parmi ces méthodes empiriques on distingue les modèles de programmation mathématique, l'économétrie (Hendricks et Peterson 2012 ; Frija et al. 2011), la méthode des prix hédoniques (Faux et Perry 1999) et l'évaluation basée sur les préférences déclarées (Storm, Heckelevi, et Heidecke 2011). Les plus communes des approches mises en œuvre sont l'économétrie et les modèles de programmation mathématique (MPM). (Anderson 1983) a été le premier à analyser la demande d'irrigation tant par une approche économétrique que par des modèles de programmation, (Bontemps et Couture 2000).

3.2.1 Les modèles économétriques

Le recours à l'économétrie dans la modélisation des comportements des exploitants est très répandu. Les modèles économétriques consistent à identifier les facteurs déterminants du comportement des agriculteurs. Ils intègrent l'élasticité prix des facteurs de production, pour analyser leur demande et les effets de leur disponibilité ou substitution sur le rendement, ils permettent aussi de tester les élasticités prix croisées (effet de substitution entre facteurs) (Jensen, Andersen, et Kristensen 2002). Le principal avantage des modèles économétrique réside dans leur capacité à simuler des adaptations à des changements marginaux du contexte de production.

Ces modèles sont appliqués dans différents contextes (Etats Unis, Israël, Tunisie, France). La difficulté d'appliquer ces modèles réside principalement dans la nature des données qui doivent être très précises et nombreuses et couvrir une grande variabilité de situations. C'est en effet à partir des données d'observation des réactions des agriculteurs à des variations de prix en termes d'utilisation de facteurs de production que les régressions multiples sont réalisées et que le poids de différents déterminants peut être estimé. Ce type de données est très souvent inexistant dans les pays en développement. L'autre inconvénient de ces modèles économétriques est leur

incapacité à modéliser les conséquences d'un choc exogène non constaté dans le passé ou pour lesquels les paramètres estimés ne sont pas fiables.

Dans le domaine des ressources en eau, les modèles économétriques sont généralement utilisés pour simuler l'effet des politiques de tarification sur la demande en eau (Bontemps et Couture 2000). A court terme, les études économétriques ont montré des demandes globales en eau inélastiques aux modifications de prix, le prix n'ayant un effet que sur l'allocation de la terre entre les différentes cultures (Bontemps et Couture 2000).

3.2.2 Les modèles de programmation mathématique (MPM)

Les modèles de programmation mathématique reposent sur une description formalisée du comportement des agents. C'est une technique de résolution des problèmes d'optimisation sous contrainte, c'est-à-dire, des problèmes où un décideur souhaite optimiser un ou plusieurs (multi-objectif) critères de son choix (une fonction objectif de maximisation ou de minimisation), en sélectionnant un ensemble d'activités, sous certaines conditions externes (contraintes). Ces modèles sont basés sur l'hypothèse de rationalité du comportement économique et la disposition d'une information complète sur les ressources et les prix. La construction des modèles micro-économiques reste souvent assez difficile du fait de la complexité du monde réel (Boussard et Daudin 1988). L'intérêt majeur de ces modèles est de lever la contrainte liée aux données dans les modèles économétriques.

Economiquement, l'utilisation d'un tel modèle de programmation permet d'identifier l'effet de la variation de plusieurs paramètres sur les choix d'activités productives. Il fournit des solutions déterminées par plusieurs types de contraintes et peut tenir compte de la variation des prix, des rendements ou de certains coefficients techniques. Ces solutions peuvent ensuite être utilisées suivant différentes conceptions, soit de façon positive en tant qu'outil d'aide à la décision, ou normative en quête d'une solution optimale (Deybe 1993). L'hypothèse de la rationalité et le caractère optimisateur de l'agent qui découle de l'approche néoclassique sont relativement anciens dans la littérature en économie agricole. Son réel succès n'est apparu qu'avec la facilité d'accès à l'information et le développement des outils informatiques.

Plusieurs types de MPM sont développés dans la littérature : les modèles de programmation linéaire des activités agricoles (Montginoul et Rieu 1996), les modèles de programmation mathématique incluant des aspects non linéaires, dynamiques et stochastiques (Schaible 1997 ; Iglesias et al. 1998). Ces types de programmation sont bien adaptés à l'agriculture et spécialement au domaine de la gestion des ressources naturelles. Les premières applications dans le domaine de l'agriculture ont été des modèles de programmation linéaire (PL) « *La programmation linéaire est un instrument particulièrement bien adapté aux problèmes qui se posent dans l'activité agricole* » (Boussard et Daudin 1988). L'exploitation agricole est alors considérée comme une entreprise pour laquelle il s'agit de déterminer un système de production optimal ce qui revient à une combinaison optimale des facteurs de production (terre, travail, trésorerie...) afin de maximiser une fonction d'utilité (revenu maximum à atteindre, coût minimum de production ...), (Laurent et al. 2003).

L'hétérogénéité des exploitations agricoles à l'échelle d'une petite région génère une très grande diversité de comportements, ce qui nécessite le recours à la construction de typologies des exploitations avant d'entamer la phase de modélisation, d'une part pour bien présenter les contraintes qui diffèrent d'un type à un autre (Palacio, Guy, et Morardet 1995), d'autre part pour avoir la possibilité d'agréger les modèles individuels en cas de construction d'un modèle régional.

Ces types de modèles sont très adaptés aux problèmes agricoles, car ils permettent de quantifier les relations causales qui régissent le comportement de l'agriculteur, ils incitent à dépasser le simple stade du constat et de la description et à s'intéresser aux dynamiques du processus décisionnel, notamment en essayant de tenir compte des différents éléments de l'environnement socio-économique de l'exploitation.

La difficulté d'application des différents types de modèles de PM réside dans les hypothèses de simplification retenues pour reproduire la réalité de terrain. L'usage de ces modèles exige d'être très précis et très réaliste dans la description du comportement de l'agriculteur.

Les sections suivantes présentent un panorama des différents objectifs poursuivis en modélisation micro-économique et des méthodes associées, elle n'est pas exhaustive et elle a été réalisée au regard des objectifs de notre recherche.

Les objectifs visés par la modélisation en économie agricole sont multiples, les méthodes de programmation mobilisées pour atteindre ces objectifs sont aussi très nombreuses, une distinction entre les différents types de modèle et leurs usages paraît donc nécessaire.

3.2.2.1 Usage positif ou normatif des modèles

Les modèles utilisés de façon normative visent à expliquer l'utilisation des ressources dont disposent l'exploitation pour analyser la rationalité des agriculteurs et proposer des itinéraires et techniques plus efficaces (optimales), ils constituent donc un moyen d'aide à la gestion tactique des exploitations. Ces types de modèles peuvent être appliqués à différentes échelles : exploitation ou parcelle. Ils sont généralement multi périodiques avec des pas de temps courts, ils tiennent compte des paramètres agronomiques, hydrologiques, chimiques...ce qui offre à ces modèles la capacité de décrire des processus physiques tels que le cycle de l'azote ou la circulation de l'eau dans les sols. Plusieurs travaux sont basés sur ce type de modèle : par exemple, (Li et Yost 2000) développent un modèle pour rechercher les dates et quantités optimales d'apports d'eau et d'engrais, Bergez et al. en (2002), ont construit un modèle d'aide à la gestion de l'irrigation à un pas de temps journalier pour maximiser la marge brute d'une culture. Ils ont montré qu'une optimisation des calendriers d'arrosage pouvait accroître la marge brute de 100 euros par ha en réduisant la consommation en eau de 30% et les rendements de 10 %.

Les modèles utilisés de façon positive, quant à eux, ont pour objectif d'analyser la réponse des exploitations à différents chocs exogènes et d'évaluer leurs modalités d'adaptation aux différents scénarios. Ils sont appliqués soit de manière exploratoire en tant qu'outils d'analyse prospective, soit pour simuler des changements à court terme. Ces modèles sont appliqués à

l'échelle d'une exploitation, d'une région ou d'une nation et ils sont moins exigeants en données biophysiques. Les changements testés sont de nature politique (quotas, taxe, prix.), environnementale, climatique... Différentes études ont mobilisé ce genre de modèle : par exemple en France pour analyser l'impact de la politique agricole commune et de différents types d'instruments de gestion sur la demande en eau agricole (Morardet, Gleyses, et Rieu 2001), en Allemagne pour analyser les conflits d'objectifs économiques et environnementaux (Meyer-Aurich et Trüggelmann 2002).

3.2.2.2 Modèle statique versus modèle dynamique

La majorité des modèles développés en agriculture sont de type statique où la composante temps n'est pas prise en compte, mais il devient de plus en plus important de considérer cette composante. En effet, il est nécessaire dans l'allocation des ressources en eau par exemple, de savoir à quel point l'utilisation actuelle des ressources naturelles peut affecter son utilisation future. La ressource dans ce cas peut être conceptualisée comme un stock qui évolue avec le temps. Dans le cas des ressources renouvelables si le taux d'exploitation excède celui de régénération la disponibilité des ressources diminuera. On distingue plusieurs types de modèles dynamiques : des modèles d'optimisation inter-temporelle où le modèle tient compte de toutes les périodes comprises dans l'horizon de planification, ces derniers sont surtout adaptés dans le cas de la modélisation d'investissements, et des modèles récursifs où chaque optimisation dépend des résultats de l'itération précédente.

Les modèles inter-temporels peuvent être déterministes : dans ce cas on suppose que le décideur dispose d'une information complète et parfaite sur le futur qui guidera sa décision. Cependant plusieurs problèmes impliquent des décisions séquentielles, risquées et irréversibles. Il est donc intéressant de prendre en considération l'incertitude en utilisant la programmation mathématique dynamique stochastique. Parmi les modèles dynamiques stochastiques on distingue des modèles stochastiques à décision unique où on dispose des informations sur le futur en terme de probabilités de différents états de la nature, et des modèles stochastiques à décisions séquentielles où les décisions s'ajustent en fonction des événements qui surviennent et des résultats des périodes antérieures. La modélisation des problèmes dynamiques n'implique pas toujours la représentation du temps de façon explicite, dans ce cas-là on parle de modèles d'équilibre stationnaire. Dans un modèle d'équilibre stationnaire, on suppose que les mêmes décisions se répètent au cours du temps. Il est donc possible d'utiliser un modèle mono-périodique. En cas de modélisation d'un investissement, le modèle donne le niveau optimal d'investissement sans préciser le chemin à suivre pour atteindre cette dimension optimale depuis la situation initiale. Au contraire dans le cas de la programmation linéaire multi-périodique, le modèle tient compte du niveau initial d'investissement et définit le niveau optimal d'investissement à long terme ainsi que les stratégies à mener pour atteindre ce niveau optimal.

En plus des modèles inter-temporels, les modèles récursifs (Day 1961) peuvent être considérés comme dynamiques. La différence essentielle avec les modèles d'optimisation inter-temporelle réside dans la façon d'optimiser. Au lieu de réaliser une optimisation sur l'ensemble de l'horizon de planification, l'optimisation est faite pour chaque période individuellement, mais les résultats

de la période « t » vont influencer les données de départ dans la période « t+1 ». Dans les modèles récurrents, la solution de chaque période répond aux critères d'optimisation mais la solution globale peut ne pas être optimale.

3.2.2.3 Programmation mathématique linéaire versus non linéaire : spécificités et méthodes de calibration

La programmation mathématique linéaire (PML) est un cas particulier des modèles de programmation mathématique où la fonction objectif et les contraintes sont spécifiées de manière linéaire par rapport aux variables de décision (Just 1993). La capacité du modèle à reproduire la réalité est tributaire de l'exhaustivité et de la fiabilité des données collectées mais aussi de la capacité du modélisateur à traduire les contraintes qui pèsent sur les exploitations. Le calage de ces modèles peut être réalisé à partir d'informations techniques extérieures à la modélisation (données de terrain, guides référentiels) en effectuant des entretiens supplémentaires afin de comprendre les écarts entre les résultats du modèle et la réalité observée.

Une autre méthode de calage de ces modèles est possible, elle se base sur l'idée que l'écart entre la situation de référence et la réalité n'est pas dû à une mauvaise formulation des hypothèses mais au comportement des agriculteurs vis-à-vis du risque, qui résulte soit d'une variation des rendements causée par un manque de disponibilité des ressources (eau, main d'œuvre...) soit d'une variation des prix. Le principe consiste donc à maximiser l'utilité espérée du revenu dans un contexte incertain. Le calage du modèle dans ce cas-là se fait généralement en testant plusieurs valeurs du coefficient d'aversion au risque, le coefficient retenu étant celui qui génère l'écart le moins important entre le résultat du modèle et la situation réelle. Cette méthode a été mise en cause à plusieurs reprises (McCarl 1982), (Hazell et Norton 1986), (Heckelei 1997) : en effet la simplicité de la PML a plusieurs revers, en particulier le manque de flexibilité, la difficulté de calage, le basculement brutal des solutions en cas de chocs exogènes. Ces problèmes exigent d'utiliser cet outil avec précaution dans le cas d'analyse des politiques agricoles.

Pour dépasser les problèmes rencontrés dans le cas de la PML, en particulier le phénomène de basculement des solutions optimales (Hazell et Norton 1986) et l'arbitrage que le modélisateur doit faire entre la rigidité des contraintes techniques qui peut figer le modèle et la reproduction inexacte des prises de décision observées des agriculteurs (Gohin et Chantreuil 1999), avec la généralisation des outils informatiques capables de résoudre des problèmes plus complexes, les chercheurs ont développé la programmation mathématique non linéaire. Le choix d'un modèle linéaire ou non n'est pas seulement lié à la méthode de calage mais il est fonction de la spécification de la fonction objectif et/ou des contraintes. On peut choisir une forme non linéaire pour traduire de manière plus fidèle la réalité des comportements ou des processus biophysiques et économiques représentés dans les modèles.

La programmation mathématique positive (PMP) constitue une des méthodes les plus connues de PM non linéaire. La PMP stipule que si les résultats du modèle ne correspondent pas à la réalité, c'est qu'il existe des contraintes techniques et des coûts qui n'ont pas été pris en compte,

aussi bien que des facteurs de production hétérogènes provoquant des rendements décroissants. La PMP consiste donc à exprimer soit la fonction objectif soit quelques contraintes de façon non linéaire, en fonction des coûts de production et/ou des rendements à l'hectare (Howitt 1995 ; Paris et Howitt 1998) .

La PMP offre la possibilité de reproduire la situation observée et d'assurer un comportement « lisse » du modèle. Le calage de ce type de modèle se fait par la méthode du Maximum d'Entropie (Paris et Howitt 1998). Le principe consiste, au travers des coefficients des fonctions de production et de coût, à forcer le modèle à reproduire la situation de référence sans figer le modèle et avec très peu d'informations. La spécificité de ce type de programmation est son fort caractère positif, en effet on suppose que l'allocation choisie par l'agriculteur est optimale. Il permet une meilleure estimation des paramètres de la fonction objectif non linéaire, et permet donc de bien calibrer le modèle. Elle est donc intermédiaire entre la programmation économétrique positive - descriptive - et la PML qui est généralement normative - prescriptive.

3.2.2.4 Intégration du risque dans les modèles micro-économiques

Le fonctionnement de l'exploitation agricole relève de la prise de décision dans un environnement risqué : l'agriculteur cherche à classer ses alternatives (assolements possibles, allocation de ses ressources) et à choisir la meilleure solution par rapport à ses objectifs et à l'incertitude qui entoure ses décisions. Dans cette partie nous allons présenter les différentes sources de risque dans l'exploitation agricole et les différentes approches possibles pour sa modélisation. En effet, ne pas tenir compte de l'aversion au risque dans un modèle descriptif du comportement du producteur agricole conduit à un écart important entre les solutions du modèle et la réalité observée.

Les sources de risques sont les phénomènes qui rendent aléatoires certains éléments dans le processus de production. Elles peuvent être liées à la variabilité des ressources disponibles pour produire ou à celle des résultats que le producteur espère en tirer. Elles peuvent être classées en 4 catégories :

- Les risques de production affectent le processus de production. Ils incluent en particulier les aléas climatiques qui affectent les rendements des cultures, la disponibilité en eau et en jours de travail.
- Les risques de marché se manifestent par la variation des prix des produits agricoles qui est généralement conjuguée à la variabilité de l'offre. La fluctuation des prix affecte énormément le choix d'assolement.
- Le risque peut aussi résulter des changements institutionnels qui affectent la propriété et l'usage de la terre, la commercialisation, les aides de l'état, etc.
- Il y a enfin le risque humain qui vient des accidents ou maladies qui peuvent toucher l'agriculteur et les salariés, affectant ainsi la disponibilité de la force de travail.

Les décisions de l'agriculteur face à ces différents types de risque dépend de ses perceptions elles-même fonction de son expérience, et de son niveau d'aversion aux risques.

L'introduction du risque dans les modèles micro-économiques se base sur la théorie de la décision qui trouve son fondement dans la théorie de l'utilité espérée (Von Neumann et Morgenstern 1944). Cette théorie vise à expliquer la diversité des stratégies des agents économiques face à l'aléa : certains acteurs sont hostiles au risque et cherchent à s'en prémunir, d'autres au contraire sont sensibles à des gains importants, malgré le risque qui les accompagne (Hardaker et al. 2004).

L'introduction du risque dans les modèles de programmation mathématique peut se faire de différentes manières. Dans le passé la résolution des programmes non linéaires était difficile compte tenu des moyens informatiques. Cela a conduit les modélisateurs à proposer la linéarisation de la formalisation du risque. Aujourd'hui, le développement des solveurs qui sont devenus capables de résoudre des problèmes non linéaires et les performances des ordinateurs rendent plus facile l'usage des formalisations non linéaires du risque.

Plusieurs travaux ont réalisé une revue des techniques de programmation mathématique pour l'analyse du risque, par exemple (Hazell et Norton 1986), (McCarl et Spreen 1997). Le risque peut porter sur les coefficients de la fonction objectif, les ressources disponibles, ou sur les coefficients techniques des contraintes. Le traitement du risque dans la fonction objectif est le plus répandu. On distingue dans ce cas-là deux familles de méthodes : celles qui s'apparentent aux critères espérance-variance et celles qui relèvent des approches de type « safety first ». Nous allons définir chaque méthode brièvement.

Parmi les méthodes les plus répandues dans la modélisation du risque sur les revenus, la méthode d'espérance-variance est basée sur le principe de construction d'une fonction multi-objectif qui permet à la fois de maximiser l'espérance du gain tout en minimisant sa variation, qui est mesurée généralement par la variance ou l'écart-type. Une autre formulation possible, l'approche MOTAD, consiste à proposer une approximation linéaire de la variance en calculant la somme des déviations négatives et positives par rapport au revenu moyen. D'autres méthodes sont basées sur les contraintes de sécurité « Safety first ». Ici le risque est mesuré par l'écart par rapport à un seuil (ou Target) considéré par l'agriculteur comme un minimum vital qu'il juge obligatoire d'atteindre. Dans cette méthode on distingue les modèles à contrainte stricte et le Target-MOTAD. Les premiers peuvent aboutir à des solutions non faisables si le niveau de seuil est trop élevé, le deuxième permet de dépasser cette contrainte en donnant plus de flexibilité au modèle par l'intégration d'un coefficient qui limite la déviation tolérée par rapport à un revenu minimum souhaité.

Comme nous l'avons évoqué, le risque peut porter aussi sur les coefficients techniques et les ressources. Cela peut être intégré dans les modèles de PM de deux manières : soit dans le cadre des approches introduisant des probabilités sur les contraintes et la matrice des coefficients techniques (« chance constrained ») soit par la Programmation Stochastique Discrète (PSD) qui prend en compte les mécanismes d'adaptations envisagés par l'agriculteur selon les différentes situations rencontrées.

Le risque dans l'exploitation agricole peut affecter les différentes données de base du modèle. On ne peut donc pas prendre en compte tous les types de risque possibles. Le rôle du

modélisateur est de sélectionner les types de risque qui affectent le plus la décision de l'agriculteur. Dans notre cas d'étude la variation des rendements des cultures en fonction des années climatiques et des apports d'eau d'irrigation et la fluctuation des prix des produits agricoles sur les marchés sont les deux sources de risque qui influencent le plus les choix de l'agriculteur.

3.2.2.5 Couplage avec des modèles agronomiques

Dans les modèles de programmation mathématique appliqués à des problèmes de gestion de l'eau agricole, il est important de décrire précisément la relation eau-production. Cette relation est très complexe et cruciale pour décrire correctement la demande en eau. Tenir compte de l'effet des apports en eau sur les rendements peut être intégré dans le modèle de différentes manières : soit en associant à chaque culture plusieurs niveaux d'irrigation, soit par l'incorporation de la fonction de production dans la fonction objectif. La première solution, qui augmente la taille du modèle, est adaptée au modèle linéaire et peut être considérée comme une linéarisation de la relation non linéaire entre l'eau et le rendement. La deuxième solution impose d'avoir une fonction de production concave qui représente des rendements marginaux décroissants. Dans les deux cas, il est souvent nécessaire de recourir à un couplage avec un modèle agronomique, qui permet de simuler la variation des rendements en fonction des différents apports d'eau.

Le couplage de modèles agronomique et économique peut être aussi utilisé pour d'autres finalités comme l'analyse des externalités en terme d'érosion, de pollution...

Dans le reste de cette section nous allons nous intéresser aux modèles de programmation mathématique appliqués aux problèmes de gestion des ressources en eau WPM (Water Programming Models). On évoquera l'utilité de ces modèles et leurs domaines d'application tout en examinant leur adéquation avec notre cas d'étude.

4. USAGE DES MODELES DE PROGRAMMATION MATHEMATIQUE POUR LA GESTION DE L'EAU AGRICOLE

La programmation mathématique est parmi les méthodes les plus utilisées pour évaluer les politiques agricoles en lien avec l'utilisation de l'eau. Les programmes de type linéaire sont les plus répandus. Les différentes applications de la programmation linéaire pour déduire la demande en eau et développer une fonction de production pour l'utilisation de la ressource ont été discutées en détail dans le livre de (Hazell et Norton 1986). Dans les années 1990 la programmation non linéaire s'est aussi développée pour corriger plusieurs lacunes des modèles de programmation linéaire. Dans cette section on exposera les différentes applications des WPM, et les différentes questions de recherche traitées dans la littérature, ce qui nous aidera d'une part à bien reformuler notre question de recherche, d'autre part, cela alimentera notre réflexion sur le type de modèle adapté à notre problématique.

4.1. Traiter les problèmes de pénurie d'eau et les comportements d'adaptation qui en découlent

Les WPM sont bien adaptés au traitement des problèmes de pénurie d'eau causés généralement par la sécheresse, les changements climatiques, les rabattements des nappes et les mesures de réglementation. Ils permettent d'évaluer les adaptations développées et le coût économique face à un manque d'eau. (Dono et al. 2013) ont traité le problème de manque d'eau dans un contexte de coexistence de l'eau de surface et de l'eau souterraine. Ils ont conclu que la variabilité climatique augmente la demande en eau souterraine car les agriculteurs jugent que l'eau de surface ne constitue pas une source pérenne d'approvisionnement dans le futur.

D'autres travaux traitent de la question de la rareté des ressources suite à des réglementations environnementales qui limitent la quantité disponible pour les usagers (Iglesias, Garrido, et Gómez-Ramos 2003). Les modèles sont utilisés dans ce cas-là dans pour simuler l'impact de différents niveaux de restriction sur l'utilisation de la ressource, les assolements et les revenus.

Nous pouvons nous inspirer de ces modèles pour concevoir notre propre modèle. En effet notre système d'étude est caractérisé par la présence de deux sources d'irrigation (collective et privée). Il est aussi marqué par des problèmes de pénurie d'eau liée au rabattement de la nappe.

4.2. Identifier l'effet de la tarification de l'eau sur la demande en eau

La théorie économique encourage l'ajustement du prix de l'eau à sa valeur marginale, ce qui permet une meilleure valorisation de la ressource et en quelque sorte impose une limitation de l'usage de l'eau dans l'exploitation. Dono et al. (2010), (Dono, Giraldo, et Severini 2010), ont développé un modèle hydro-économique qui teste l'effet de deux types de paiement de l'eau : selon le volume consommé et selon la surface irriguée. Ils montrent que la tarification monôme peut induire une utilisation accrue des eaux souterraines.

Les différentes formes de tarification constituent indirectement un moyen pour serrer la contrainte de disponibilité en eau, alors à partir de la simulation de différents niveaux de prix on peut dégager une fonction de demande. Dans notre cas d'étude, la variation du prix de l'eau des GDA ou la variation du prix de l'énergie (coût d'extraction) nous permettra d'estimer la fonction de demande en eau. Cela peut constituer aussi un élément d'éclairage et d'aide à la décision pour l'administration pour concevoir des politiques de prix bien adaptées au contexte kairouannais.

4.3. Evaluation de l'adoption d'une nouvelle technologie

Les WPM peuvent être aussi être utilisés pour évaluer les impacts de l'adoption de quelques technologies. Ces technologies peuvent être une nouvelle technique d'irrigation, de fertilisation, un investissement dans un forage...

Gardner et Young (1988), (Gardner et Young 1988) ont utilisé la programmation linéaire pour évaluer la rentabilité de six techniques d'économie d'eau et de réduction de la salinité. Les modèles qui représentent le comportement d'investissement sont généralement des modèles dynamiques (Carey et Zilberman 2002).

Pour notre cas d'étude nous avons pensé au début à modéliser le comportement d'investissement dans un forage et à analyser l'effet de cette technologie sur la rentabilité économique de l'exploitation et sur la fonction de demande en eau. Cependant, intégrer l'aspect dynamique dans notre modèle était difficile faute de données suffisantes sur les flux de trésorerie et les sources de financement extérieures à l'exploitation.

4.4. Modélisation des marchés d'eau

Dans les cas où il y a des marchés d'eau les WPM sont utilisés pour estimer les gains potentiels d'un tel échange, en simulant la demande en eau des différents agriculteurs ou zones impliquées dans cet échange. Les règles de marché sont définies selon la disponibilité de la ressource, le coût de l'échange et la fonction de demande en eau. Généralement, il existe deux options pour modéliser les marchés d'eau : une méthode classique qui se base sur la modélisation de l'offre et stipule les décisions de production des agriculteurs ; une autre méthode qui simule le marché lui-même. Plusieurs modèles sont développés dans littérature : par exemple, Turner et Perry (Turner et Perry 1997) ont évalué en 1997 l'effet des marchés sur l'adoption des techniques d'économie d'eau. Calatrava et Garrido (Calatrava et Garrido 2005) ont pris en compte l'incertitude dans la modélisation des marchés d'eau en employant la programmation stochastique discrète.

Dans notre zone d'étude, il y a un développement de marché d'eau informel où les échanges d'eau sont associés à des échanges de foncier. Le contexte actuel de la plaine de Kairouan n'est pas adapté à la mise en place de marchés d'eau formels car les agriculteurs ne possèdent pas leur justificatif de propriété de la terre, et l'administration n'est pas en mesure de concevoir la quantité d'eau accordée à chaque agriculteur. Bachta et al. ont simulé en 2004 (Bachta et al. 2004) les effets de la mise en place d'un marché d'eau dans le GDA Mlelsa (qui fait partie de notre zone d'étude), en supposant que le marché d'eau va assurer une meilleure valorisation de la ressource et que les agriculteurs changeront leurs systèmes de culture pour ajuster leur demande en eau aux disponibilités, ce qui devrait conduire à une amélioration de leurs revenus. Ils ont testé deux cas de marché, un marché avec concurrence pure et parfaite et un autre avec la présence d'un monopole. Les résultats montrent que dans le cas du monopole, le marché d'eau entraîne une augmentation du prix de l'eau ce qui a amené les agriculteurs à s'orienter vers les cultures pluviales. La demande en eau diminue mais cela s'accompagne d'une baisse des revenus, qui est interprétée comme le coût social d'installation du marché. Dans le cas de concurrence parfaite, deux catégories d'exploitations sont distinguées : celles dont le coût d'opportunité de l'eau est inférieur au prix d'équilibre établi, qui vendent une partie de leur droit à celles qui valorisent mieux la ressource en eau. Ceci engendre une augmentation des recettes du GDA et une amélioration des revenus des agriculteurs.

4.5. Evaluer l'impact des changements globaux

Dans un contexte très changeant, les WPM peuvent être utilisés pour évaluer l'adaptation des agriculteurs à des changements dans l'environnement économique, réglementaire, biophysique, etc. Ceci se fait dans un cadre de prospective ou pour vérifier quelques hypothèses. Bartolini et al. (Bartolini et al. 2007) ont simulé en 2007 plusieurs scénarios combinés à différents niveaux

de tarification de l'eau pour évaluer l'effet relatif de chaque changement. Graveline et al. (Graveline et al. 2012) ont évalué l'impact des scénarios de changement global sur l'utilisation de l'eau et les impacts de lessivage des nitrates (Graveline 2016).

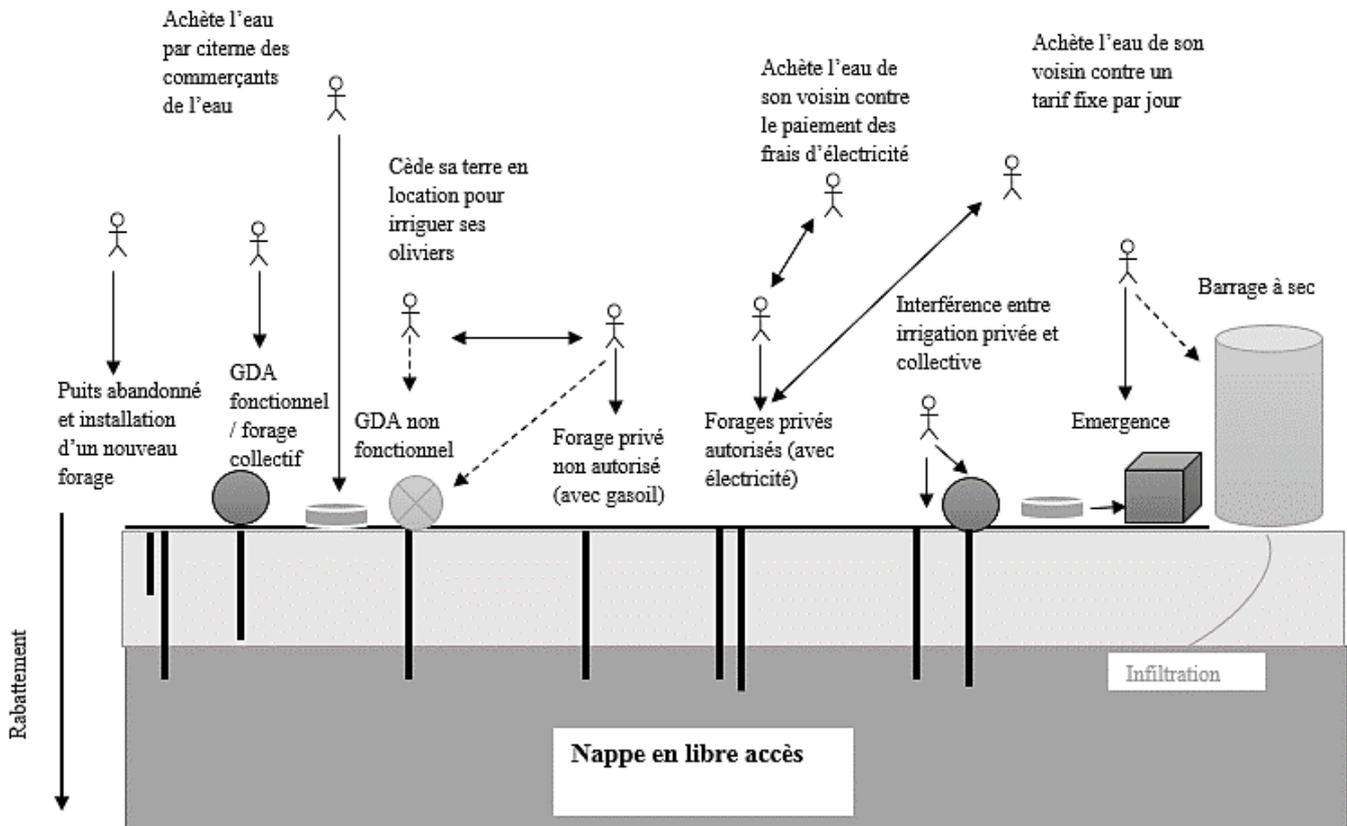
5. REFLEXION SUR LA MODELISATION DU SYSTEME ETUDIE

Après cette revue de littérature sur les différents types d'approches théoriques, de méthodes qui peuvent être mobilisées et de modèles adaptés à la représentation des comportements des agriculteurs, nous allons dans cette partie exposer nos choix de modélisation et justifier les méthodes utilisées. Nous allons commencer tout d'abord par rappeler les caractéristiques du système à modéliser (Figure 2-2) :

Nous sommes face à une zone qui comporte une nappe souterraine en libre accès. L'agriculteur peut irriguer à partir de l'eau du GDA ou du forage ou les deux combinés. Un agriculteur dont les parcelles sont situées dans un périmètre public irrigué peut irriguer soit par l'eau du GDA en payant un tarif fixe par m³ consommé soit en installant son propre forage (irrigation privée). Les forages peuvent être autorisés et fonctionnent avec l'énergie électrique, ou non autorisés et fonctionnent soit à partir de l'électricité domestique soit avec du gasoil. Les forages peuvent être installés dans ou à proximité des PPI et l'agriculteur peut donc associer irrigation privée et irrigation collective. En effet le GDA ne peut pas satisfaire tous les besoins des agriculteurs en toute sécurité (tours d'eau, manque d'eau, coupure ...). On assiste aussi à des interactions entre les agriculteurs et un marché d'eau informel commence à se développer : l'échange d'eau est conjugué avec un échange de foncier. Une partie des agriculteurs bénéficie aussi de l'eau de l'émergence du barrage. Dans ce cas-là, l'agriculteur ne paye que le coût du gasoil pour faire fonctionner son moteur et extraire l'eau dont il a besoin. Enfin, il y a des agriculteurs qui achètent l'eau par citerne à d'autres agriculteurs qui disposent de moyens de pompage et de transport. Ces différentes sources secondaires (émergence, citerne, échanges d'eau...) d'accès à la ressource sont peu représentées dans notre échantillon d'exploitations, et nous avons décidé de ne pas les représenter dans les modèles par manque d'informations détaillées.

L'agriculteur a la possibilité de prendre ou céder des terres en location comme il peut recruter de la main d'œuvre occasionnelle ou permanente.

Figure 2-2 : Représentation schématique du système étudié



Le climat dans la zone est caractérisé par une grande variabilité marquée parfois par une succession d'années sèches. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'effet de cette variabilité climatique sur le rendement. En plus de l'incertitude climatique, l'exploitation agricole se trouve aussi face à un autre type de risque qui est la fluctuation des prix des produits agricoles sur les marchés.

Cette description simplifiée du système montre la diversité des différentes sources d'accès à la ressource et les différents types de risques auxquels l'exploitation fait face (risque de variation des rendements, risque de fluctuation des prix et risque de disponibilité de la ressource en eau des GDA). Pour dépasser la simple analyse descriptive, insuffisante pour se figurer la complexité du système, la modélisation peut constituer un outil d'exploration des liens entre les différents éléments du système ce qui nous permet de mieux comprendre les décisions prises par les agriculteurs. Le modèle sera utilisé par la suite pour la simulation de quelques scénarios de gestion de la demande en eau et ses résultats peuvent en outre constituer un support intéressant pour la réflexion et la discussion entre les acteurs concernés.

Devant la complexité de la réalité et la difficulté d'accès aux données, on se trouve face à un compromis entre des objectifs de réalisme, de précision et de généricité du modèle. On ne peut pas représenter tous les phénomènes et les processus de décision qui se trouvent dans la réalité, il est donc nécessaire de faire un choix selon l'objectif de notre recherche et les facteurs qui influencent le plus les décisions des agriculteurs.

Nous avons décidé de modéliser une seule exploitation typique de la zone (qui représente une situation fréquemment rencontrée dans la plaine en termes de structures d'exploitation et de choix de productions), et d'analyser l'impact des modalités d'accès à la ressource sur la demande en eau et les résultats technico-économiques. Nous proposons de tester trois modes d'accès à l'eau : GDA, forage privé, GDA et forage privé ensemble. Chaque source d'eau correspond à un niveau de confort d'irrigation. Dans cette recherche le modèle doit être capable d'identifier l'effet des différentes modalités d'accès à la ressource sur les choix de cultures et de stratégies d'irrigation des agriculteurs et de comprendre indirectement la motivation derrière l'investissement dans un forage privé. .

Le modèle doit permettre aussi de simuler des interventions sur les déterminants de la demande en eau (simulation du prix de l'eau dans le GDA et prix de l'électricité), 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.

Notre modèle n'est ni un modèle d'optimisation qui vise à optimiser les décisions pour arriver à un objectif déterminé, ni un modèle de prédiction, ni un modèle de gestion opérationnelle de type "que se passe-t-il si". Notre modèle est un modèle exploratoire qui devrait être capable de représenter la diversité des comportements des usagers face à différentes modalités d'accès à l'eau (Frutos et al 2015). Il peut être aussi prospectif puisqu'il permet de comparer plusieurs scénarios possibles (variation du prix de l'eau, du coût de pompage et de l'efficacité du GDA). Il va nous permettre alors d'estimer des fonctions de demande pour chaque modalité d'accès à l'eau.

Le modèle construit est donc un modèle de programmation mathématique linéaire, positif, et statique qui tient compte du risque lié à la variation des rendements et à la fluctuation des prix.

Le modèle est positif car il cherche à représenter les comportements réels des agriculteurs plutôt que de proposer des solutions « optimales ». Il est aussi exploratoire car il cherche à analyser les modalités d'adaptation des agriculteurs face à différents niveaux de disponibilité de la ressource.

Nous avons représenté un modèle annuel où toutes les décisions sont prises dans l'année. Nous avons donc opté pour un modèle statique monopériodique tout en distinguant différentes activités lorsqu'une même culture peut être cultivée et été ou en hiver.

Dans ce modèle on n'a pas présenté le risque sur la disponibilité des ressources en eau. Les sources de risque les plus importantes paraissent être celles liées aux rendements et aux prix. Compte tenu du fait que l'eau souterraine est la principale ressource et que, une fois équipé en forage, il y a peu de risque de manquer d'eau (sauf panne de la pompe), il n'a pas paru utile de représenter le risque sur la ressource. Nous avons donc représenté seulement le risque venant de la variation des rendements et des prix des produits agricoles.

Les raisons pour lesquelles nous avons choisi la PML sont multiples. Tout d'abord elle est moins compliquée que la PMP. Ensuite, dans le cas de la programmation linéaire, si les comportements réels des agriculteurs diffèrent des résultats du modèle, une réflexion sur la

validité des contraintes s'impose, alors que la PMP peut permettre de caler exactement le modèle même si les contraintes sont mal spécifiées, ce qui génère des comportements erronés. Nous avons alors préféré dans ce modèle porter une attention particulière à la collecte des informations pour bien construire les contraintes. Le calage de ce modèle s'est fait en choisissant le coefficient d'aversion au risque qui donnait la meilleure adéquation entre le modèle et la réalité observée. La formalisation détaillée du modèle est présentée dans le Chapitre 5.

La prise en compte du risque de variation des rendements et de fluctuation des prix nécessite des données de prix et de rendement sur plusieurs années climatiques et économiques. Pour les données sur les prix nous avons utilisé la base de données de l'INS (Institut National de Statistique) sur 12 années économiques (de 2005 à 2016). Quant au rendement, pour identifier sa variation en fonction des années climatiques, nous avons utilisé le modèle agronomique CROPWAT (A Computer Program for Irrigation Planning and Management). Nous avons collecté des données climatiques sur l'évapotranspiration et les précipitations, nous avons aussi mobilisé plusieurs travaux bibliographiques pour identifier les coefficients culturaux (K_c), la durée de chaque stade végétatif pour chaque culture ainsi que les données sur les caractéristiques des sols. Nous avons simulé 3 niveaux d'irrigation pour chaque année climatique : une irrigation à l'ETM, une irrigation à 70 % de l'ETM et conduite en pluvial (sauf pour les cultures qui ne sont jamais conduites en sec). Nous avons donc simulé le rendement pour chaque niveau d'irrigation et chaque année climatique (de 2007 à 2013). Dans le modèle économique, l'agriculteur a le choix d'adopter une stratégie ou l'autre selon sa disponibilité en eau. Il est important de comparer les quantités réellement utilisées par l'agriculteur et les doses d'eau calculées par le modèle agronomique pour ajuster les besoins en eau utilisés dans le modèle agronomique. La méthode de calcul de la baisse des rendements pour les différentes années climatiques est donnée en détail dans le Chapitre 5.

6. APPROCHE DE TERRAIN ET COLLECTE DES DONNEES

En fonction des questions de recherche définies précédemment et des concepts qu'elles sous-entendent et en réponse aux exigences de la phase de modélisation, nous avons mobilisé différents outils et méthodes de travail, successivement ou simultanément. Ces outils de travail sont présentés ci-après.

Cette phase a été initiée dès le début de la thèse, elle a consisté à prendre connaissance de la documentation existante et des données déjà acquises, à travers un travail bibliographique et des entretiens avec des personnes ressources de différentes disciplines (économie, hydrologie, sociologie) dans notre laboratoire de recherche. Cela nous a aidé à avoir une vue d'ensemble du sujet à étudier et à aborder le terrain avec un ensemble de connaissances sur la problématique. Nous avons collecté les bases de données déjà constituées dans la même zone d'étude : base de données d'exploitations construite en 2005 par Ahmed Ben Mihoub et Jean Christophe Poussin (Poussin et al. 2008), inventaire des forages privés effectué par un bureau d'étude à la demande de CRDA de Kairouan et données de géo-référencement (équipe IRD) de

la zone, qui ont facilité la construction des cartes. Après ces recherches bibliographiques, nous avons commencé à préparer les guides d'entretien pour commencer la première phase de terrain.

6.1. Elaboration des guides d'entretien et questionnaires

Quelles données collecter pour répondre aux questions de notre recherche ? Nous avons posé cette question au début de chaque phase de terrain. Sur la base des travaux de recherche menés antérieurement sur le terrain d'étude, nous avons pu constituer une idée sur le système à étudier, son environnement, et les processus en jeu. Nous avons aussi consulté des exemples de questionnaire (questionnaire de Feuillette (2001), questionnaire de Ghaleb (2014), et questionnaire de Ben Mihoub (2005)). Cela nous a permis de préparer une version initiale du questionnaire avant de partir sur le terrain, qui a ensuite été testée, modifiée et validée sur le terrain avec les personnes concernées (agents du CRDA, CTV et GDA).

Les premiers entretiens ont été effectués au printemps 2015 auprès des agents du CRDA, CTV et GDA durant une mission de 3 mois. Nous avons d'abord commencé par des entretiens non-directifs. Il s'agit d'entretiens ouverts durant lesquels une discussion est engagée, sans utiliser de support écrit. Ensuite, nous avons utilisé des entretiens semi-directifs. Ceux-ci nous ont permis alors d'approcher et d'étudier les points de vue et les stratégies des acteurs rencontrés ce qu'il est difficile d'appréhender à travers un questionnaire fermé. Chaque acteur a exprimé son point de vue indépendamment des autres, mais il nous a parfois été possible de rassembler différents acteurs et de susciter une interaction qui a révélé la position de chacun vis-à-vis des différents points discutés. Selon (Grawitz 1990), le questionnaire « *doit tenir compte des besoins et réactions des sujets interrogés. Il doit être à leur niveau, les intéresser sans les heurter, créer un climat favorable* ». Les guides d'entretien élaborés intègrent des aspects aussi bien qualitatifs que quantitatifs afin de pouvoir recueillir le maximum d'informations. Dans ce sens nous avons utilisé des questions fermées et d'autres ouvertes en fonction des renseignements que nous cherchions à obtenir. Les entretiens auprès des agents des CRDA, CTV et GDA ont porté sur le fonctionnement administratif de chacune de ces institutions et sur les types de collaboration et d'interactions qui les relient entre elles et avec les agriculteurs (voir ANNEXE 6, ANNEXE 7 et ANNEXE 8). L'entretien avec les GDA a porté également sur leur niveau d'équipement (état du réseau, équipement en compteurs...), la façon d'organiser les tours d'eau et leur situation financière (niveau de dette envers la STEG : Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz, solde bancaire, dettes des agriculteurs...). Quant à l'entretien avec les agriculteurs, il était basé sur la présentation générale de l'exploitation et la perception des irrigants dans les PPI et en cas de captage privé de la ressource (voir ANNEXE 9).

Au cours de la deuxième phase de terrain (7 mois : de janvier à juillet 2016), nous avons construit et mis en œuvre les deux questionnaires typologiques et technicoéconomiques. Le premier visait à collecter des informations générales sur l'exploitation, sa superficie, son niveau d'équipement, l'orientation globale de production mais aussi son évolution passée et les principaux événements qui ont marqué son histoire. Il nous a permis de cerner la diversité des situations existantes. En parallèle à ce questionnaire nous avons effectué des entretiens avec les Omdas (représentants de l'Etat à l'échelle de l'Imada ou secteur, qui sont les plus petites unités

administratives en Tunisie), qui nous ont permis de construire un inventaire des exploitations qui couvre toute la zone d'étude. Le deuxième questionnaire (voir ANNEXE 10) est plus détaillé, et visait à collecter les données nécessaires pour la phase de modélisation (assolements des 3 dernières campagnes, calendrier cultural, calendrier d'irrigation et de main d'œuvre ...). Nous avons également pu recueillir des références technico-économiques régionales élaborées par un bureau d'étude (PDAI, conseil-assistance technique) commissionné par le CRDA sur les cultures les plus cultivées dans la plaine. Nous allons dans les parties suivantes décrire en détail chaque étape de collecte des données.

6.2. L'enquête auprès des GDA

L'enquête auprès des GDA réalisée au printemps 2015 a comporté deux étapes. Au cours de la première étape exploratoire, des entretiens ont été conduits avec des agents du CRDA et des CTV afin de recueillir des informations sur les spécificités de la zone, les ressources en eau disponibles et les problèmes de gestion qui entravent le fonctionnement des GDA et des exploitations agricoles. Quelques visites de terrain auprès de membres des GDA ont également été organisées afin de mieux appréhender la diversité des situations locales.

La seconde étape a consisté en des entretiens individuels détaillés auprès des directeurs techniques, des présidents et des pompistes de chacun des 22 GDA recensés sur la zone d'étude.

Nous avons ainsi recueilli des informations sur le fonctionnement et l'organisation des GDA permettant de caractériser la situation dans chaque périmètre, de recueillir les avis des acteurs sur les performances des GDA et d'en réaliser une typologie. Dans le cas des GDA qui n'étaient plus fonctionnels au moment de l'enquête, les entretiens ont été réalisés auprès d'anciens membres pour identifier les raisons qui ont abouti à la situation actuelle et recueillir leurs suggestions quant aux conditions nécessaires à leur remise en fonctionnement.

Le nombre de GDA enquêtés étant trop faible pour faire l'objet d'une analyse statistique, nous avons choisi d'illustrer la diversité des situations observées au travers de quelques exemples (voir les résultats de l'analyse dans le Chapitre 3).

6.3. L'inventaire des exploitations

En 2005, dans le cadre du projet MERGUSIE, l'IRD a réalisé un inventaire des exploitations agricoles dans la partie du bassin-versant du Merguellil située à l'aval du barrage d'El Houwareb (Poussin, Ben Mihoub, et Beji 2008). Ils se sont basés sur le découpage administratif de la plaine en Imadas, ce qui permettait de comparer avec les données statistiques sectorielles du CRDA. L'inventaire des exploitations a été effectué avec l'aide des Omdas. Chaque Omda a fourni les données sur les exploitations de son Imada. Pour chaque exploitation, ils ont donné le nom de l'exploitant, la taille de son exploitation et l'orientation de sa production au moyen d'un score (absence, un peu, beaucoup) pour chacune des 5 principales activités de production : exploitation d'oliviers, céréaliculture, maraîchage, arboriculture fruitière et élevage. Maraîchage et arboriculture ont été considérés comme des productions irriguées alors que les trois autres activités peuvent être conduites en pluvial.

Suivant la même méthode, nous avons renouvelé cet inventaire sur la même zone d'étude en 2016. Les Omdas ont pu fournir des informations complémentaires par rapport à celles de 2005 : en plus de la superficie et de l'orientation de la production, des données sur le mode de faire-valoir de l'exploitation (en propriété ou en location), l'existence d'un revenu non agricole et le mode d'accès à l'eau (périmètre public irrigué, puits ou forage privé) ont été aussi recueillies. Concernant l'orientation de la production, il n'a pas été possible de collecter la superficie de chaque culture, seule la présence ou l'absence des cinq principales productions a été recueillie.

Une série d'analyses des correspondances multiples a été effectuée sur les données d'inventaire aux deux dates, suivies d'une classification automatique des exploitations. Pour l'inventaire de 2005, seules les 5 variables donnant l'orientation de production ont été retenues, la superficie étant prise en compte ultérieurement pour subdiviser les classes présentant une forte variation de superficie intra-classe.

Pour l'inventaire de 2016, 7 variables ont été utilisées : les 5 variables décrivant l'orientation de production, la superficie répartie en 3 classes de taille (inférieure à 2 ha, de 2 à moins de 5 ha, 5 ha et plus), et le mode d'accès à l'eau (puits ou forage, PPI, non irrigué). Après plusieurs classifications automatiques utilisant des sous-ensembles différents de ces 7 variables et des codages alternatifs des modalités, la classification finalement retenue a été réalisée manuellement en s'appuyant sur le mode d'accès à l'eau et l'orientation de production (principalement arboriculture, maraîchage, céréales). La superficie et la présence d'élevage ont été utilisées seulement pour discriminer les exploitations non irriguées. Le choix de ces variables a été guidé par les résultats des analyses de données multivariées. Le statut foncier n'a finalement pas été pris en compte car cette variable s'est révélée peu discriminante (la majorité des exploitants étant classées comme propriétaires par les Omdas¹⁰ (Morardet et al. 2017). Les résultats de ces analyses sont présentés dans le Chapitre 4.

6.4. L'enquête auprès des exploitations

En 2005, une enquête a été réalisée par Ben Mihoub et Poussin sur un échantillon de 150 exploitations tirées au hasard dans chaque classe identifiée à partir des données d'inventaire (taux d'échantillonnage d'environ 10%). L'enquête a concerné toutes les activités de production de l'exploitation : taille de l'activité en surface ou en effectif, consommations, notamment en eau d'irrigation et en travail avec leur répartition dans l'année, productions dégagées et prix de vente. Les puits ou forages utilisés ainsi que les matériels disponibles ont également été recensés. Ces enquêtes ont permis de dégager les divers modes de conduite des principales cultures et de construire ainsi une typologie des ateliers de productions végétales.

Afin de mettre à jour la typologie d'exploitations, une nouvelle enquête technico-économique a été conduite en 2016 auprès d'un échantillon de 126 exploitations. L'inventaire n'étant pas encore terminé au moment de l'enquête il n'a pas été possible de tirer l'échantillon au hasard.

¹⁰Nous avons été surpris par le très faible nombre de locataires identifiés par les Omdas, alors qu'une enquête directe réalisée en 2014, certes auprès d'un plus petit échantillon, dans les secteurs de Chebika et Sidi Ali Ben Salem a montré que ce mode de faire-valoir est assez répandu dans la plaine (Ghileb, 2014 ; Amichi et al., 2016). Nous pouvons donc nous interroger sur la fiabilité de cette donnée recueillie ainsi de façon indirecte, les Omdas n'étant pas nécessairement bien informés des arrangements fonciers existants.

Nous avons donc sélectionné des exploitations dans l'échantillon enquêté en 2005, réparties sur l'ensemble de la zone d'étude et complété avec de nouvelles exploitations permettant d'identifier les nouveaux types apparus en 10 ans. L'échantillon a été construit de façon à représenter au mieux la diversité des systèmes de production existants. Dans le choix des agriculteurs à enquêter, nous avons essayé d'éviter d'enquêter des agriculteurs qui se connaissent entre eux et nous avons cherché à rencontrer les agriculteurs dans leurs parcelles d'une part pour faciliter la communication et d'autre part pour croiser leurs affirmations avec les observations de terrain.

L'enquête a porté sur i) l'histoire de l'exploitation, ii) les structures actuelles de production (superficies, modes de faire-valoir, équipement, notamment équipement d'irrigation, main d'œuvre), iii) le système de production (cultures pratiquées, élevages présents), iv) la destination des productions (auto-consommation, vente), v) le financement (revenus non agricoles, crédit, épargne), vi) l'organisation technique de l'irrigation, et vii) les contraintes, notamment celles liées à l'eau, et les projets de l'agriculteur.

Après cette phase de collecte des données nous avons entamé une longue étape de saisie sur une base Access : les données ont été organisées par tables, chaque table correspond à un thème. Entre les tables nous avons construit des requêtes, pour pouvoir générer des calculs intermédiaires automatiquement.

Ensuite nous avons effectué une série d'analyse multivariées pour construire la typologie des exploitations pour la campagne 2015-2016. Cette typologie est basée sur des variables de structure liées surtout au potentiel d'irrigation dans les exploitations (superficie irriguée, superficie équipée en goutte-à-goutte) et aux modalités d'accès à la ressource. Ceci est complété par des variables d'assolement indiquant la superficie de chaque système de culture. Pour pouvoir comparer les deux typologies et analyser les trajectoires d'évolution des exploitations communes (69 exploitations), nous avons construit une nouvelle typologie à partir des données de 2005 en mobilisant les mêmes variables que celles utilisées dans la typologie de 2015. Cela nous a facilité la comparaison et nous a aidé à bien visualiser les différentes évolutions qui ont eu lieu dans chaque type d'exploitation. Les différentes analyses et méthodes utilisées pour décrire la diversité des exploitations aux deux dates et l'analyse des trajectoires d'évolution sont expliquées plus en détail dans le Chapitre 5.

6.5. Recueil de références technico-économiques sur les différentes cultures

Après la réalisation des enquêtes en exploitation nous avons pu identifier des personnes ressources spécialisées dans différents types de cultures. Nous avons ainsi élaboré une fiche technicoéconomique par type de culture (céréale, maraîchage, arboriculture) et selon différentes pratiques (cultures de saison et d'arrière-saison, sous tunnel, sous paillage...). Nous avons calé les fiches technicoéconomiques en discutant avec le vulgarisateur de la zone et en nous basant aussi, en ce qui concerne l'arboriculture, sur des référentiels réalisés en 2010 dans la plaine de Kairouan par un bureau d'étude à la demande de CRDA. Ces références ont été utilisées par la suite dans la phase de modélisation.

6.6. Conditions de réalisation de l'étude

Tout au long des phases de terrain nous avons réussi à construire de bonnes relations avec les personnels des différentes institutions impliquées directement ou indirectement dans la gestion de l'eau (CRDA, CTV, GDA...). Nous avons aussi établi des relations de confiance avec les agriculteurs qui ont beaucoup facilité l'accès à l'information. Cependant, nous avons aussi rencontré plusieurs difficultés, la plus gênante étant les déplacements sur le terrain. En effet étant donnée la taille de notre zone d'étude et la dispersion des exploitations dans l'espace, il n'était pas possible de se déplacer à pied, le recours à un moyen de transport était nécessaire pour mener nos enquêtes. Au début, nous avons programmé des sorties avec les agents du CRDA et de la CTV. Cette solution présentait plusieurs limitations : d'abord elle a beaucoup retardé la réalisation des enquêtes à cause de changements fréquents des destinations et des programmes de sortie des agents ; ensuite, les techniciens avaient tendance à nous orienter dans le choix des agriculteurs à enquêter vers ceux qu'ils connaissent le mieux ; enfin leur présence lors des entretiens pouvait influencer les réponses des agriculteurs. Nous avons décidé en conséquence de louer une voiture et de nous déplacer avec les agriculteurs. La deuxième contrainte qui a affecté le déroulement des enquêtes était la faible disponibilité en temps des agriculteurs à la période d'enquête (printemps 2016) pour répondre à toutes nos questions ce qui nous a obligé à échelonner le déroulement de l'enquête sur plusieurs visites. Ce dernier point peut être avantageux dans la mesure où la multiplication des visites facilite la création d'une relation de confiance avec les agriculteurs et permet ainsi d'accéder à des informations qu'ils ne délivreraient pas dès la première rencontre.

7. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons décrit la méthodologie générale et les approches théoriques et empiriques mobilisées pour répondre aux objectifs de cette recherche. Les détails de chaque méthode utilisée, les hypothèses, la formalisation des équations du modèle et la définition des différents paramètres seront détaillés dans les chapitres correspondants.

Ce travail s'est basé sur une collecte importante de données de terrain qui a été organisée sur plusieurs phases afin d'explorer les différentes composantes du système et les liens d'interaction entre eux. Dans le recueil des données nous avons respecté les conditions d'objectivité tout en gardant une vision critique qui alimentera après nos discussions. Les entretiens et questionnaires ont été réalisés auprès des différents acteurs impliqués dans la gestion ou l'usage de la ressource (CRDA, GDA, CTV, agriculteurs).

Les données collectées ont été organisées sous la forme de bases de données Excel et Access, ce qui a facilité après leur traitement et la réalisation des différentes analyses statistiques. Ces bases de données ont été aussi mobilisées par d'autres chercheurs dans notre laboratoire dans un cadre de continuité et de complémentarité de la recherche.

La construction d'un inventaire des exploitations nous a permis d'analyser les dynamiques globales du système et de comparer la situation actuelle des exploitations avec des situations

antérieures. Il a été aussi mobilisé pour estimer grossièrement la consommation globale en eau d'irrigation à l'échelle de toute la zone.

La base de données sur les GDA et les différents entretiens nous ont permis d'évaluer la performance de la gestion des GDA (entités de gestion mises en cause actuellement à l'échelle nationale) et nous a donné un peu d'éclairage sur les causes et conséquences de l'expansion des forages privés.

Les enquêtes en exploitations, quant à elles, ont été valorisées pour identifier la diversité des situations existantes dans la zone (construction de la typologie des exploitations) mais aussi pour l'analyse des trajectoires d'évolution des exploitations et les mécanismes responsables des évolutions observées. Les différentes données collectées ont permis d'alimenter notre réflexion sur les comportements à représenter dans la phase de modélisation. Nous avons aussi élaboré des fiches technicoéconomiques à partir des enquêtes référentielles réalisées auprès des agriculteurs et du vulgarisateur de la zone. Ces fiches constituent des inputs du modèle microéconomique.

Le choix du type de modèle tient compte des principaux comportements observés, des méthodes les plus adaptées à la nature de la zone et à la disponibilité des données. Le modèle choisi est un modèle de programmation mathématique linéaire, positif, statique qui tient compte du risque de variation des rendements et de fluctuation des prix. Il est couplé à un modèle agronomique qui sert à simuler la baisse de rendement en fonction des conditions climatiques et des apports en eau d'irrigation.

Notre approche méthodologique a déjà été éprouvée dans des travaux antérieurs et elle est bien adaptée à la problématique présentée dans le chapitre précédent. Elle permet de tracer un fil directeur logique entre les différentes parties qui constituent ce travail de recherche.

CHAPITRE 3

L'expansion des forages agricoles illicites : cause ou conséquence de la dégradation de l'accès collectif à l'eau ?

Communication acceptée sous forme d'article aux Journées de Recherches en Sciences Sociales -10es JRSS 2016, la Société Française d'Economie Rurale, Paris, 8 et 9 décembre 2016

Amal Azizi, Sylvie Morardet**, Marielle Montginoul**, Jean-Louis Fusillier**

(Cirad, Umr G-Eau, Montpellier, France / ** Irstea, Umr G-Eau, Montpellier, France)*

1. INTRODUCTION

Le développement de l'agriculture irriguée a été promu dans de nombreux pays, développés ou en développement, dans des objectifs de développement économique et d'indépendance alimentaire. Cela a été ainsi le cas en Tunisie. Dès les années 1970, la politique publique tunisienne l'a soutenu (Ministère de l'Agriculture, 1997), poursuivant par là un double objectif : l'amélioration de la sécurité alimentaire au niveau national et le soutien des revenus des petits agriculteurs dans des régions rurales souvent démunies. Cette agriculture a pu ainsi jouer le rôle de moteur du développement régional et a permis la restructuration de l'espace rural par la diversification des activités économiques qui y sont menées.

Le secteur agricole est en effet économiquement important pour ce pays : sa contribution au PIB atteint 15% en 2014. Et le secteur irrigué, même s'il ne représente que 8% de la superficie agricole utile (SAU), participe à hauteur de 35% à la valeur totale de la production agricole, à 20% de la valeur des exportations agricoles et à 20% de la création d'emplois agricole. L'irrigation est donc considérée comme un impératif pour le développement de l'agriculture dans un pays semi-aride.

Les autorités tunisiennes ont ainsi très tôt développé des périmètres publics irrigués (PPI) permettant un accès collectif à l'eau et les ont confié ultérieurement à des associations d'usagers (les GDA). Deux présupposés sous-tendaient ce choix : un tel accès favorise le développement économique de l'agriculture mais aussi aide à contrôler l'exploitation des ressources en eau, notamment souterraines, particulièrement précieuses car en quantité limitée et sujettes à surexploitation dans cette rive sud de la méditerranée.

Mais on constate que, dans de nombreux cas, ces associations ne fonctionnent pas correctement, avec des performances relativement médiocres, et qu'il y a un développement anarchique des forages privés. L'objet de ce chapitre est d'interroger le lien entre ces deux phénomènes, en cherchant à savoir si l'expansion des forages agricoles illicites est une cause ou une conséquence de la dégradation de l'accès à l'eau collectif. Il sera illustré par le cas d'une zone située sur l'aquifère de Kairouan en Tunisie centrale.

La première partie présente la méthodologie adoptée et le cas d'étude. La deuxième dresse l'historique de l'accès à l'eau collectif et décrit les modalités d'accès dans la zone d'étude. La troisième pose un diagnostic sur la santé des différentes associations d'usagers qui ont été interrogées. La quatrième discute la relation entre cette dernière et le développement anarchique des forages individuels et présente les conséquences au niveau collectif qu'elle engendre. Le chapitre conclut sur les difficultés à concilier les différents objectifs sous-jacents à toute démarche de développement durable.

2. METHODOLOGIE ET CAS D'ETUDE

2.1. Cas d'étude

22 périmètres publics irrigués situés sur l'aquifère de Kairouan, en Tunisie centrale ont été étudiés. Ils représentent 27% de la superficie totale des périmètres publics irrigués du gouvernorat de Kairouan et 29% de la superficie agricole de la plaine.

Tous gérés par des GDA, ils couvrent une superficie totale de 4 562 ha avec 648,5 ha d'extension. Ces extensions -non officielles- sont irriguées à partir des infrastructures des GDA, par décision individuelle des agriculteurs et par autorisation tacite des membres des GDA.

2.2. La démarche adoptée

L'étude a débuté par une analyse historique de l'accès à l'eau d'irrigation. Une phase sur le terrain a également alimenté la réflexion, initiée au printemps 2015. Cette dernière a comporté deux étapes. Dans la première étape exploratoire, nous avons rencontré des acteurs institutionnels (les agents du CRDA et des CTV-Cellule territoriale de vulgarisation) en vue de mieux apprécier les spécificités de la zone, les ressources en eau disponibles et les problèmes de gestion qui entravent le fonctionnement des GDA et des exploitations agricoles. Nous avons également choisi de parcourir le terrain à la rencontre de membres des GDA, dans plusieurs occasions. L'objectif était double : avoir une meilleure identification des situations locales rencontrées et gagner la confiance des acteurs locaux.

La seconde étape a consisté à effectuer des entretiens individuels détaillés auprès des directeurs techniques, des présidents et des pompistes de chaque GDA. Nous avons ainsi recueilli des informations sur leur fonctionnement et leur organisation permettant de caractériser la situation dans chaque périmètre, de recueillir les avis des acteurs sur les indicateurs de performance qu'il est important de considérer pour les évaluer et d'en réaliser une typologie. Certains GDA n'étaient plus fonctionnels au moment de cette phase de terrain. Nous nous sommes efforcés dans ces cas-là de contacter les anciens membres pour identifier les raisons qui ont abouti à cette situation.

Les données collectées ont été saisies dans une base des données comportant plusieurs variables quantitatives et qualitatives caractérisant les 22 GDA. Dans un premier temps, nous avons sélectionné les variables les plus pertinentes aux yeux des acteurs en vue de permettre une différenciation des GDA (construction des groupes définis a priori) et d'établir une grille de performance. Une note de 1 à 3 a été accordée à chaque variable et à chaque groupement en se référant à des seuils définis en fonction de la distribution des observations. L'addition des différentes notes a permis de donner un score total aux GDA et donc d'ordonner ces derniers selon leur niveau de performance. Cette grille de performance est construite avec les acteurs car ce sont eux qui connaissent les caractéristiques spécifiques à leur situation. Ainsi les variables de différenciation ont été sélectionnées en fonction de leurs déclarations.

Les variables qui ont servi à la discrimination sont : la situation financière actuelle des GDA (sain, en difficulté, non fonctionnel), les dettes d'électricité rapportées à la superficie officielle

du périmètre irrigué, le solde bancaire rapporté à la superficie officielle, les dettes en eau des agriculteurs (auprès du GDA) et le volume d'eau distribué rapporté à la superficie officielle.

Afin d'approfondir notre analyse et d'expliquer les écarts de performance observés, nous avons ensuite effectué une analyse qualitative en décrivant l'expérience de quelques GDA représentatifs de la diversité des situations existantes. Nous avons explicité les facteurs qui ont abouti à leur situation actuelle, les points de blocage qui entravent la gestion de l'eau dans ces groupements et les conséquences qui en ont résulté spécifiquement pour le fonctionnement de chaque GDA et généralement sur la ressource en eau dans ce territoire irrigué.

Au cours des entretiens avec les membres des GDA, nous avons enfin recueilli leurs avis sur les pistes de relance de ces entités de gestion et leurs recommandations pour assurer leur durabilité et la préservation de la ressource souterraine.

3. LA PROMOTION DES ASSOCIATIONS D'USAGERS EN TUNISIE POUR FAVORISER LE DEVELOPPEMENT AGRICOLE : HISTORIQUE ET ETAT DES LIEUX SUR L'AQUIFERE DE KAIROUAN

3.1. L'accès collectif à l'eau d'irrigation en Tunisie : historique

L'accès collectif à l'eau n'est pas une invention moderne : la gestion communautaire des eaux, notamment souterraines, est une tradition ancestrale qui remonte au XIII^{ème} siècle. Elle a subi plusieurs modifications au cours de l'histoire du pays. L'eau était considérée comme un don de Dieu ; elle était une propriété individuelle et indépendante de la terre. Après la colonisation française en Tunisie (1881), l'administration du protectorat est intervenue pour organiser le secteur de l'eau, poussée par une logique modernisatrice. La domanialité publique a été instituée par l'administration coloniale à partir de 1885 en Tunisie centrale, pour inciter à la gestion collective des projets d'épandage des eaux de crue dans le cadre de « syndicats d'arrosage » (Mouri et Marlet, 2006). Le premier syndicat d'arrosage est créé à ZarZis en 1896. Ces associations se sont ensuite multipliées avec les associations syndicales de propriétaires des oasis créées entre 1912 et 1920 en vue de gérer les eaux souterraines fossiles du Sud, puis les associations spéciales d'intérêt hydraulique (ASIH) instituées en 1933 dont les attributions s'apparentaient déjà à celles des associations d'intérêt collectif (AIC), lesquelles ont fait leur apparition en 1936. Les textes réglementaires y afférents avaient unifié à cette date toutes les associations existantes. Le Code des Eaux de 1975 a entériné, en fait, le modèle des AIC de 1936.

Pour accompagner la phase de mobilisation des ressources en eau, le Code des Eaux a confié la gestion du Domaine Public Hydraulique (DPH)¹¹ au Ministère de l'Agriculture¹². Ce dernier a encouragé le développement des périmètres publics irrigués pour assurer le développement des

¹¹ Il regroupe les eaux de surface, les eaux souterraines ainsi que les ouvrages qui servent à leur exploitation et utilisation.

¹² Le Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques (MARH) est l'autorité de tutelle organisant les différentes structures chargées de la gestion de l'eau.

territoires ruraux en l'absence d'autres activités économiques et pour répondre à une demande en croissance de production agricole. Pour cela, treize offices de mise en valeur agricole (OMIVA) ont été créés entre 1958 et 1980, remplacés en 1991 par les Commissariats régionaux au développement agricole (CRDA)¹³. La gestion des PPI a alors été confiée soit au CRDA soit aux AIC selon la complexité et l'importance de l'aménagement.

Le contexte socio-politique des années 1980 en Tunisie, et notamment le programme d'ajustement structurel (1986) visant au désengagement progressif de l'Etat, a été favorable à la décentralisation et à la promotion de la gestion autonome des ressources naturelles au moyen d'une participation plus active des groupements locaux. On espérait que les populations rurales, en prenant en main leurs propres affaires, seraient plus motivées pour protéger les ressources et les équipements publics, et éviter les gaspillages qui accompagnent souvent l'utilisation des biens communs et des services publics.

Les AIC sont devenues au début des années 2000 des groupements d'intérêt collectif (GIC) sous contrat avec les CRDA, puis des groupements de développement agricole (GDA) à la fin 2007. Les AIC étaient contrôlées à l'échelle régionale par un groupement d'intérêt hydraulique (GIH) installé dans chaque gouvernorat et présidé par le gouverneur. Ce GIH a été remplacé en 2005 par la Commission Consultative des Organismes Professionnels dans le secteur de l'agriculture et de la pêche, qui assure la planification, la coordination, la supervision et le contrôle, ainsi que l'encadrement et le renforcement des capacités, pour tous les aspects de la gestion de l'eau.

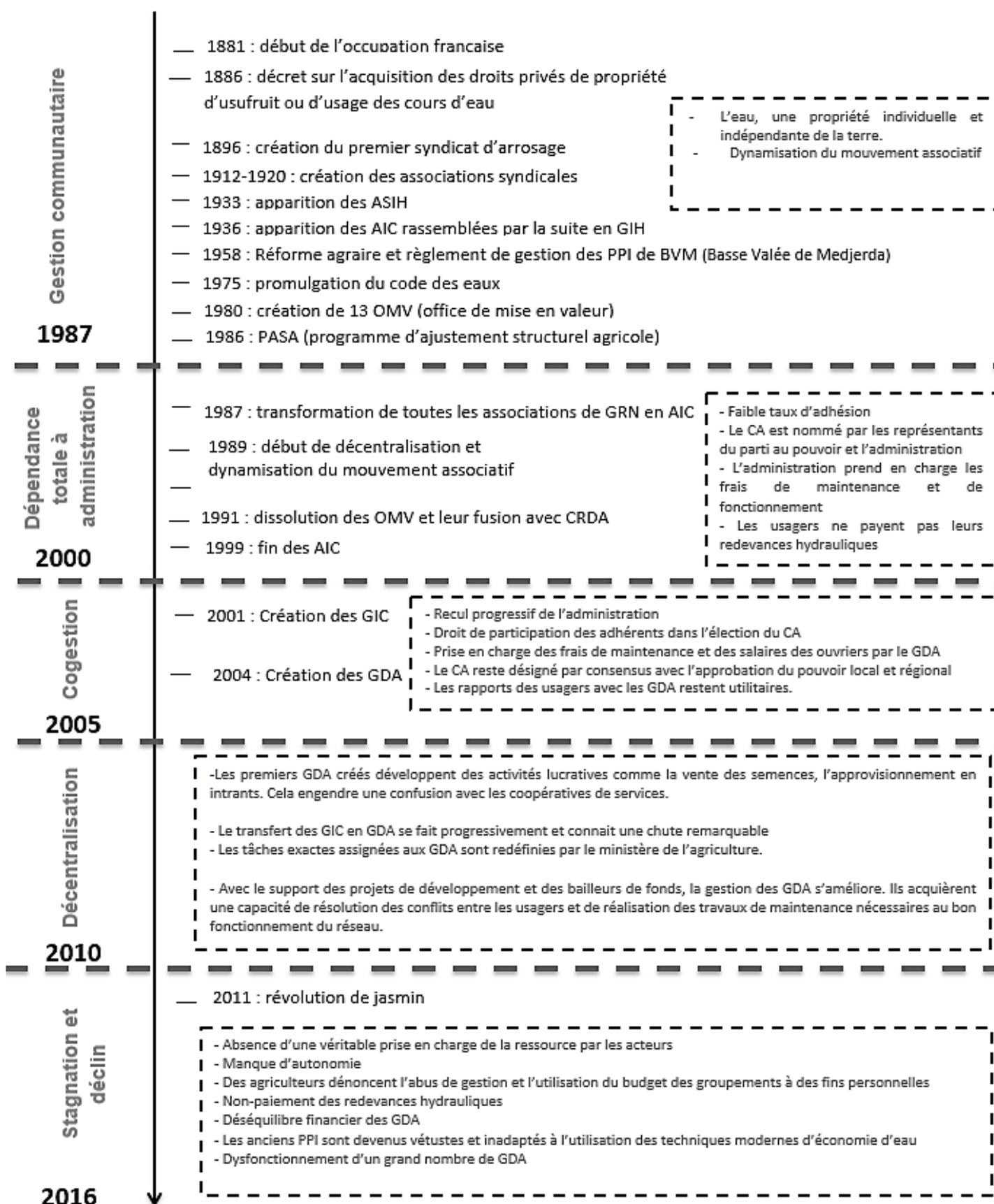
Les GDA sont aujourd'hui placés sous la tutelle des CRDA, chargés des fonctions d'appui et de contrôle. Ils sont liés aux CRDA par un « contrat de gérance » portant sur les équipements qui leur sont remis, et signent avec les usagers des « contrats d'abonnement » aux formes variables (paiements au volume, à la durée, ...). Ils délivrent de l'eau à leurs adhérents, et parfois aussi à des agriculteurs abonnés mais non-adhérents (qui achètent de l'eau au GDA mais ne lui payent pas de cotisation annuelle).

Les acteurs impliqués au quotidien dans la gestion du GDA sont le conseil d'administration (CA), théoriquement élu par les adhérents (bénéficiaires qui payent leur tarif d'adhésion) et un personnel technique composé d'agents salariés chargé de la gestion technique (ouverture et fermeture des vannes) et financière (facturation des redevances hydrauliques) : le directeur technique (DT) et un pompiste.

La Figure 3-1 résume les quatre grandes phases de mise en place des associations d'usagers, identifiées par Mouri et Marlet (2006), ainsi que les tâches qui leur ont été attribuées dans chacune de ces phases.

¹³ Les CRDA sont des établissements publics qui représentent localement les services de l'administration centrale dans chaque gouvernorat.

Figure 3-1 : Evolution de la gestion institutionnelle de l'irrigation en Tunisie



3.2. L'accès collectif à l'eau d'irrigation : état des lieux sur l'aquifère de Kairouan

L'accès collectif à l'eau d'irrigation permis par l'un des 22 GDA créés à cet effet concerne uniquement une partie de la zone d'étude : ainsi, l'irrigation dans les secteurs d'Abida et d'Ouled Khalfalah est assurée en totalité par des forages privés. L'irrigation collective est localisée surtout dans les secteurs de Karma, Chebika, Ben Salem et Hammad. Le secteur de Karma regroupe à lui seul 8 PPI. Au total, 50 % des agriculteurs de la plaine (4204 exploitations) sont bénéficiaires du service des GDA.

Les GDA sont alimentés par des forages publics, à l'exception des GDA Houwareb 1, 2 et 3, situés à proximité du barrage d'El Houwareb, qui s'alimentent directement à partir du barrage. Cependant la conjonction de périodes de sécheresse et d'une forte demande en eau a conduit à un épuisement des quantités d'eau stockées dans le barrage. Pour surmonter le déficit hydrique et sauvegarder l'infrastructure installée au niveau de ces périmètres, l'Etat a créé 6 forages pour renforcer l'irrigation en cas de baisse de niveau d'eau dans le barrage. Mais, le débit de ces forages reste insuffisant pour subvenir aux besoins des irrigants.

La totalité des GDA sont équipés de réseaux de distribution sous pression acheminant l'eau du forage vers un château d'eau ou une citerne puis vers des bornes d'irrigation desservant des superficies n'excédant pas quelques hectares. Cette situation est représentative des évolutions constatées en Tunisie où l'Etat a fortement investi dans la modernisation des infrastructures hydrauliques.

Les caractéristiques générales de ces périmètres sont résumées dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Identification et caractéristiques générales des PPI par secteur

Secteur	PPI	Superficie officielle	Extensions		Exploitations	Bénéficiaires des GDA	
		ha	ha	%	-	-	%
Chebika	Chebika Est, Chebika Ouest, Ajifre, Henchir Jefna	863	310.0	36%	1211	607	50%
Ben salem	Sidi Ali Ben Salem 2, Sidi Ali Ben Salem 3, El wsif, Mlelsa	536	191.5	36%	538	157	29%
Karma	Karma 1, Karma 2, Wled Nacer, Henchir El Borj, Houwareb1, Houwareb 2, Houwareb 3, Chwarbia, Bled Sbita	2689	97.0	4%	922	1071	116% ⁽¹⁾
Hammad	Draa Affen, Sidi Ali Ben Salem 1, Mjabra, Henchir Bouali	434	50.0	12%	767	240	31%
Houffia	Houffia	40	0.0	0%	143	10	7%
Abida	-	0	0.0	0%	517	0	0%
Ouled Khalfalah	-	0	0.0	0%	106	0	0%
Total	-	4562	648.5	14%	4204	2085	50%

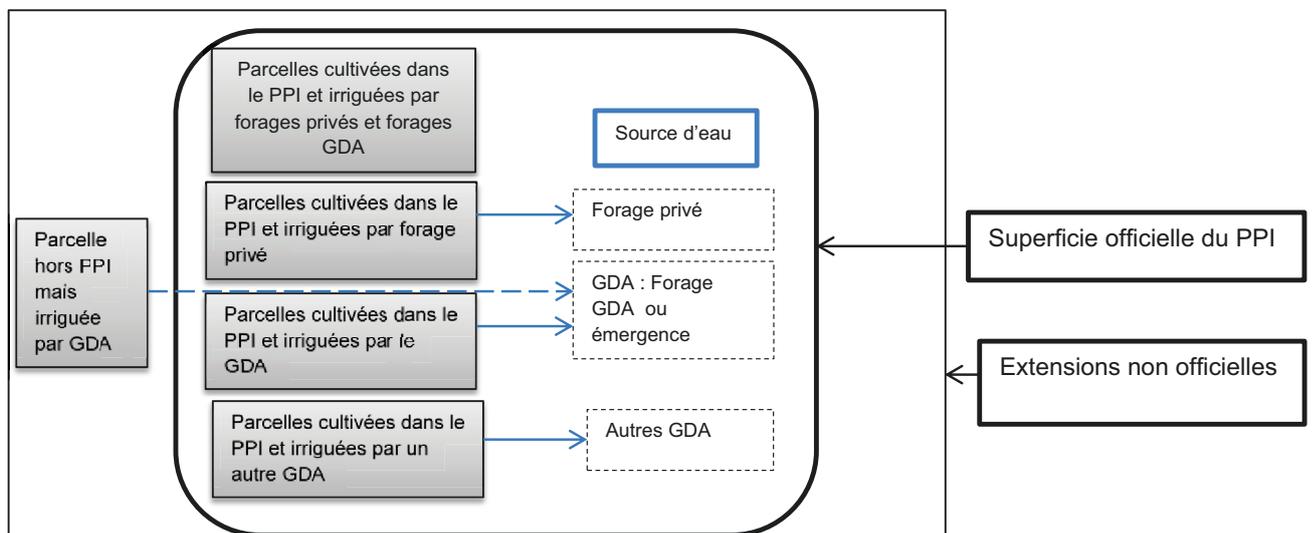
Source : GDA, 2015 et inventaire des exploitations 2015

Note :

(1) Pour une seule exploitation on peut trouver plusieurs bénéficiaires de GDA (cas des héritiers)

Les modalités d'accès à l'eau des parcelles sont ainsi multiples. La Figure 3-2 résume les configurations possibles.

Figure 3-2 : Système étudié



Il est ainsi important de bien définir les composantes du système étudié, qui sont les suivantes :

- Superficie officielle : superficie du périmètre public irrigué.
- Superficie développée irriguée par le GDA : superficie cultivée en comptant les doubles cycles, y compris les superficies cultivées hors PPI, c'est-à-dire les extensions et les superficies irriguées par le GDA.
- Superficie développée irriguée par les forages privés : superficie cultivée irriguée par les forages privés en comptant les doubles cycles.
- Superficie irriguée des GDA : superficie cultivée sans compter les cultures intercalaires (y compris les superficies irriguées hors PPI et les superficies irriguées pour un autre GDA).
- Superficie irriguée par les forages privés : superficie cultivée sans compter les cultures intercalaires et qui est irriguée par les forages privés.
- Taux d'intensification : ratio de la superficie développée par les GDA sur la somme de la superficie officielle et des extensions.

Enfin, signalons que ces GDA se situent dans des endroits très variés en termes de dynamiques agricoles (Chapitre 4, section 4.1.2).

4. L'ACCES COLLECTIF A L'EAU. BILAN DE LA SANTE DES GDA

Il est possible de distinguer trois types de GDA : certains sont performants, d'autres en difficulté, d'autres enfin non fonctionnels. Cette partie cherche à mieux comprendre ces différents états, à travers la construction d'une grille d'analyse permettant de typologier ainsi les GDA et en décrivant de manière qualitative trois d'entre eux, qui peuvent être considérés comme des cas typiques de ces trois catégories.

4.1. Construction d'une grille d'analyse et typologie des GDA

Les performances des GDA peuvent être mesurées à partir de quatre variables, si l'on se réfère aux avis mêmes des acteurs : l'endettement des GDA vis-à-vis de la compagnie d'électricité et de l'administration, l'endettement des agriculteurs vis-à-vis du GDA, les volumes d'eau distribués et le solde bancaire.

4.1.1 Endettement des GDA vis-à-vis de la STEG (Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz) et de l'administration

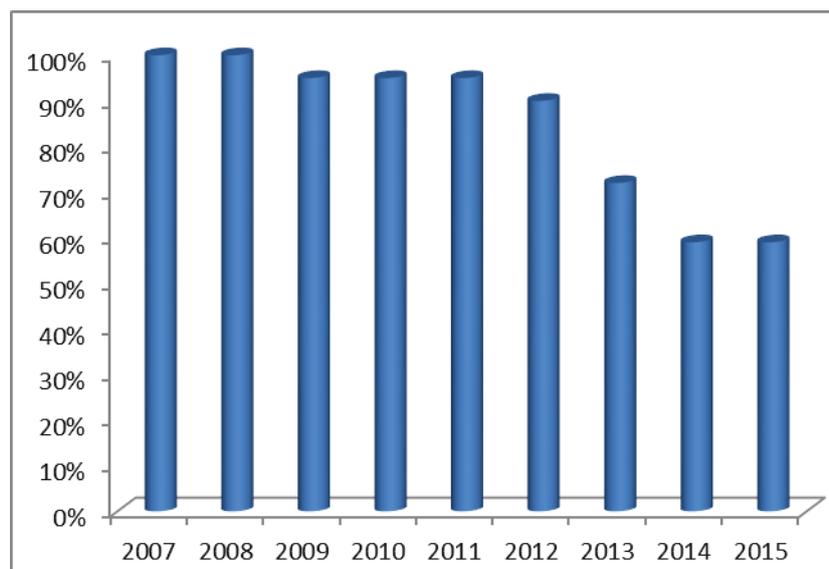
Tous les GDA sauf quatre (Houwareb 1, Henchir Jefna, Karma1, Mlelsa) sont endettés vis à vis la STEG (Société Tunisienne de l'Electricité et du Gaz). La dette moyenne rapportée à la superficie officielle PPI varie de 5,5 DNT/ha à 500 DNT/ha avec une moyenne de 136 DNT/ha pour l'ensemble des GDA. Les GDA avaient généralement entrepris de rembourser progressivement leurs dettes (avant la révolution). Mais la révolution du 14 janvier 2011 a marqué un coup d'arrêt, par effet rebond, les agriculteurs ayant localement cessé de payer leurs redevances. Au moment de la révolution et peu après celle-ci, pour calmer la colère des

agriculteurs, la STEG a décidé de ne pas couper l'électricité et s'est contentée d'envoyer des avertissements de paiement. A partir de 2013, les membres des GDA ont négocié un échelonnement de leurs dettes. Cependant, les GDA les plus endettés n'ayant pas pu payer leurs mensualités, la STEG a fini par couper l'électricité, les rendant ainsi non fonctionnels. Il s'agit des GDA d'Houwareb 2 et 3, Chebika Est et Ouest, Sidi Ali Ben Salem 1, Henchir El Borj, El Mjabra, Houffia, soit 41 % des GDA. Dans ces GDA, l'accumulation des dettes a provoqué la dissolution du conseil d'administration (CA) et la formation d'un conseil provisoire. En effet, par crainte d'être contrôlés et obligés à présenter la comptabilité du GDA et les factures qui justifient les différentes dépenses, les membres du CA ont choisi de démissionner et de laisser la responsabilité à un CA provisoire. Ces CA provisoires n'ont fait qu'aggraver la situation de ces GDA. Ces structures, au lieu d'être un moyen pour relancer la situation des GDA, sont devenues un outil pour exploiter les ressources des GDA à des fins privées.

L'endettement envers l'administration concerne seulement les grands PPI (Houwareb 1, 2 et 3) qui achètent leur eau au CRDA et où le transfert de gestion est relativement récent.

La dégradation de la qualité de service des GDA s'est faite progressivement. Elle a commencé en 2009 mais elle s'est accélérée au cours des dernières années, à partir de 2013 (Figure 3-3).

Figure 3-3 : Evolution de la part des GDA fonctionnels entre 2007 et 2015



Source : CRDA, 2015

4.1.2 Endettement des agriculteurs vis-à-vis du GDA

La dette moyenne des agriculteurs vis-à-vis des GDA varie de 0 à 5000 DNT avec une moyenne de 380 DNT par agriculteur. Dans les GDA de Henchir Jefna, Houwareb1, Draa Affen, El Wsif et Henchir Bouali, les dettes des agriculteurs sont limitées ; à l'opposé, les GDA non fonctionnels sont caractérisés par l'insolvabilité de leurs usagers et l'importance de la dette accumulée.

La discussion avec les présidents, directeurs techniques et les pompistes a révélé qu'il y a parfois des accords informels avec les agriculteurs, qui donnent des avances aux pompistes ou aux directeurs techniques pour ouvrir les vannes, ce qui est une forme de corruption.

4.1.3 Volumes d'eau distribués

L'information sur les volumes d'eau distribués ne concerne que les GDA fonctionnels (les GDA non fonctionnels ont des volumes nuls).

Le GDA Houwareb 1 n'arrive pas à répondre à la demande des agriculteurs, à cause du tarissement du barrage et du rabattement important de la nappe. Ce rabattement influence négativement les débits des deux forages de renforcement qui sont censés pourtant pallier les défaillances du barrage.

Les faibles quantités distribuées des GDA El Wsif et Henchir Boualiles peuvent s'expliquer par le fait que les agriculteurs ont choisi d'éviter le risque de manque d'eau en s'orientant vers des cultures pluviales ou en quittant l'activité agricole pour d'autres activités commerciales.

4.1.4 Solde bancaire

Le degré d'endettement vis-à-vis de la STEG, la solvabilité des usagers et la valeur des ventes d'eau influencent directement la situation financière des GDA. Ainsi, le solde bancaire rapporté à la superficie officielle varie de 0 à 98 DNT/ha, avec une moyenne de 16 DNT/ha.

Seuls les GDA d'Henchir Jefna, Sidi Ali Ben Salem 2 et el Houwareb 1 ont un solde bancaire important qui varie entre 40 000 et 10 000 DNT. D'autres GDA (Mlelsa, Karma 1 et 2, El Ajifre, El Wsif, Hinchir Bouali et el Borj, Wled Nacer, Houffia) ont réussi à équilibrer leur situation financière sans avoir un fond de roulement suffisant pour assurer le bon fonctionnement des équipements (réparation des pannes, achat des pièces de rechange, etc.). Le solde bancaire des GDA non fonctionnels est nul. Les autres GDA au solde bancaire nul ne sont pas économiquement viables.

4.1.5 Typologie des GDA

Pour chacune des quatre variables analysées ci-dessus, un score a été attribué à chaque GDA. Le score total permet de distinguer deux types de GDA parmi ceux qui sont fonctionnels : ceux qui ont une situation saine (Henchir Jefna, Houwareb 1, Mlelsa et Sidi Ali Ben Salem 2) et ceux en difficulté. Les caractéristiques moyennes des trois types de GDA sont résumées dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Caractéristiques moyennes des trois types de GDA

Caractéristiques moyennes	Sains	En difficulté	Non fonctionnels
Dette STEG/ha de superficie officielle (DNT)	14	143	188
Solde bancaire/ha officiel (DNT)	55	9	0
Volume distribué/ha irrigué	5 000	3 026	0
Dettes d'eau / agriculteurs	191	132	782

Source : Enquêtes GDA, 2015

Le Tableau 3-3 donne la répartition des trois types de GDA par secteur. Le secteur de Karma regroupe près de la moitié des PPI mais concentre aussi un nombre important de GDA non fonctionnels. Dans les secteurs d'Hammad et d'Houffia, tous les GDA sont soit non fonctionnels soit en grande difficulté. En général, la dégradation du service des GDA a touché tous les secteurs de la plaine.

Ces variables nous ont permis de discriminer les GDA et de définir les grands types existants dans la plaine. Dans le reste de notre analyse nous cherchons à expliquer l'origine de ces différences de performances.

Tableau 3-3 : Répartition des types de GDA par secteur

Secteur	Sains	En difficulté	Non fonctionnels	Total général
Chebika	1	1	2	4
Ben Salem	2	2	0	4
Karma	1	5	3	9
Hammad	0	2	2	4
Houffia	0	0	1	1
Total	4	10	8	22

Source : Enquêtes GDA, 2015

4.2. Analyse des écarts de performance entre les différents GDA: Etude de cas de 3 GDA

La construction d'une typologie des GDA n'est pas suffisante pour comprendre les facteurs qui ont mené à ces différentes situations. Le faible nombre de GDA étudiés rend difficile une analyse quantitative. Aussi avons-nous choisi de présenter et d'analyser la diversité des situations et des facteurs qui y ont conduit au travers d'un petit nombre de cas exemplaires. La présentation de ces cas est basée essentiellement sur les dires des acteurs rencontrés (membres des GDA, CRDA et CTV).

4.2.1 Cas d'un GDA avec une situation saine : le GDA Houwareb 1

Le périmètre irrigué El Houwareb a été créé en 1993 dans le cadre d'un projet présidentiel. Il fait partie du secteur Karma. Il a été géré par le CRDA jusqu'en 2005, date du transfert de la gestion au GDA. Le périmètre s'étend sur une superficie de 800 ha et le GDA permet de desservir 180 bénéficiaires. Malgré le nombre important des bénéficiaires, seuls 20 agriculteurs sont adhérents, donc ont payé¹⁴.

Ce GDA possède un conseil d'administration élu de 4 membres, 2 pompistes, un directeur technique (DT) et des adhérents. Le DT a été recruté par l'Etat dans le cadre d'emploi des chômeurs. Il a un niveau universitaire et entretient de bonnes relations avec les agriculteurs.

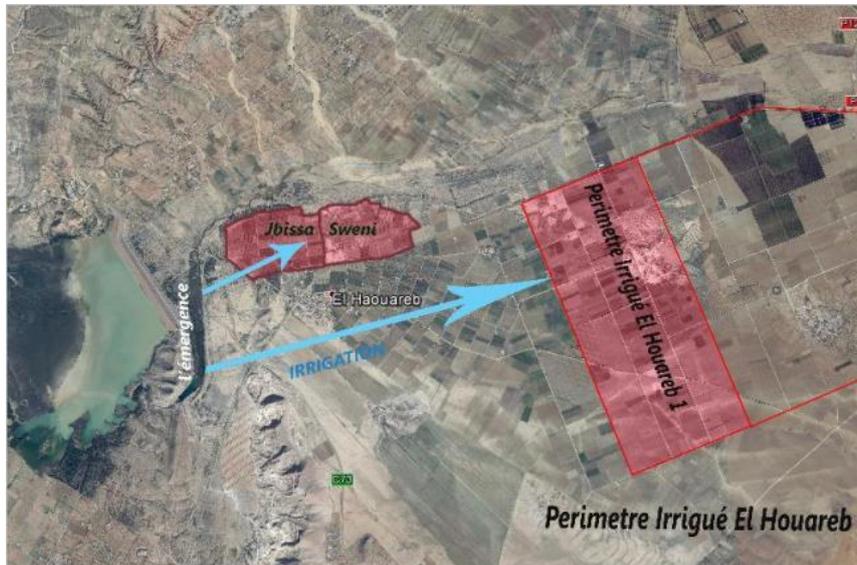
La tenue du CA se fait selon la nécessité et la complexité des problèmes rencontrés, qui exigent une prise de décision collective. La situation administrative dans ce périmètre est stable ; il n'y a pas eu de changement du président depuis 2007. Ce GDA est à la recherche d'une nouvelle image auprès des agriculteurs (confiance, transparence) et les usagers semblent satisfaits du CA actuel. Contrairement aux discours entendus dans d'autres GDA, les agriculteurs rencontrés ne se plaignent pas de manque de transparence au sein du GDA, de favoritisme de quelques agriculteurs, de manque de présence des responsables du GDA ou de prix élevé de l'eau. Au contraire, tous les agriculteurs interrogés affirment être satisfaits du travail des responsables du GDA et surtout de la technicité et de l'honnêteté du directeur technique. Le seul problème abordé de manière répétée par tous nos interlocuteurs est celui de la diminution de la disponibilité de l'eau.

Le périmètre El Houwareb est alimenté par 3 sources d'eau : le barrage, 2 forages de renfort et l'émergence. Le PPI est desservi en eau par 4 lignes de distribution (L1, L2, L3, L4). Les lignes L1 et L2 sont alimentées par le forage F1 (26 l/s) et desservent en même temps de 6 à 7 agriculteurs. Les lignes L3 et L4 sont alimentées par le forage F2 (23 l/s) et assurent l'irrigation simultanée de 3 à 4 agriculteurs. Ces lignes de distribution alimentent 120 bornes toutes équipées par des compteurs : le taux d'équipement par des compteurs fonctionnels atteint dans ce GDA 97 %, ce qui facilite la facturation des consommations et évite les conflits entre le GDA et ses usagers. L'irrigation dans ce GDA n'est pas à la demande, mais au tour d'eau. La durée du tour d'eau varie de 2 à 4 jours en fonction de la saison, du type de cultures et du nombre d'agriculteurs qui ont mis en culture leurs parcelles. Pour chaque période de 8 heures, 4 agriculteurs ont le droit d'irriguer leurs parcelles. Les règles du tour d'eau sont très bien respectées par les agriculteurs et les pompistes. Malgré l'existence d'une demande importante en eau dans les extensions du périmètre, le DT a décidé de ne pas répondre à leur demande et a priorisé la satisfaction des agriculteurs appartenant au périmètre, du fait du manque structurel de la ressource : les deux forages demeurent insuffisants pour répondre à la demande des irrigants. Pour faire face à cette situation, le GDA a eu recours à l'eau de l'émergence (90 l/s), ce qui a créé des conflits avec les agriculteurs des communautés voisines : Jbissa (80 ha) et Swani (120 ha) regroupant respectivement 30 et 35 agriculteurs qui utilisaient cette ressource depuis longtemps.

¹⁴ Ce nombre qui peut sembler faible est cependant considéré comme important comparé au reste des GDA.

La Figure 3-4 localise les deux zones Jbissa et Swani par rapport au périmètre irrigué Houwareb 1, à l'émergence et au barrage.

Figure 3-4 : Localisation du périmètre El Houwareb et des zones Jbissa et Sweni



Le président du GDA nous a raconté que la source « Aïn Ben Saâd » était pour ces zones la seule source d'eau. Lors de la construction de l'évacuateur de crues, des fissures ont été ouvertes sous la digue à cause de l'usage de la dynamite, favorisant ainsi la fuite des eaux du barrage dans le bassin de dissipation. Ainsi, les eaux de la source Aïn Ben Saâd sont désormais confondues avec celles du barrage dans le bassin de dissipation aussi appelé « émergence ». Depuis, ce bassin est considéré par les responsables du CRDA comme partie intégrante du barrage. Il n'est plus question des eaux de la source qui préexistait (Riaux, 2014). Ceci a créé un litige autour de cette émergence : les agriculteurs de Jbissa et Swani considèrent que les eaux de l'émergence leur appartiennent, étant à la base les eaux d'Aïn Ben Saâd, tandis que les agents de l'administration estiment que ces eaux proviennent du barrage qui est un aménagement public.

Par la suite, face aux revendications des villages de Jbissa et Swani, le délégué a proposé de réserver l'eau du barrage au périmètre irrigué Houwareb et l'eau de l'émergence aux agriculteurs de Jbissa et Swani. Ce partage de la ressource a été jugé équitable, l'eau de l'émergence leur suffisant à irriguer leurs parcelles. Cette manière de régler le problème, bien qu'informelle, a permis d'apaiser la situation d'usage entre les deux populations jusqu'en 1997. Après 1997, le barrage a commencé à s'assécher et son apport en eau est devenu insuffisant pour alimenter le périmètre irrigué. Par conséquent, le CRDA a installé 3 motopompes sur le cours d'eau de l'émergence pour apporter un complément d'irrigation pour le périmètre Houwareb. En 2006, le barrage était complètement à sec et le CRDA a installé dans l'émergence 4 nouvelles motopompes plus puissantes que les trois précédentes (pompage de renforcement).

Le GDA vend l'eau aux agriculteurs à 80 millimes le m³. Ce prix est jugé très faible par les membres du CA, ne permettant pas d'assurer la rentabilité du GDA. La direction du GDA souhaiterait réaliser une étude pour définir un nouveau tarif et convaincre les usagers d'accepter

une augmentation de tarif. Ce faible tarif n'a toutefois pas empêché le GDA de payer sa dette envers la STEG, les usagers payant leur redevance hydraulique régulièrement et les dettes par agriculteur ne dépassant pas 28 DNT. Ainsi, le solde bancaire important (11 000 DNT) du GDA lui permet de financer la maintenance et l'entretien du réseau.

Le CRDA a apporté un grand appui à ce GDA par l'investissement dans des forages et des pompes (renforcement par des capacités de pompages supplémentaires) en vendant l'eau au GDA à un prix très faible qui ne couvre pas le coût d'investissement (50 millimes/m³).

Le GDA Houwareb 1 a pu résister au manque d'eau et à la faible tarification par la solvabilité de ses usagers, l'application rigoureuse des règles de tours d'eau, la compétence du directeur technique, la bonne organisation interne du CA (capacité de résolution des problèmes, des réunions périodiques, efficacité des décisions prises) et la prise en compte des attentes des usagers dans la prise de décision. Ce GDA a montré un réel engagement dans l'action collective (Participation des usagers dans la prise de décision) et une grande émancipation pour améliorer le fonctionnement et cantonner l'administration à des tâches de supervision et de contrôle.

Mais le manque d'eau dans ce GDA a limité les choix des agriculteurs et a contraint le fonctionnement de leurs exploitations : ces derniers sont orientés principalement vers des cultures pluviales (céréaliculture et olivier). Ce manque structurel d'eau n'a pas engendré l'installation des forages privés (5 forages seulement).

Les entretiens effectués ont révélé aussi une volonté exprimée d'aller vers plus de participation. Cette tendance semble améliorer la performance de ce GDA et constitue un exemple incitatif pour les autres GDA. Se développent ainsi des stratégies collectives que l'on peut qualifier « d'adaptatives » : face à la baisse des débits, le GDA Houwareb 1 (même cas pour GDA Mlelsa) arrête de donner de l'eau aux exploitations agricoles situées hors du périmètre, et, en début d'année, les agriculteurs adaptent leurs systèmes de culture et leurs itinéraires culturaux à la disponibilité de la ressource. Des groupes d'agriculteurs se mettent d'accord aussi pour diminuer la part de maraîchage dans leurs spéculations et s'orienter vers des cultures moins exigeantes en eau. En effet la spécialisation de tous les agriculteurs dans les mêmes cultures irriguées financièrement rentables provoque des pics de consommation d'eau, à la fois durant l'année et durant la journée.

Ces tentatives ont été réalisées grâce aux accords collectifs entre les membres (conseil administratif, directeur technique) et les usagers de ce GDA.

Les expériences dans les GDA Jefna, Mlelsa et Sidi Ali Ben Salem 2 se rapprochent de celle d'El Houwareb 1. La principale différence tient au fait que le GDA Jefna bénéficiant de 6 forages ne souffre pas de manque d'eau.

4.2.2 Cas d'un GDA en difficulté : GDA Sidi Ali Ben Salem 3

Le périmètre Sidi Ali Ben Salem 3, localisé dans le secteur Ben Salem, couvre une superficie de 147 ha et regroupe 21 bénéficiaires. Il est alimenté par un forage de 50 l/s. Le CA est élu mais sa légitimité reste administrative et n'est pas exécutée dans la pratique (n'est pas opérationnel) : de nombreux responsables et élus ont été mis en cause par les bénéficiaires à

cause de leur corruption. La gestion est confiée aux pompistes. La discussion avec les acteurs du périmètre a révélé qu'il y a parfois des accords informels avec les agriculteurs, qui donnent des avances aux pompistes ou au directeur technique pour ouvrir les vannes sans comptabiliser ces avances au profit du compte du GDA (ce qu'on peut qualifier de corruption) ou payer le reste du montant. Le président et le trésorier du GDA sont les seules personnes qui ont le droit de gérer le compte bancaire. Quelques pompistes et directeurs techniques (anciens) ont mentionné avoir profité du budget des GDA en gonflant les factures (ou établissant des factures fictives) et en utilisant la différence de prix à des fins personnelles (corruption).

Dans ce GDA, les bénéficiaires font état de plusieurs pratiques et comportements illégaux, qui se manifestent dans les actions de vandalisme : casse des compteurs et des conduites, vol des pompes électriques et des équipements d'irrigation. Ces comportements résultent soit d'un conflit entre agriculteurs et GDA (coupure d'eau suite à un non-paiement, allongement des tours d'eau) ou sont le fait de personnes qui veulent déstabiliser la situation des GDA pour des raisons politiques ou pour créer une rupture entre les membres du CA. Ces dégradations ont alourdi les dettes du GDA et dégradé sa situation financière. Ainsi la dette envers la STEG en 2014 s'élevait au total à 4 000 DNT.

Cette situation a engendré des coupures d'eau périodiques dans le PPI et un allongement des tours d'eau, ce qui a amené quelques agriculteurs à installer des forages privés. Bien que le prix de vente d'eau par le GDA soit jugé élevé (150 millimes), les agriculteurs préfèrent irriguer à partir des infrastructures du GDA, étant donné le coût élevé de pompage : la majorité des forages installés étant illicites, les irrigants utilisent dans ce GDA l'énergie électrique délivrée par leur compteur domestique, sans bénéficier du tarif agricole. Chaque agriculteur arbitre ainsi entre les deux sources d'eau, en fonction de ses objectifs et stratégies propres. Dans ce périmètre, de nombreuses terres sont exploitées par des locataires qui utilisent les ressources en eau et en sols de façon intensive et qui quittent la zone au bout de quelques années pour s'installer ailleurs lorsque ces ressources commencent à se dégrader, comportement que l'on peut qualifier de minier. Un marché informel de l'eau se construit petit à petit, les détenteurs des forages vendant l'eau contre le paiement des frais d'énergie ou en fixant un prix par m³ aux agriculteurs, notamment locataires qui n'ont pas d'accès à l'eau. Ceci augmente fortement la valeur économique de cette ressource mais il diminue fortement les achats de l'eau auprès du GDA.

La situation géographique de ce GDA n'est pas favorable en termes d'accès au marché, les exploitations étant éloignées des pistes agricoles. Les agriculteurs se retrouvent souvent livrés à eux-mêmes pour commercialiser leurs productions. Dans cette situation de concurrence, les prix stagnent tandis que les intrants et les autres coûts de production (main d'œuvre ...) ne cessent d'augmenter. Les exploitants agricoles ne parviennent pas à maintenir leurs revenus et donc à accéder aux moyens de production et à intensifier. Ces agriculteurs se limitent à cultiver une partie de leurs parcelles en s'orientant vers les grandes cultures et l'olivier, moins consommatrices en eau et moins exigeantes en termes d'autres intrants. Ceci a pour conséquence de diminuer la demande en eau auprès du GDA et influence énormément leurs ressources financières. La sous-exploitation du réseau d'irrigation, en raison d'une faible

intensification (60 %) ou de la présence de puits privés, représente un manque à gagner qui pèse sur la trésorerie des GDA.

Malgré les difficultés qui entravent le fonctionnement de ce GDA, la situation demeure calme. Mais la gestion actuelle n'est pas jugée conforme aux attentes des usagers. Ce contexte a amené les agriculteurs à souhaiter un renouvellement du CA sans pour autant faire apparaître de trop graves sources de dissensions ou de conflits au sein du groupement. Les tensions entre groupes d'agriculteurs semblent avoir été dépassées pour l'intérêt collectif de la population et la situation pourrait se normaliser progressivement.

La situation dans ce GDA est représentative de l'état des GDA en difficulté (Karma 1, Karma 2, El Wsif, Draa Affen, Wled Nacer, Bled Sbita, Henchir Bouali, El Ajifre et Chwarbia).

4.2.3 Cas de deux GDA non fonctionnels : les GDA Chebika Est et Chebika Ouest

Les deux périmètres Chebika Est et Chebika Ouest, localisés dans le secteur Chebika, couvrent une superficie de respectivement 158 ha et 250 ha. Ces deux GDA partagent les mêmes conditions et sont actuellement dans la même situation. Ils sont alimentés par des forages, installés depuis 1956, avec un débit de 14 l/s et 16 l/s. Le transfert de gestion vers les GDA a été fait en 2007.

Leur problème majeur est le dysfonctionnement des compteurs : sur Chebika Ouest, 150 compteurs sur 170 sont non fonctionnels ; sur Chebika Est, seules 20 des 140 bornes d'irrigation sont équipées de compteurs, tous non fonctionnels. Les causes de dysfonctionnement sont diverses, allant du colmatage à leur destruction volontaire par les agriculteurs. En l'absence de compteurs, la facturation de l'eau est établie sur la base de barèmes forfaitaires en fonction des cultures, des saisons, des conditions climatiques, et aussi des heures d'irrigation. Ces barèmes forfaitaires sont susceptibles de conduire à des différences substantielles entre les quantités d'eau facturées par le GDA aux agriculteurs et les quantités réellement consommées.

Par ailleurs, les usagers ne payant pas leurs redevances envers le GDA depuis la révolution du 14 janvier 2011, leurs dettes s'accumulent. Cette situation a engendré une dégradation de la situation financière des GDA, ceux-ci n'arrivant pas à payer leurs dettes envers la STEG. Le moratoire instauré par la STEG dans le contexte post révolutionnaire a conduit à une accumulation de dettes qui malgré l'échelonnement proposé, n'a pas pu être honorés ce qui a conduit la STEG à couper l'électricité en 2013. Les dettes envers elle atteignent 28 000 DNT à Chebika Est et 27 000 DNT à Chebika Ouest. Les suites de la révolution ont dévoilé dans ces GDA des problèmes de cohésion voir de conflits et des problèmes de confiance entre les usagers de la ressource et les dirigeants des GDA. Après une longue période de tension (démission de la plupart des membres du conseil d'administration, implication du comité de protection de la révolution ...), les GDA de Chebika Est Ouest ne sont plus fonctionnels.

La dissolution des CA s'est soldée par la création de CA provisoires. Compte tenu du contexte historique de création de ces structures et de l'intervention des autorités locales dans la nomination du CA avant la révolution, ces structures provisoires ont perdu toute légitimité aux

yeux des agriculteurs : elles ont souvent exploité les ressources des GDA à des fins personnelles ; et la succession de CA provisoires a aggravé la situation financière de ces GDA par absence de toute sorte de comptabilité et de contrôle.

Malgré la fermeture de ces deux groupements, la dynamique agricole au sein de ces deux périmètres demeure importante : le taux d'intensification est de 111% à Chebika Est et 125% à Chebika Ouest, grâce au développement des forages privés (au nombre de 100 à Chebika Est et 120 à Chebika Ouest, selon les déclarations des anciens membres du CA. Ces forages sont très majoritairement illicites et fonctionnent avec des pompes diesel, donc avec un coût de pompage élevé. Les agriculteurs qui n'ont pas les moyens d'investir seuls dans un forage, soit s'endettent, soit recherchent des associés pour partager avec eux les coûts d'investissement et d'énergie, soit encore louent leurs terres aux détenteurs de forages.

Les anciens membres de CA (y compris ceux qui ont pu investir dans des forages privés) de ces deux GDA expriment la volonté de faire redémarrer le périmètre en désignant un nouveau CA. Cependant, l'importance des dettes envers la STEG et l'exigence du CRDA de mettre à jour la comptabilité des années antérieures avant la nomination d'un nouveau CA, rendent cette relance très difficile. C'est le cas pour plus de la moitié des GDA non fonctionnels de la zone : Houwareb 2, Houwareb 3, Sidi Ali Ben Salem 1, El Mjabra et Houffia.

4.3. Résumé des principaux enseignements

Malgré un contexte socio-économique commun et des conditions physiques assez homogènes, les situations des GDA sont ainsi très diverses : 18 % d'entre eux sont jugés performants, gérant de manière satisfaisante leurs équipements et parvenant à satisfaire leurs usagers. Ces GDA sont autonomes, solvables et financièrement équilibrés ; 37 % des GDA rencontrent des difficultés importantes ; et 45 % sont en cessation de fonctionnement et peinent à se réorganiser pour reprendre leur activité.

Les écarts de performances s'expliquent par des facteurs multiples, parmi lesquels les questions de gouvernance, de confiance, les facteurs techniques et économiques semblent jouer un rôle important. Certaines situations difficiles sont ainsi l'héritage de la gestion des grands périmètres irrigués par l'administration jusqu'à la création des GDA entre 2005 et 2007 (comme pour les 2 GDA d'El Houwareb).

Plus généralement, les principaux points de défaillance observés résident dans leur incapacité à appliquer une bonne gestion administrative et financière et à effectuer l'entretien et la maintenance nécessaires des réseaux de distribution qui sont dans les pluparts des cas vétustes. Cette dernière carence est souvent liée à la capacité financière limitée des GDA pour payer les services externes. Aussi, l'accumulation des dettes envers la STEG qui due généralement au non-paiement des redevances hydrauliques des usagers a entraîné la fermeture de ces groupements et la disparition d'un accès collectif à la ressource en eau dans 8 PPI. On constate aussi un manque de stratégies collectives qui peuvent adapter les comportements des irrigants à la disponibilité de la ressource. Ces stratégies adaptatives ne sont observées que pour un nombre limité de GDA, qui ont pu assurer un équilibre financier leur permettant de payer leur

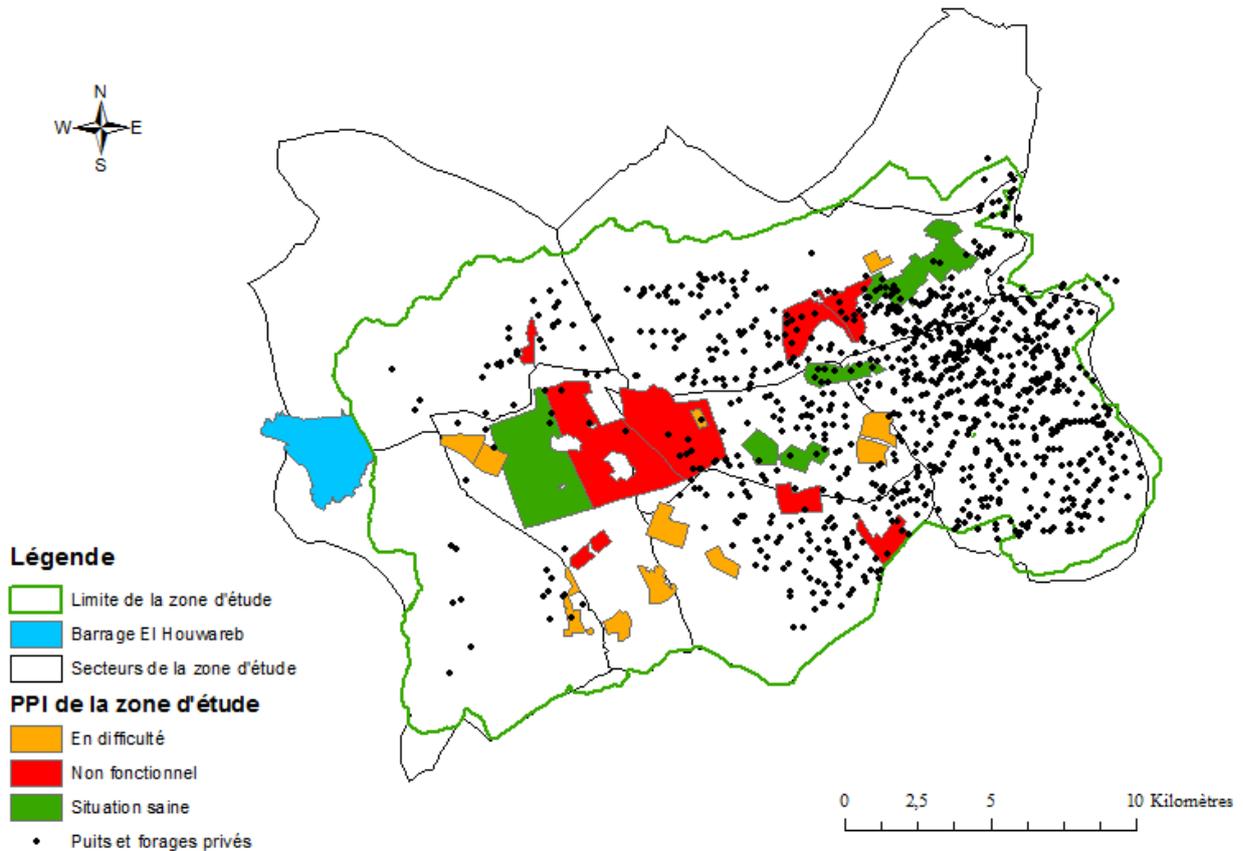
dette envers la STEG et d'effectuer les opérations de maintenance et d'entretien de leur réseau d'irrigation.

5. L'EXPANSION DES FORAGES PRIVÉS : PARFOIS CAUSE PARFOIS CONSEQUENCE DE LA DEGRADATION DE L'ACCES COLLECTIF A L'EAU

Malgré l'interdiction d'installer des forages privés dans les PPI, on comptait 811 forages privés dans les 22 PPI de la plaine en 2011 (recensement IRD). Et ce chiffre ne cesse d'augmenter avec la période de sécheresse (2013-2016) que connaît le pays. Est-ce dû aux médiocres niveaux de performance des GDA ou à d'autres facteurs ? Nous allons tenter de répondre à cette question en cherchant à déterminer les endroits où ces forages sont principalement creusés, en explorant aussi le type d'agriculteurs qui forent de manière individuelle. Enfin, nous reviendrons sur les conséquences d'un tel comportement.

5.1. Un recours généralisé aux forages privés

L'installation des forages privés concerne l'ensemble de la zone d'étude (Figure 3-5). Elle est toutefois davantage accentuée dans les PPI dont les GDA sont non fonctionnels (en orangé sur la carte). On remarque aussi un gradient croissant de l'ouest vers l'est cela peut être aussi expliquer par : l'impact de la proximité de Kairouan à l'est sur la dynamique agricole (plus grande proximité du marché) et éventuellement des sols ayant de meilleures potentialités agricoles à l'est.

Figure 3-5 : Répartition des forages privés dans la zone d'étude

Le développement des forages illicites n'est toutefois pas limité aux GDA non fonctionnels : des forages privés sont construits même dans les périmètres des GDA les plus performants (Jefna, Mlelsa, Houwareb 1, Sidi Ali Ben Salem 1).

5.2. Une décision de forer prise pour maximiser son intérêt individuel et rendue possible par la faiblesse du pouvoir de police

La décision d'irriguer avec de l'eau du GDA ou de l'eau d'un forage privé dépend des contraintes et des objectifs propres à chaque irrigant, sans tenir compte de l'état de la ressource et de l'intérêt de la collectivité. Le facteur majeur qui influence leurs décisions est de leur assurer un revenu minimum ou de le maximiser. Le second facteur déterminant est lié au premier est le niveau de risque encouru à réaliser un tel ouvrage (probabilité d'avoir de l'eau mais aussi de subir des sanctions pour non-respect de la réglementation comparé au niveau de la sanction).

Il est possible de distinguer deux principales catégories d'agriculteurs ayant recours à un accès privé à la ressource.

La première concerne des agriculteurs qui souhaitent s'assurer contre les coupures d'alimentation en eau collective suite à une sécheresse, à des pannes récurrentes ou à de trop longs tours d'eau qu'ils subissent. Les forages de ces agriculteurs ne sont majoritairement pas électrifiés et fonctionnent au gasoil. Cela explique leur préférence pour l'accès collectif à l'eau,

le prix de l'énergie ainsi que le coût d'approfondissement des forages étant élevés. Dans ces cas-là, les forages sont la conséquence d'une défaillance de la gestion collective.

La seconde rassemble des agriculteurs qui cherchent à améliorer leur revenu notamment du passage de cultures à faible valeur ajoutée à des cultures de rente. Cette situation est parfois le résultat du morcellement des exploitations agricoles et de l'augmentation continue du prix des intrants (y compris les tarifs de l'eau) dans ces territoires irrigués qui diminuent leurs revenus, les incitant à s'orienter vers des cultures à haute valeur ajoutée pour rentabiliser ces petits lots de terre. Dans ces cas-là, les forages apparaissent comme la cause de la défaillance de la gestion collective. On assiste ainsi à l'apparition d'une « stratégie de chasse » (Mouri et Marlet, 2006). Elle consiste à investir dans des forages privés pour satisfaire les besoins en eau de systèmes de production basés sur des cultures à maraîchères rémunératrices mais consommatrices en eau. Cette stratégie demande des moyens financiers pour investir, elle implique aussi souvent le contournement des dispositifs légaux de contrôle des forages (la profondeur de ces forages dépasse parfois les 150 mètres). En effet les agriculteurs pouvant mobiliser les sommes nécessaires au creusement de forages disposent aussi souvent des réseaux sociaux nécessaires pour creuser malgré les interdictions administratives.

Ces agriculteurs peuvent aussi vendre de l'eau à leurs voisins, contre le paiement de frais d'énergie (électricité ou gasoil) ou en fixant un prix forfaitaire par m³.

5.3. Une expansion des forages individuels aux effets collectifs hautement négatifs

L'accès anarchique individuel à l'eau souterraine a deux conséquences négatives principales pour la collectivité dans son ensemble.

Tout d'abord, elle accroît la tension sur la ressource et met donc en péril la durabilité de son exploitation : prélever aujourd'hui pénalise les prélèvements futurs quand la ressource se renouvelle lentement (Montginoul et Rinaudo, 2009) et le niveau piézométrique diminuant, le coût de pompage est accru pour tous, y compris pour les forages collectifs.

La deuxième concerne la gestion collective : l'utilisation des forages privés quand elle se traduit par une diminution des consommations d'eau des GDA ou le refus de payer les factures d'eau, réduit les recettes des GDA, mettant en péril leur équilibre financier pouvant les conduire à des niveaux de performance dégradés. C'est ainsi le cas pour les GDA Chebika Est et Ouest pour lesquels le dysfonctionnement est une conséquence directe de l'expansion des forages illicites. Un cercle vicieux débute alors : la fermeture du GDA incite au développement accru des forages privés.

La troisième concerne l'équilibre social du territoire : les petites exploitations familiales, aux capacités financières limitées leur permettant d'approfondir leur puits ou forage ou de partir pour continuer leur activité ailleurs, sont les plus vulnérables à de tels usages non durables de la ressource en eau. Ceci a créé une concentration de la ressource chez les détenteurs de capital et accroît en conséquence l'iniquité sociale dans la plaine de Kairouan.

6. CONCLUSION : LA DIFFICILE RESOLUTION DE L'EQUATION DU DEVELOPPEMENT DURABLE CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Au final, la dynamique d'expansion des forages est à la fois cause et conséquence de la baisse des performances des GDA. Elle met plus globalement en exergue la difficulté pour un Etat à concilier les trois dimensions permettant un développement durable (Barraqué, 1998) : développement économique d'un secteur ici agricole, exploitation soutenable des ressources en eau et équité d'accès en cherchant à stabiliser les populations les plus pauvres.

L'Etat tunisien a cherché à promouvoir l'irrigation, en agissant sur différents leviers, donc celui d'un accès à l'eau collectif. Les efforts déployés pour la mobilisation des ressources en eau ont été ainsi accompagnés par des incitations financières conséquentes de la part de l'Etat, par le développement de marchés et de filières agro-industrielles diversifiées pour les besoins de la consommation intérieure ou pour l'exportation et par des évolutions technologiques favorables de forage et de pompage d'eau (passage de l'énergie animale à l'énergie thermique puis à l'énergie électrique permise par l'extension des réseaux électriques dans les zones rurales). Ainsi, le nombre de puits avec des pompes électriques en Tunisie est passé de 60 415 en 1980 à 128 400 en 2000, soit une croissance annuelle de 5,6 %. Cette tendance a également été observée pour les puits équipés par des pompes modernes à énergie solaire, dont le nombre est passé de 23 061 en 1980 à 86 965 en 2000, soit une augmentation annuelle de 6,8 % (Frija et al., 2015).

Ces efforts ont permis l'extension des superficies irriguées et l'augmentation de la production agricole. L'utilisation de ces ressources souterraines a ainsi contribué à la transition économique et sociale de nombreux agriculteurs (Llamas et Martínez-Santos, 2005). Mais l'Etat a progressivement pris conscience de la nécessité d'accompagner ce développement de l'agriculture irriguée par des politiques de préservation des ressources en eau surtout souterraines (Figure 3-6). Ainsi le code des eaux en 1975 précise que la ressource en eau souterraine appartient au DPH et prévoit la délivrance d'une autorisation pour son utilisation (pour des forages supérieurs à 50 m) et l'établissement de périmètres de sauvegarde et d'interdiction (Faysse et al., 2011).

Figure 3-6 : Les politiques de gestion des ressources souterraines en Tunisie

1960	Politique de mobilisation « la grande hydraulique »	<p>1960 : Premières expériences de recharge des nappes</p> <p>1975 : Promulgation du code des eaux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les eaux souterraines appartiennent au DHP - Distinction entre nappe phréatique et nappe profonde (plus de 50 m) - Les ouvrages en nappe phréatique sont soumis au régime de la déclaration, les autres au régime de l'autorisation assortie d'une concession. - Définition d'une politique de sauvegarde et d'interdiction de forages - Institution d'une redevance sur les prélèvements
1980	Tentative de gestion de la demande	<p>1987 : Politique tarifaire</p> <p>1990 : Tentative de gestion des prélèvements par la régulation de la fourniture d'énergie</p> <p>Contrôle des creusements et de l'approfondissement des points de prélèvement.</p>
2000	Gestion intégrée	<p>2000 : Gestion participative des nappes Un seul exemple opérationnel : La nappe phréatique de Bsissi - Oued El Akarit dans le Gouvernorat de Gabes</p> <p>2016 : Le contrôle des volumes prélevés par le biais de la consommation électrique est envisagé</p>

Malgré les différentes tentatives pour la préservation des ressources souterraines, la faiblesse des moyens alloués aux tâches régaliennes dans un contexte de pression sur les moyens humains et budgétaires des CRDA a engendré des difficultés croissantes à mettre à jour des inventaires précis des prélèvements dans un contexte général souvent laxiste (approfondissements non déclarés des ouvrages existants, création non déclarée d'ouvrages nouveaux en nappes phréatiques, absence de moyens de mesure, dépassement des volumes autorisés par la concession, etc.) (Scet Tunisie, 2014). Ces phénomènes ont été exacerbés après les événements révolutionnaires de janvier 2011, les administrations publiques ont une présence et une activité bien plus faibles dans les zones rurales et les ressources deviennent de plus en plus menacées.

Ces constats illustrent le dilemme face auquel l'administration se trouve : la consolidation actuelle du développement agricole (fixation de la population rurale, maintien des niveaux de production, amélioration du revenu agricole) ou l'application stricte des règles (colmatage des forages illicites) qui n'aura des effets positifs qu'à long terme, préservant in fine le potentiel économique de la région.

Le pari dans l'accès à l'eau collectif pour chercher à atteindre toutes les dimensions de la durabilité est donc difficile à tenir : les niveaux de performance médiocres de la majorité des GDA ont engendré une frénésie d'installation des forages privés ; les contraintes individuelles subies par les agriculteurs ont aussi poussé ces derniers à adopter cette stratégie de court terme.

Mais la réussite de certains cas, que ce soit ceux ici décrits ou ceux issus d'autres cas comme celui du GDA de Bsissi dans le Gouvernorat de Gabès (Faysse et al., 2011), doit inciter à rester optimiste et à essayer de reproduire les éléments du succès tout en cherchant à limiter les facteurs d'échec : une application ferme des règles avec une police bien présente, une révision de la politique énergétique et l'intervention de l'Etat pour échelonner les dettes des GDA, une politique du gagnant-gagnant, une participation « intelligente » des usagers (qui cherche à définir leur degré et niveau d'implication pertinent dans la prise de décision) sont autant de pistes pour transformer un échec annoncé en une gestion durable de la ressource.

CHAPITRE 4

Situations diversifiées, trajectoires contrastées des exploitations agricoles autour d'une nappe surexploitée en Tunisie centrale

Communication acceptée sous forme de présentation orale aux doctoriales en sciences sociales de l'eau - 2017, Université de Paris Nanterre, 4,5 et 6 décembre 2017

Amal Azizi, Sylvie Morardet**, Marielle Montginoul**, Jean-Louis Fusillier**

(Cirad, Umr G-Eau, Montpellier, France / ** Irstea, Umr G-Eau, Montpellier, France)*

1. INTRODUCTION

Face à la dégradation du service des GDA (voir Chapitre 3) suite à des problèmes techniques, de gouvernance, de confiance et d'endettement, et contraint par les caprices d'un climat méditerranéen, caractérisé par la rareté des précipitations et une grande variabilité saisonnière et interannuelle, les ressources en eau disponibles sont devenues limitées et ne permettent pas de satisfaire une demande agricole en nette croissance, ce qui conduit à des situations de pénurie, qui mettent en péril la durabilité de l'agriculture irriguée et la stabilité financière des paysannes. Cette situation a engendré une pression sur les ressources souterraines via l'investissement dans l'approfondissement et l'installation des forages privés qui sont dans la plupart des temps illicites. Ceci a provoqué une « révolution silencieuse », bien qu'elle ait assuré le développement de nombreuses exploitations (Llamas et Martínez-Santos, 2005), a engendré des externalités négatives. La première concerne la durabilité des ressources en eau souterraine : prélever aujourd'hui pénalise les prélèvements futurs quand la ressource se renouvelle lentement (Montginoul et Rinaudo, 2009); de plus, le niveau piézométrique diminuant, le coût de pompage est accru pour l'ensemble des usagers. La deuxième externalité négative concerne la gestion collective : Comme évoqué dans le chapitre précédent, l'irrigation par l'eau des forages privés entraîne la diminution des recettes des GDA, ce qui met en péril leur équilibre financier et conduit à des niveaux de performance plus dégradés.

L'administration n'arrive pas à contrôler l'expansion des prélèvements individuels et doit constamment arbitrer entre des objectifs de préservation des ressources en eau (fermeture des forages), d'une part et la consolidation du développement agricole dans la région (fixation de la population rurale, maintien des niveaux de production, amélioration du revenu agricole), d'autre part. En l'absence d'une application réelle des lois pour limiter la surexploitation des nappes, c'est toute l'économie agricole qui sera fragilisée, avec des effets en cascade sur le développement rural, les filières agricoles, et in fine la sécurité alimentaire du pays. Dans ce contexte de surexploitation des nappes, il est primordial de concevoir des instruments de gestion capables de réconcilier les objectifs de durabilité et de rentabilité. L'estimation de la demande en eau pour l'irrigation paraît donc incontournable. La demande en eau estimée permet de quantifier l'écart existant et les déséquilibres à venir entre disponibilité et besoin et d'évaluer au mieux les options de gestion de la ressource (Poussin et al. 2008), (Kefi et al. 2003), (Attalah et al., 2007).

Pour estimer la demande en eau agricole il faut tout d'abord comprendre la dynamique agricole régionale, identifier les déterminants de cette demande et cerner la diversité des situations existantes vis-à-vis d'une dynamique de prélèvement croissant de la ressource. Les typologies basées sur les structures et choix individuels sont un outil classique pour analyser la diversité des exploitations. Les stratégies paysannes d'assolement et les pratiques culturales sont des éléments déterminants des prélèvements d'eau pour l'irrigation. Ces pratiques sont elles-mêmes conditionnées par le contexte pédoclimatique, la structure des exploitations et leurs stratégies d'investissement. Il est donc nécessaire de tenir compte de la diversité des exploitations dans l'estimation de leur demande en eau d'irrigation (Poussin *et al.*, 2008 ; Maton *et al.*, 2005 ;

Azizi, 2014). L'exploitation agricole est un système complexe (Perrot et Landais, 1993) , compte tenu des éléments qui la constituent et de la nature elle-même complexe des interactions qui les relient. Bien qu'elles partagent un environnement commun, les exploitations d'une même région n'ont pas toutes la même histoire, n'ont pas aujourd'hui les mêmes caractéristiques et ne disposent pas d'un accès identique à l'eau ou aux diverses ressources du milieu naturel, ce qui crée un certain particularisme d'une exploitation à une autre (Jamin *et al.*, 2007). Les typologies d'exploitation sont généralement une image instantanée de la diversité, cependant se limiter à une analyse momentanée des exploitations à forte tendance d'évolution est insuffisant. Il est très intéressant d'analyser leur historique si on a l'opportunité d'avoir des données sur des typologies antérieures. L'analyse des trajectoires des exploitations permet d'expliquer les motifs d'évolution des exploitations agricoles en liaison avec l'évolution de la ressource et aux changements de l'environnement économique, politique et climatique de l'exploitation agricole, (Capillon et Manichon, 1988; Capillon, 1993).

Ce chapitre a 3 objectifs : le premier est de comprendre la dynamique agricole régionale globale de la zone d'étude, le deuxième est de caractériser la diversité des exploitations en termes de structures et de stratégies de production dans une perspective d'identification des déterminants de leur demande en eau, en s'appuyant sur le cas de la partie aval du bassin du Merguellil, en Tunisie centrale. Le troisième objectif est d'étudier les dynamiques récentes d'évolution (trajectoires) de ces exploitations et leur éventuel lien avec les conditions d'accès et d'utilisation de l'eau. Nous tenterons en particulier de répondre aux questions suivantes :

- Y a-t-il eu des changements importants dans la structure des exploitations (morcellement, main d'œuvre, équipements ...) qui ont influencé leurs choix de production et donc leur demande en eau ?
- Dans quel sens et dans quelle proportion ont évolué les superficies irriguées ? Y a-t-il eu des modifications des cultures irriguées ? Les pratiques et techniques d'irrigation ont-elles changé ?
- Quelles conditions de viabilité des exploitations avec une dynamique de prélèvement croissant d'eau ?
- Y a-t-il des inégalités d'accès à la ressource ? Sont-elles augmentées ou diminuées dans la période récente ? Cela amène-t-il au développement d'échanges d'eau entre exploitations ?
- Ces changements globaux engendraient-ils une nouvelle image de la diversité des exploitations agricoles dans la plaine?

L'analyse typologique a pour but de prendre en considération la diversité des exploitations dans la région et d'identifier des types caractéristiques d'un mode de fonctionnement : avec leurs propres structures, leurs modalités d'accès à la ressource, leurs besoins en eau selon l'assolement retenu...

La présence d'un inventaire d'exploitations et d'une enquête technicoéconomique réalisée par l'IRD en 2005 sur la même zone de notre étude nous a permis de dépasser l'analyse statique

des exploitations vers une approche dynamique basée sur l'analyse des trajectoires des exploitations agricoles ce qui nous permet d'explicitier :

- Quelles sont les stratégies adoptées par les exploitations agricoles pour s'adapter aux changements qu'a connue la plaine de Kairouan en une décennie ?

2. REVUE DES METHODES D'ELABORATION DES TYPOLOGIES D'EXPLOITATIONS

2.1. Principes et applications dans la région du kairouanais

Une typologie est une démarche méthodologique consistant à étudier une population en dégagant de la diversité des situations individuelles un nombre réduit de types qui en présentent des caractéristiques clés communes (Perrot et Landais, 1993). Le terme typologie désigne à la fois la démarche (science d'élaboration de types) et le résultat (l'agencement des différents types que l'on obtient en suivant cette procédure) (Jamin *et al.*, 2007). Les variables utilisées et les démarches d'élaboration des typologies sont très variables dans la littérature et dépendent des objectifs de la typologie. En effet, dans une zone donnée, il n'y a pas une seule typologie d'exploitations agricoles possible. Selon les objectifs et les moyens mis en œuvre, différentes typologies peuvent être élaborées.

L'exploitation agricole (unité de production) est un système complexe caractérisé par la diversité des éléments qui la compose et des relations qui relient ces éléments entre eux et avec les composantes du milieu extérieur (autres exploitations, marchés, institutions, environnement physique, etc.). Ces types de relations spécifient chaque exploitation et la distinguent des autres (Perrot, 1990). Pour cette raison, l'étude de la diversité des exploitations doit être réalisée dans le cadre d'une approche systémique, qui a pour ambition de rendre compréhensible une réalité complexe. Elle se base sur deux principes :

- L'exploitation agricole est vue comme un système, ce qui consiste à comprendre les différentes interactions entre les éléments qui la composent et qui sont capables de l'influencer, ainsi que le fonctionnement et la dynamique de chaque élément.
- « Les agriculteurs ont des raisons de faire ce qu'ils font » (Brossier, 1980) : les agriculteurs possèdent un savoir empirique et une connaissance approfondie du milieu dans lequel ils évoluent, qui comporte des contraintes et des atouts qui orientent leurs choix.

La construction d'une typologie implique d'identifier une clé typologique constituée par des variables discriminantes qui peuvent distinguer les différents types. Le choix de ces variables dépend de l'objectif de la typologie. Elles peuvent relever des critères de structure des exploitations ou des spécificités de son fonctionnement (Blanvillain *et al.* 2011). Ces critères peuvent être identifiés à partir d'enquêtes de terrain approfondies ou en se basant sur les dires des experts.

La clé typologique permet de définir des types qui caractérisent des groupes d'exploitations agricoles homogènes au regard d'un ensemble de critères qui définissent leurs processus de

production, la disponibilité des facteurs de production et les contraintes qui pèsent sur leur fonctionnement. On ne pourra s'affranchir d'une certaine hétérogénéité interne aux types du fait des difficultés à approcher certains éléments de fonctionnement (Blanvillain et al. 2011) mais il convient de limiter le nombre de types identifiés, pour faciliter la caractérisation d'une situation agricole régionale et l'analyse des trajectoires d'évolution.

Dans la littérature les travaux sur la typologie des exploitations irriguées sont multiples, ils permettent de constituer une idée sur les variables à étudier (clés typologiques) dans des recherches liées à la gestion et l'estimation de la demande en eau des exploitations agricoles.

En Tunisie, Dans le bassin versant de Kairouan, plusieurs typologies d'exploitations agricoles ont été réalisées : Dans le cadre du programme MERGUSIE (MERguellil : Ressources, Gestion et USages Intégrés) une première phase d'étude, de 1998 à 2001, a permis d'acquérir des connaissances sur la zone d'étude. Une première typologie a été réalisée dans le cadre de la thèse de Sarah Feuillette (Feuillette 2001), l'analyse de la diversité des exploitations a notamment montré la dynamique de multiplication des puits et d'extension des surfaces irriguées. Les variables utilisées étaient des variables d'assolement. Une autre étude a été réalisée sur la même base de donnée pour explorer les dynamiques entre ressources et usages de l'eau pour une gestion intégrée de la nappe souterraine de Kairouan en utilisant un modèle de simulation (Olympe) et un modèle multi-agents (SINUS),(Kadi et al. 2003).

Durant la seconde phase du programme, en 2005 une autre typologie d'exploitations a été réalisée par JC poussin (Poussin, Benmihoub, et Beji 2007), qui avait pour objectif de mesurer l'impact de la généralisation des techniques d'irrigation économes en eau sur l'évolution de la demande en eau agricole et sur sa valorisation. Les variables utilisées sont : la superficie totale, la superficie cultivée, la superficie irriguée et la composition de l'assolement (association culturales et culture pures). Sur la même base de données (2005) une autre typologie d'exploitation a été réalisée par Ahmed Ben Mihoub (Benmihoub 2005). Il a constitué ses types en se basant sur des variables de structure : (i) le capital foncier (la superficie totale) et son accès (mode de faire valoir) ; (ii) la ressource en eau et l'équipement d'irrigation (mode d'accès à l'eau, nombre et nature des forages, techniques d'irrigations) ;(iii) le capital technique et financier, (nature des équipements, passif des exploitations (crédit bancaire, crédit fournisseur) ; (iv) la main d'œuvre. Quant aux variables de fonctionnement, le système de production était composé de plusieurs systèmes de cultures pérennes et annuelles en plein champ et associées. Une autre étude a été réalisée en 2003 (Kefi et al. 2003) pour évaluer le fonctionnement des PPI de la délégation Chebika et leurs réponses à différents modes de tarifications, suivi d'une comparaison de la valorisation de m³ d'eau via la construction d'une typologie. Les critères utilisés sont l'appartenance au PPI, la superficie totale et les cultures pratiquées majoritairement. Les résultats montrent que 55% des exploitations présentent une valorisation d'eau nettement supérieure au tarif appliqué en 1999.

En 2012, Martine Mauline (Mauline 2012), dans l'objectif d'évaluer les systèmes de cultures du secteur Abida par analyse de cycle de vie, a identifié 5 types d'exploitations en précisant les

différents systèmes de culture observés dont nous nous sommes inspirés dans l'identification de nos systèmes de culture.

En 2013 dans le cadre du projet Améthyste (Assessment of changes in MEdiTerranean HYdroresources in the South: river basin Trajectories -évolution conjointe des ressources et des usages de l'eau en Méditerranée), Malek Ghileb, au cours de son mémoire de master (Ghileb 2014), et en vue d'identifier les stratégies d'adaptation des irrigants aux changements globaux et l'impact sur la demande en eau dans le secteur Chebika de la plaine de Kairouan, elle a constitué une typologie des exploitations qui a été construite en fonction des variables suivantes : La superficie totale, la part en propriété, le type de contrat en faire valoir indirect, mode d'accès à l'eau (GDA, puits-sondage, forage), main d'œuvre permanente en temps plein, part des salariés permanents, présence ou non d'une activité non agricole, soutien financier (épargne, revenu d'émigration, salaires, subvention étatique), le nombre d'UGB et les différents systèmes de culture.

Les différentes analyses issues de cette typologie n'ont pas pris en compte l'aspect historique, elles se sont limitées à donner des constatations instantanées.

2.2. Finalité de la typologie des exploitations agricoles

Dans le domaine agricole, le développement des typologies d'exploitations appliquées aux problèmes d'adoption d'innovations en France s'est répandu dans les années 1970 avec les travaux de l'INA-PG (Capillon *et al.*, 1975; Capillon et Manichon, 1978) et de l'Inra (Brossier et Petit, 1977), (Gafsi et al. 2007).

La typologie d'exploitation est un outil qui peut être utilisé dans plusieurs finalités :

Elle permet de comprendre et d'analyser un contexte agricole en identifiant les opportunités présentes et les contraintes qui pèsent sur le fonctionnement de chaque type d'exploitation ainsi elle facilite les interventions techniques qui permettent d'élaborer des gammes de solutions adaptées à chaque classe identifiée (Landais, 1996).

Le découpage du panorama agricole d'un territoire et la réduction de sa diversité d'unités de production à quelques types homogènes, facilite les interventions du conseil agricole aux exploitations cibles et oriente la planification des opérations de développement nécessaires à chaque catégorie. Citant ici les travaux de Christophe Perrot (Perrot, Landais, et Pierret 1995) où la typologie des exploitations était mobilisée pour faciliter l'intervention de conseil agricole et de développement de la filière d'élevage dans le département de Haute-Marne.

La typologie d'exploitations constitue aussi un outil statistique utile dans le domaine des politiques agricoles pour appréhender la diversité au sein d'une communauté rurale et adapter les décisions publiques aux attentes sociétales (Jouve, 1986). Cela était l'objet du groupe de travail « typologie des systèmes d'exploitation », constitué en 2010 dans le cadre du projet « Références Systèmes » qui vise la constitution progressive d'observatoires régionaux des systèmes d'exploitation qui se base sur la construction des typologies régionales qui ont été après agrégées dans un cadre national afin d'avoir une lecture partagée de la diversité nationale et territoriale (Blanvillain et al. 2011).

Les typologies sont également utilisées à des fins prospectives, en effet elles permettent d'explorer les effets possibles des politiques agricoles sur les performances des exploitations et aussi sur les ressources naturelles auxquelles elles accèdent. Cette finalité renforce l'intérêt de prendre en compte la typologie comme un outil d'aide à la décision pour une meilleure évaluation des politiques agricoles (Landais, 1996). Dans ce contexte on peut citer les travaux de Pierre Chopin en Guadeloupe (Chopin et al, 2015), qui a construit une typologie des exploitations qui a permis d'alimenter un modèle bioéconomique (MOSAICA) (Chopin et al, 2017) et de simuler l'impact des innovations dans les systèmes de culture et les effets des politiques agricoles.

2.3. Les méthodes typologiques

On distingue deux grands types de typologie d'exploitations agricoles : 1) les méthodes d'inventaire et de classification à vocation de connaissance d'une diversité reposant sur une analyse statistique et descriptive simple, et 2) les méthodes clairement orientées vers l'action et qui ont des objectifs précis fixés à l'avance visant à assurer le développement agricole et rural (Perrot, 1990). Dans ce dernier groupe de méthodes, celles qui produisent des typologies à dire d'expert, de structure et de fonctionnement tiennent une place privilégiée.

➤ Les typologies à dire d'experts

Elles s'appuient sur leurs connaissances souvent approfondies des exploitations et de leur fonctionnement. Elles consistent à identifier à l'aide d'experts des pôles d'agrégation (Perrot, 1990) définis par des indicateurs et des seuils qui synthétisent les caractéristiques essentielles de différents groupes d'exploitations. Chaque exploitation est alors affectée à un pôle. Ce type de typologie permet d'analyser des populations de très grande taille. De plus, il est bien adapté pour traiter des questions de développement agricole (évaluation des politiques, tester des instruments, cibler les zones d'intervention...). Cependant, il présente un risque de biais important lié aux préjugés que peuvent avoir ces agents sur la situation.

➤ Les typologies de structure

Elles caractérisent les facteurs de production disponibles dans les exploitations agricoles (la superficie, le niveau d'équipement, les cheptels...) sans entrer dans les détails de la stratégie de fonctionnement. Elles permettent d'obtenir une photographie à un moment donné privilégiant le critère de dimension des exploitations. Les données de structure en général de type quantitatif se prêtent bien à des analyses statistiques informatisées.

➤ Les typologies de fonctionnement

Elles visent à analyser puis à classer les processus de production et de prise de décision dans les exploitations. Allain et Sebilotte en 1991 définissent le fonctionnement d'une exploitation comme l'enchaînement de prise de décisions de l'agriculteur et de sa famille dans un ensemble de contraintes et d'atouts en vue d'atteindre des objectifs qui régissent des processus de production. Ce concept amène à différencier plusieurs niveaux d'objectifs de l'agriculteur : un niveau global traduisant les objectifs généraux de l'agriculteur en termes de revenu, de travail et d'avenir de l'exploitation, un niveau stratégique déterminant les principales orientations à

moyen terme incluant le choix de productions, leur degré d'intensification, les principaux moyens de production et un niveau tactique concernant les décisions à court terme.

La construction d'une typologie de fonctionnement ne peut pas se faire de façon automatique, elle doit être raisonnée par rapport à un modèle synthétique de fonctionnement qui caractérise la région ou la zone d'étude et qui oriente et guide le mode opératoire à adopter pour rendre compte de la diversité des situations. On doit donc tout d'abord adopter un schéma général de fonctionnement qu'on essaie ensuite d'appliquer à toutes les exploitations tout en précisant les spécificités de chaque type qui amène à la définition des sous-modèles de fonctionnement adaptés à chaque type (Jamin *et al.*, 2007).

Le traitement des données pour la typologie de structure et de fonctionnement se fait dans la plupart des cas en se basant sur des analyses statistiques multivariées. Les principaux inconvénients de ces méthodes sont de deux ordres : (i) le choix arbitraire des variables ou des modalités pour caractériser les types ; (ii) la non-prise en compte de la dimension historique.

S'il est certes difficile de dégager des trajectoires d'évolution à partir d'une typologie instantanée, on peut toutefois émettre des hypothèses sur des logiques d'évolution ou du moins dégager des filiations entre types à partir de l'analyse des proximités des types sur le plan factoriel (Alary *et al.*, 2002).

2.4. La prise en compte des dynamiques dans les typologies

Malgré leur évolution, les méthodes typologiques qui prennent en compte les concepts de trajectoire d'évolution ne sont pas nombreuses (Alary *et al.*, 2002) vu la difficulté de collecter des informations sur l'historique des exploitations, en effet l'agriculteur ne se souvient pas de toutes les informations sur une longue période, il ne peut donner que les grandes lignes d'évolution de son exploitation. La possibilité la plus fréquentes pour analyser l'historique des exploitations, c'est de mobiliser des anciennes typologies (des données de panel ou des données pour deux dates différentes) ce qui n'est pas toujours possible vu le changement dans la composition de l'échantillon, la nature elle-même des données collectées.

Dans une même région, chaque exploitation a sa propre histoire, fruit d'une combinaison de facteurs liés au vieillissement naturel de la famille, à la dynamique propre de l'exploitation, aux évolutions locales et aux changements plus globaux : Le processus de succession des exploitations peut conduire au morcellement. Une sécheresse ou une dégradation d'une ressource naturelle peut affecter la production agricole et la situation financière des exploitations, une réhabilitation d'un PPI ou une révision de la politique de prix peut assurer une extension des superficies irriguées et une transition économique des agriculteurs... Ces facteurs ne jouent pas directement sur l'évolution des exploitations, ils présentent plutôt des opportunités que l'agriculteur pourra saisir ou non et/ou des contraintes auxquelles il devra s'adapter.

On distingue différentes méthodes d'analyse des trajectoires des exploitations agricoles :

➤ **Des outils statistiques et économétriques :**

En 2015 Pierre Chopin (Chopin et al. 2015) ont eu recours à l'analyse des trajectoires des exploitations pour évaluer l'évolution du système agricole en Guadeloupe. Partant d'une base de donnée multi-annuelle (5ans) comprenant des données sur les allocations culturelles, la structure économique et le contexte biophysique des exploitations, une analyse en composante principale a été effectuée pour réduire le nombre des variables et éviter les problèmes de multicollinéarité. Après l'identification des variables discriminantes, une classification hiérarchique ascendante a été effectuée suivie d'un partage de la population en groupe homogène par la méthode de Ward pour minimiser la variabilité intra groupe et maximiser celle intergroupe. L'allocation d'une exploitation à un type est effectuée selon des seuils générés par un arbre de régression (CART). Le passage d'une exploitation d'un type à un autre pour chaque année d'étude permet d'identifier la tendance d'évolution de chaque type et les transitions agricoles responsables des tendances significatives. Les exploitations sont localisées ce qui permet de tracer une carte et de mener une analyse d'autocorrélation spatiale et accorder une variable binaire pour chaque exploitation. Cette variable renseigne si l'exploitation a eu un changement significatif ou non. Enfin les exploitations qui connaissent des changements significatifs sont sélectionnées pour effectuer la régression entre le score d'autocorrélation spatiale de chaque exploitation et les déterminants de changement.

➤ **Des outils basés sur l'analyse des changements agraires :**

Meriem Baccar (Baccar et al. 2017), a étudié les trajectoires d'évolution des exploitations agricoles dans la plaine de Saïs au Maroc. Elle a collecté en 2014 des données sur 40 exploitations représentatives de la diversité existante dans cette plaine. Elle a pu aussi collecter des informations économiques détaillées sur 20 exploitations qui ont permis de calculer leurs marges brutes globales (MBG). Cette base de données est complétée par une enquête qui sert à découvrir l'historique de ces exploitations et les principaux événements qui sont apparus depuis 1970. L'analyse de la diversité impliquait la construction de deux typologies une concernant l'état actuel de 40 exploitations en se basant sur 3 critères (la structure de l'exploitation, les choix de production et l'accès à l'eau souterraine) et l'autre basée sur leurs voie de développement depuis 1970.

L'analyse a porté sur les facteurs internes du changement des exploitations (propriété foncière, main-d'œuvre, équipement, production) et les moteurs externes du changement ont été caractérisés en comparant les fermes dans un seul type de voie (trajectoire) aux autres appartenant à d'autres types tout en considérant l'environnement extérieur comme un contexte partagé par toutes les exploitations.

➤ **Des outils de représentation graphique :**

C'est une démarche qui a été appliquée pour la première fois dans le département de la haute marne et qui a conduit à l'élaboration d'une nouvelle méthode de construction et d'actualisation des typologies des exploitations laitières (Perrot, Landais, et Pierret 1995). Cette méthode est basée sur la construction des pôles d'agrégation définies par des experts en fonction de différents indicateurs. Des coefficients de ressemblance à chaque pôle sont calculés pour chaque exploitation. L'exploitation est enfin affectée au pôle dont son coefficient de

ressemblance est le plus fort. Après une analyse factorielle (ACP) est réalisée sur la matrice des coefficients de ressemblance permettant ainsi de construire un espace de représentation commun à l'ensemble des exploitations en 1987. Pour reconstruire l'image des mêmes exploitations en 1992, ils ont projeté sur le même plan en individu supplémentaire les exploitations de 1992. La variation des coefficients de ressemblance entraîne un déplacement de son image sur le plan factoriel. La longueur du vecteur qui relie les deux images d'une même exploitation au deux dates permet de repérer les trajectoires les plus significatives qui ont été ensuite analysées en remontant à leur cause via des variables discriminantes.

➤ **Des outils participatifs :**

Dans le cadre du projet ARENA (GroundWater Economy, Gouvernance des eaux souterraines au Maghreb), Housseem Braiki a analysé les trajectoires d'évolution des exploitations agricoles dans le territoire El Hammem qui fait partie du secteur Karma (Braiki 2013), sa méthodologie était basé sur des outils participatifs qui combinent les savoirs empiriques avec les savoirs scientifiques ce qui lui a permis de confronter deux typologies : une typologie à dire d'expert et une typologie auprès des exploitations basée sur des enquêtes de terrain et élaborée en fonction de la perception des agriculteurs de leur territoire (méthode des capitaux de la banque mondiale). En se basant sur les dires de ces acteurs, il a identifié les transformations observables des pratiques des exploitations agricoles en mettant en œuvre une chronique de facteurs de ruptures qui ont conduit au changement. Ceci lui a permis de construire un modèle de trajectoire des exploitations. Ensuite, il a étudié les réorganisations globales qui ont amené aux changements identifiés antérieurement et qui lui ont permis de développer un modèle de trajectoire territoriale.

L'échelle géographique de notre zone d'étude nous ne permet pas d'utiliser la méthodologie basée sur l'approche participative vue la multiplicité des acteurs et la complexité du paysage agricole qui se distingue d'un secteur à un autre. La collecte des données auprès des exploitations offre à notre typologie une meilleure rigueur que celle basée sur les dires des experts et l'affectation à des pôles d'agrégation prédéfinis. Encouragé par la présence d'une base de données détaillées en 2005 que nous avons actualisé en 2015, nous nous sommes plutôt orientés vers des analyses statistiques multivariées qui nous permettent de construire les deux typologies, d'identifier les transitions d'un type à un autre, de quantifier ces changements et de chiffrer les différents indicateurs explicatifs de ces transitions spécialement ceux liés à l'accès à la ressource en eau tout en faisant la liaison avec le contexte socioéconomique de la zone. Notre méthodologie est expliquée brièvement dans la partie suivante.

Quel que soit les outils mobilisés pour étudier les trajectoires des exploitations agricoles, la compréhension des dynamiques passées des exploitations agricoles reste utile pour comprendre leur fonctionnement actuel et pour pouvoir bâtir des scénarios d'évolution de ces exploitations. L'histoire peut servir à affiner une typologie, à replacer les types actuels sur une trajectoire d'évolution et à identifier les scénarios d'évolution possibles pour les différents types d'exploitations d'une région (Capillon et Manichon, 1988; Capillon, 1993). Cela permet d'assortir les typologies créées à une dynamique d'évolution.

3. APPROCHE METHODOLOGIQUE

L'approche adoptée dans cette recherche a consisté à réaliser un recensement agricole couvrant la zone d'étude qui permet de donner une vision globale de la zone et à élaborer une enquête pour être en mesure ensuite de conduire une analyse multivariée nous permettant alors de définir une typologie d'exploitations. Le choix des questions posées et des exploitations enquêtées a été en partie dicté par le souci de permettre l'analyse des trajectoires des exploitations depuis une enquête initiale réalisée en 2005. Nous avons également veillé à identifier les nouveaux types d'exploitations également apparus.

3.1. Collecte des données et échantillonnage

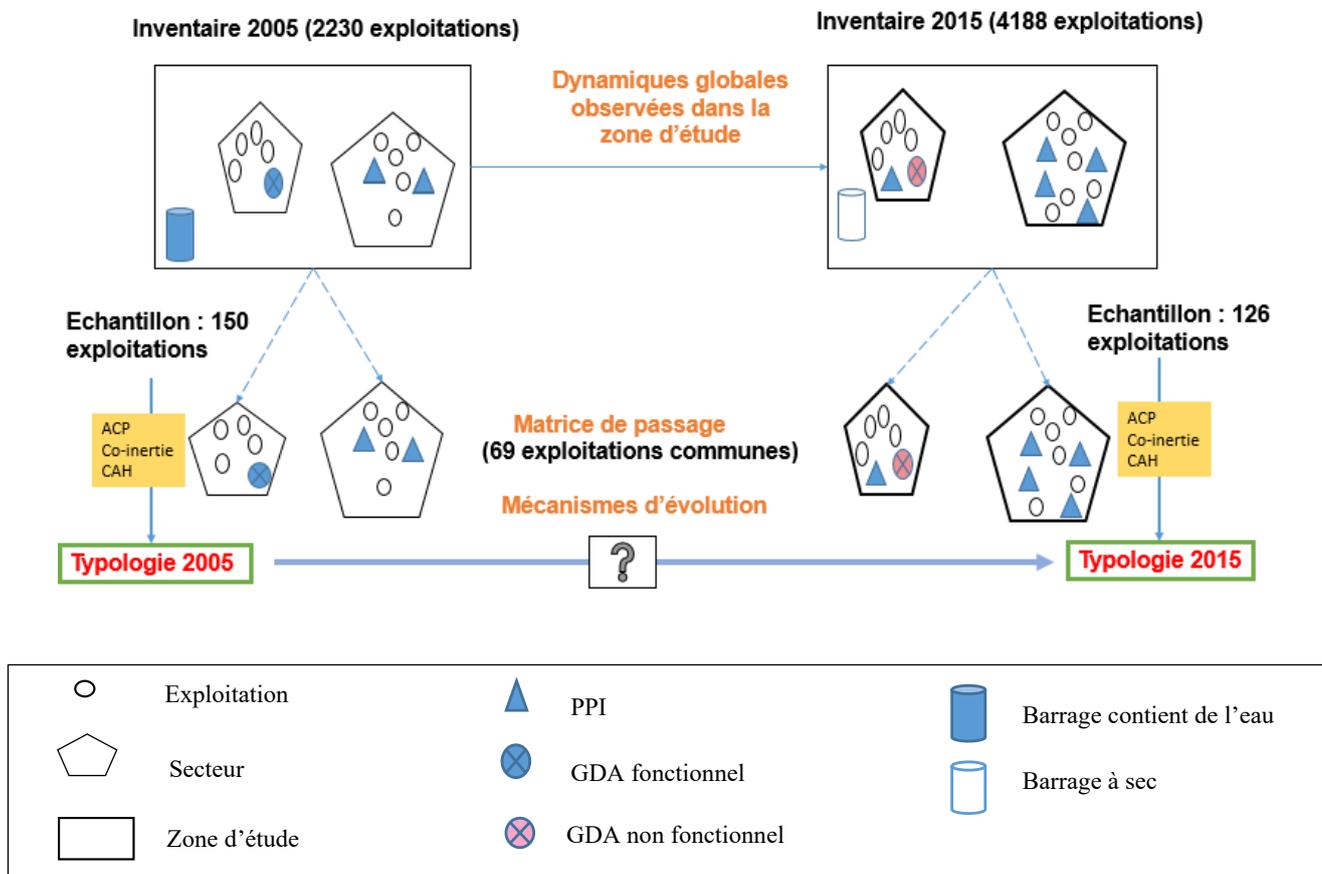
En 2015, dans le cadre du projet AMETHYST (Assessment of changes in MEdiTerranean HYdroresources in the South: river basin Trajectories -évolution conjointe des ressources et des usages de l'eau en Méditerranée), nous avons effectué un inventaire d'exploitations dans la partie du bassin-versant du Merguellil située à l'aval du barrage d'El Haouareb. La zone a été découpée par imada en 7 secteurs, ce qui a permis de croiser les résultats obtenus par l'enquête avec les données disponibles auprès du Commissariat Régional au Développement Agricole du gouvernorat de Kairouan (CRDA). Nous avons recensé 4188 exploitations. L'inventaire a été effectué avec l'aide de l'Omda (représentant de l'Etat dans chaque imada). Ce dernier a fourni pour chaque exploitation, les éléments clés de structure : le nom de l'exploitant, la taille de son exploitation (en ha), son statut foncier (propriétaire ou locataire), l'existence d'un revenu non agricole et le mode d'accès à l'eau (périmètre public irrigué, puits ou forage privé). Concernant l'orientation de la production, seule la présence ou l'absence des cinq principales productions (oliviers, céréales, maraîchage, arboriculture fruitière et élevage) a été recueillie.

Préssée par la contrainte temps, la réalisation de l'inventaire a été en parallèle avec le déroulement de l'enquête technico-économique, par conséquent la mobilisation des données de l'inventaire pour la construction de l'échantillon des exploitations à enquêter n'était pas possible. L'enquête a été conduite auprès d'un échantillon de 126 exploitations.

En 2005, dans le cadre du projet MERGUSIE, l'IRD a réalisé un inventaire des exploitations agricoles dans la même zone d'étude (Poussin *et al.*, 2008) en adoptant la même approche de terrain.

À partir de l'inventaire des exploitations de 2005, un échantillon de 150 exploitations a été sélectionné pour réaliser une enquête détaillée qui a permis de construire la typologie des exploitations en 2005. Les enquêtes ont concerné toutes les activités de production de l'exploitation : taille de l'activité en surface ou en effectif, consommations, notamment en eau d'irrigation et en travail avec leur répartition dans l'année, productions dégagées et prix de vente. Les puits ou forages utilisés ainsi que les matériels disponibles ont également été recensés.

Figure 4-1 : Approche méthodologique



Une classification automatique a été réalisée après une analyse en composantes principales effectuée sur ces variables décrivant les tailles, rapportées à la surface totale, des diverses activités de production. La classification a permis de distinguer 8 types d'exploitations selon la combinaison des productions, subdivisés en 18 sous-types selon la taille de l'exploitation.

La typologie construite par Poussin et ses collègues est basée surtout sur la combinaison des cultures et ne tient pas compte de la structure générale des exploitations et des modalités d'accès à l'eau. Elle ne rend pas non plus compte des échanges de facteurs de production entre les exploitations. Elle avait pour objectif de mesurer l'impact de la généralisation des techniques d'irrigation économes en eau sur l'évolution de la demande en eau agricole et sur sa valorisation. Nous avons pu valoriser cette enquête pour sélectionner l'échantillon d'exploitations enquêtées en 2015. Ces dernières sont réparties sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 4-2)

L'échantillon a été construit « en boule de neige » partant de l'échantillon de 2005 tout en identifiant les nouveaux types apparus en 10 ans de façon à représenter au mieux la diversité existante, surtout en termes de modalités d'accès à l'eau, des pratiques d'irrigation, des orientations culturelles et des contraintes qui pèsent sur le fonctionnement des exploitations et

qui influent sur leur prise de décision. Les principales caractéristiques de notre échantillon sont résumées dans le Tableau 4-1.

Figure 4-2 : Répartition géographique des exploitations enquêtées en 2015

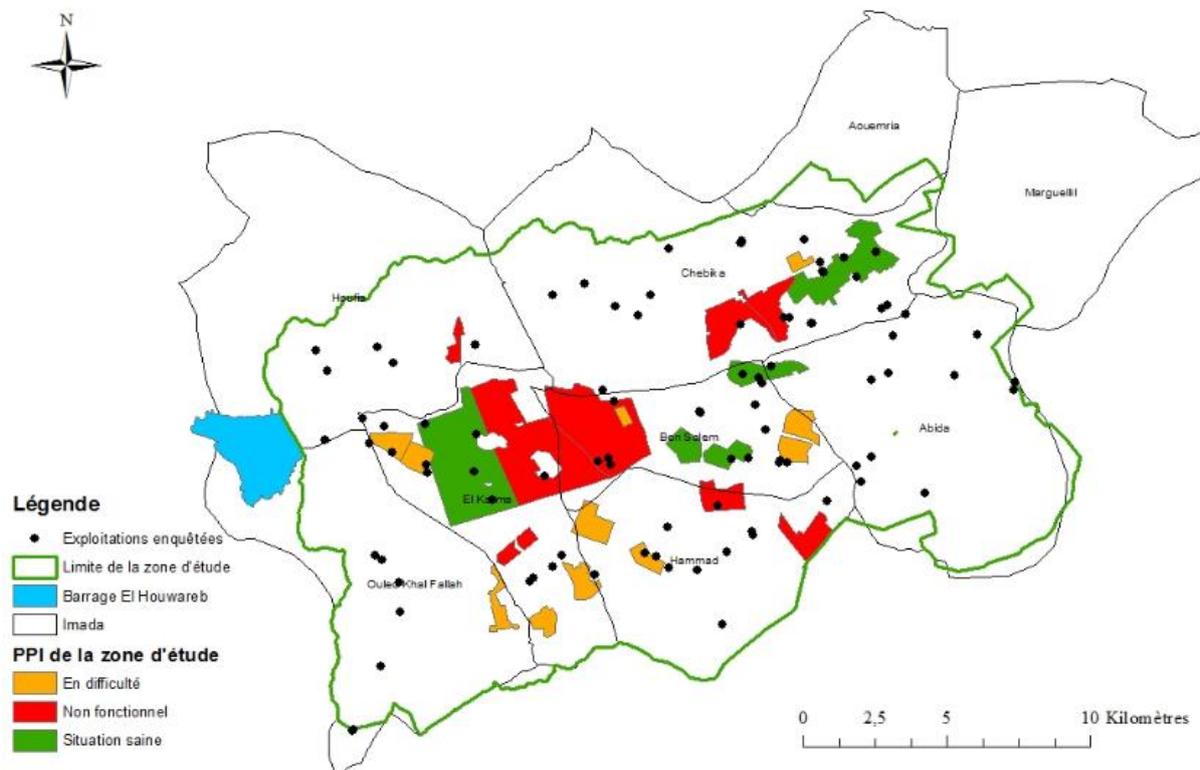


Tableau 4-1 : Nombre d'exploitations recensées et enquêtées en 2005 et 2015

Secteur	2005		2015		
	Recensées	Enquêtées	Recensées	Enquêtées	Déjà enquêtées en 2005
Chebika	400	31	1195	27	12
Ben Salem	272	25	538	20	14
Karma	262	24	922	26	9
Hammad	427	16	767	12	11
Houffia	190	17	143	10	8
Abida	296	26	517	22	12
OuledKhalfalah	383	11	106	9	8
Total	2230	150	4188	126 = 3% des exploitations recensées	69 = 55% des exploitations enquêtées

Sources : Poussin et al., 2008 pour l'inventaire et l'enquête 2005, Inventaire et enquêtes réalisés par Amal Azizi pour 2015

L'enquête a porté sur l'histoire de l'exploitation, les structures actuelles de production (superficies, modes de faire-valoir, équipement, notamment équipement d'irrigation, main d'œuvre), le système de production (cultures par saison et productions animales pratiquées), la destination des productions (autoconsommation, vente), le financement (revenus non agricoles, crédit, épargne), l'organisation technique de l'irrigation, les contraintes, notamment celles liées à l'eau et les projets de l'agriculteur. Les enquêtes ont été conduites sur les parcelles de l'exploitation, d'une part pour pouvoir examiner de près les systèmes de culture, cela nous permet de vérifier sur le terrain les réponses des agriculteurs et se poser des questions sur la spécificité de chaque exploitation, d'autre part pour prendre des relevés de coordonnées géographiques. Le recueil des données a été en une ou deux fois selon la diversité des systèmes de culture, la parcellisation et aussi la disponibilité des exploitants sur parcelles. Les données recueillies ont été saisies dans une base de données Access. L'appariement des enquêtes de 2015 et 2005 a permis de spécifier les trajectoires d'évolution des exploitations sur cette période (une décennie)

3.2. Analyse multivariée

Une analyse multivariée sur les deux bases de données d'enquête 2005 et 2015 a été réalisée en vue de construire une typologie des structures et du fonctionnement (assolement). Plutôt que de reprendre telle quelle la typologie proposée par Poussin et ses collègues, nous avons choisi de reconstruire une nouvelle typologie des exploitations sur les données de 2005, basée sur un jeu de variables commun à l'enquête de 2015, afin de pouvoir la comparer plus facilement les deux typologies. En particulier nous avons analysé la structure des exploitations en 2005, ce qui n'avait pas été mis en avant par Poussin et ses collègues.

La construction d'une typologie implique d'identifier une clé typologique pour classer les différents types d'exploitations. La diversité des exploitations peut être abordée de divers points de vue, donc toute typologie doit être orientée par un objectif : dans notre cas il s'agit de comprendre la stratégie de production des agriculteurs (choix de cultures et de techniques notamment d'irrigation) compte tenu de leurs ressources et leurs contraintes. De cet objectif découlent les variables retenues. Le choix des variables pertinentes était basé sur la réflexion théorique et les observations empiriques sur les processus de décision dans les travaux antérieurs. Ce choix était d'ailleurs sous-jacent dès la construction du questionnaire d'enquête.

Pour tester la significativité des variables et leur caractère discriminant, nous avons opté pour une série d'ACP (Analyse en composantes principales), en utilisant le logiciel R. Ces variables caractérisent la structure de l'exploitation et les systèmes de production.

Les variables finalement retenues sont résumées dans le Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Les variables utilisées dans la construction des typologies

2015	2005
Variables décrivant les facteurs de production	
S_tot: superficie totale (physique) Nb_Salp: nombre de salariés permanents MOF : main d'œuvre familiale ⁽²⁾ R_extra: revenu extra agricole ⁽³⁾ Equip: niveau d'équipement ⁽⁴⁾ UGB: unité de gros bétail P_Sirrig: pourcentage de superficie irriguée dans la superficie totale P_GDA: pourcentage de la superficie irriguée par GDA par rapport à la superficie totale P_Fprive: pourcentage de la superficie irriguée par forage privé par rapport à la superficie totale P_GAG: pourcentage de la superficie irriguée par goutte-à-goutte par rapport à la superficie irriguée S_ASP: superficie irriguée par aspersion (en ha) T_intensification: taux d'intensification culturale ⁽⁶⁾	S_tot: superficie totale (physique) MOS: Main d'œuvre salariée ⁽¹⁾ R_extra: revenu extra agricole ⁽³⁾ Equip: niveau d'équipement ⁽⁵⁾ UGB: unité de gros bétail P_Sirrigable : pourcentage de superficie irrigable dans la superficie totale P_GDA: pourcentage de la superficie irriguée par GDA par rapport à la superficie totale Nb_Fprive: nombre de forages privés P_GAG: pourcentage de la superficie irriguée par goutte-à-goutte par rapport à la superficie irriguée T_intensification : taux d'intensification culturale
Variables d'assolement (en ha)	
O_sec: olivier en sec GC_sec: grande culture en sec GC_irrig: grandes cultures irriguées O_irrig: olivier irrigué A: arboriculture fruitière M: maraîchage O_A: association olivier-arboriculture fruitière O_M: maraîchage en intercalaire avec l'olivier O_GC: grande culture en intercalaire avec l'olivier NC : superficie non cultivée	O_sec: olivier sec GC_sec: grande culture sec GC_irrig: grandes cultures irriguées O_irrig: olivier irrigué A: arboriculture fruitière M: maraîchage O_A: association olivier-arboriculture fruitière O_M: maraîchage en intercalaire avec l'olivier O_GC: grande culture en intercalaire avec l'olivier NC : superficie non cultivée

Notes :

⁽¹⁾ Main d'œuvre salariée : 0 : néant, 1 : saisonnière, 2 : saisonnière et permanente

⁽²⁾ Main d'œuvre familiale : nombre des personnes travaillant à temps complet sur l'exploitation + 0,5 * nombre de personnes travaillant à temps partiel sur l'exploitation

⁽³⁾ Revenu extra agricole : 0 : pas de revenu extra agricole, 1 : avec un revenu extra agricole

⁽⁴⁾ Niveau d'équipement : 0 : Pas d'équipement, 1 : Petit outillage et équipement d'irrigation, 2 : tracteur ou voiture et/ou autres outils et équipements, 3 : tracteur, voiture et autres outils

⁽⁵⁾ Niveau d'équipement : 0: petit outillage, 1 : tracteur avec remorque, 2 : tracteur avec remorque + machines

⁽⁶⁾ taux d'intensification = surface développée/ superficie totale. Dans la surface développée, un hectare portant une seule culture dans l'année est compté pour un hectare et un hectare portant deux cultures successives dans l'année compte pour 2 ha. Un hectare planté d'arbres compte pour un hectare même s'il y a plusieurs espèces cultivées

Pour les variables de structure, nous avons essayé de caractériser les grandeurs d'échelle des exploitations (superficie totale, UGB...), ainsi que le niveau d'équipement. Les autres variables caractérisent le potentiel d'irrigation des exploitations (source d'eau, technique d'irrigation).

On fait l'hypothèse que la structure de production (les facteurs disponibles) oriente les choix de cultures et de techniques associées.

L'enquête a mis en évidence une très grande diversité de systèmes de cultures plus ou moins intensifs, avec des cultures cultivées soit seules soit en association, et souvent plusieurs cultures se succédant sur la même parcelle au cours de l'année. Pour simplifier cette diversité et comparer plus facilement avec les données disponibles en 2005, qui étaient moins détaillées, nous avons été amenés à faire des regroupements de cultures en distinguant les principales spéculations (olivier, arboriculture, maraîchage, grandes cultures) et les associations culturales, tout en différenciant entre sec et irrigué.

Cette dichotomie (structure et fonctionnement) découlant d'une approche analytique des exploitations, permet de dégager les traits marquants de différenciation entre exploitations sur chacune de ces deux facettes. Une analyse en Composantes Principales sur chaque thème (structure et assolement) est d'abord réalisée pour identifier des types homogènes ; elle est complétée par une analyse de co-inertie des deux thèmes pour dégager les relations entre structure et assolement. L'analyse de co-inertie est une méthode de couplage entre deux tableaux utilisée pour déterminer des axes factoriels de différenciation communs à deux tableaux et ainsi exprimer la corrélation entre deux structures de tableaux. Sur ces axes communs peuvent être projetées les variables de chaque tableau pour montrer leur influence réciproque, et les coordonnées des exploitations vues sous l'angle de chaque tableau. La superposition sur le même plan factoriel de co-inertie, des coordonnées des variables, ou des individus statistiques (exploitations), pour d'une part le tableau « Structure », d'autre part le tableau « Assolement », permet d'afficher des écarts de positions qui révèlent (i) les corrélations entre variables des deux thèmes (quelles variables de structure sont associées à une orientation d'assolement) et (ii) les corrélations entre coordonnées des exploitations selon qu'elles soient caractérisées par la structure ou par l'assolement. Une proximité de position pour chaque exploitation, sur le graphe des axes de co-inertie révèle une robustesse de la typologie des exploitations (faible variabilité intra-groupe), dans la mesure où les deux angles de vues « Structure » et « Assolement » sont convergents. Cette variabilité intra-groupe s'exprime par le coefficient de corrélation des deux systèmes de coordonnées des exploitations (vues par la Structure et par l'Assolement) sur les axes de co-inertie. Les écarts de position des exploitations sur les axes communs révèlent la robustesse des types (variabilité intra-groupe) en considérant les deux thèmes. Le logiciel ADE4 a été utilisé à cette fin.

Pour chacune des années 2005 et 2015, nous avons réalisé ensuite une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des exploitations sur les coordonnées factorielles des exploitations dans l'ACP sur les variables de structure, avec la méthode de Ward¹⁵.

¹⁵ La distance de Ward entre deux groupes a et b est égale à $\frac{n_a n_b \cdot d^2(a,b)}{n_a + n_b}$ avec n_a et n_b , les effectifs des deux groupes. La méthode d'agrégation de Ward consiste à regrouper les éléments de façon à minimiser la distance de Ward, c'est-à-dire à minimiser la perte d'inertie inter-classes résultant de l'agrégation (Lebart *et al.*, 2000).

3.3. Analyse des trajectoires individuelles des exploitations

La disponibilité des deux bases de données de 2005 et 2015 sur les exploitations de la zone d'étude permet de dépasser la simple photographie instantanée de la diversité des exploitations. En effet, l'échantillon d'exploitations enquêtées, en partie commun entre les deux dates, permet d'analyser les trajectoires d'évolution et les facteurs qui en sont à l'origine des types. Pour cela nous avons adopté une approche diachronique, qui comporte un double avantage : d'une part, elle introduit l'histoire dans l'analyse, ce qui permet au chercheur d'avoir un regard comparatif et par là, de renforcer la portée de ses interprétations. D'autre part, elle invite à rompre avec la conceptualisation statique de la typologie des exploitations en faisant apparaître le caractère évolutif de ces dernières, ce qui offre une plus grande rigueur en matière de généralisation.

L'information contenue dans la base de données de 2005 fournit une situation de référence qui, par comparaison avec celle de 2015, permet de caractériser précisément l'évolution des exploitations en place. Nous avons ainsi élaboré une matrice de passage des exploitations communes aux deux enquêtes de 2005 et 2015 sur laquelle nous nous appuyons pour caractériser la dynamique d'évolution des exploitations.

4. RESULTATS

Dans cette partie, nous allons caractériser dans un premier temps les dynamiques globales de la zone d'étude qui ressortent de l'analyse des inventaires et des enquêtes technico-économiques. Nous précisons ensuite les variables discriminantes qui permettent d'expliquer la variabilité entre les types d'exploitations en 2005 et 2015. Puis les classes identifiées sont décrites en précisant la situation de chaque type vis-à-vis de la ressource et en spécifiant les caractéristiques de leur système de production. Enfin, nous explicitons les évolutions qui ont eu lieu et les stratégies adoptées par les agriculteurs pour s'adapter aux changements en une décennie.

4.1. Dynamique globale de la zone d'étude entre 2005 et 2015

4.1.1 Entre la stabilité de la superficie totale et le morcellement des exploitations

La comparaison des inventaires d'exploitations réalisés en 2005 et 2015 permet de mesurer l'évolution des effectifs et des superficies par imada Tableau 4-3. La superficie agricole globale reste stable, mais le nombre d'exploitations a presque doublé conduisant à une division par deux de leur superficie moyenne, qui passe de près de 8 ha en 2005 à moins de 4 ha en 2015. Près de la moitié des exploitations ont moins de 2 ha.

Tableau 4-3 : Evolution des effectifs et superficies des exploitations par imada entre 2005 et 2015

Imada	2005			2015		
	Effectif	Superficie	Superficie moyenne	Effectif	Superficie	Superficie moyenne
	-	ha	ha	-	ha	ha
Abida	296	2505	8.5	517	3536	6.8
Chebika	400	1927	4.8	1195	3659	3.1
El Karma	262	2881	11.0	922	3539	3.8
Hammad	427	2806	6.6	767	2832	3.7
Houfia	190	2501	13.2	143	1063	7.4
Ouled Khalfallah	383	1526	4.0	106	410	3.9
Sidi Ali Ben Salem	272	2935	10.8	538	1454	2.7
Total	2230	17081	7.7	4188	16493	3.9

Source : Poussin et al., 2008 pour 2005 ; inventaire réalisé par Amal Azizi pour 2015

Ce morcellement peut s'expliquer principalement par la division des exploitations familiales entre les héritiers à chaque génération, mais aussi par l'installation de nouveaux agriculteurs. Ces derniers sont soit des personnes originaires de la région qui y reviennent après avoir accumulé des capitaux hors de l'agriculture et à l'extérieur de la zone, soit des migrants venus d'autres régions. Selon les entretiens effectués avec les agriculteurs la proportion de ces nouveaux investisseurs reste faible. En effet le marché foncier (achat/vente) est faiblement actif à cause de l'ambiguïté de la tenure foncière (absence de titre de propriété formellement enregistré) qui constitue un blocage devant les transactions foncières.

L'évolution de la superficie et du nombre des exploitations n'a pas connu les mêmes tendances dans chaque secteur. En effet, on assiste à des dynamiques contrastées entre les 7 secteurs de la zone.

4.1.2 Un territoire agricole hétérogène

On observe de grandes différences entre imadas, en fonction de leurs localisations géographiques (position par rapport à la nappe), leurs orientations culturelles et leurs dynamiques agricoles nous avons pu effectuer un zonage en identifiant 3 principales zones:

➤ Zone à fort potentiel agricole: Chebika, Abida

Dans les secteurs de Chebika, Abida à l'est, la superficie agricole exploitée augmente de façon importante (respectivement 90%, 41%) Ces deux secteurs sont caractérisés par un fort potentiel agricole qui s'explique par la proximité de Kairouan, des sols fertiles, une faible salinité de l'eau et un accès facile à la nappe (profondeur moyenne des puits : 113 m). Les cultures dominantes dans ces deux secteurs sont l'olivier, l'arboriculture fruitière et le maraîchage. Dans

le secteur Abida, l'irrigation est assurée par les forages privés, alors que dans le secteur Chebika, les exploitations arboricoles se partagent à peu près également entre les deux modes d'accès à l'eau : forage et GDA

Malgré la disponibilité de la ressource dans le secteur Chebika, il concentre un nombre important d'exploitations menées en sec.

➤ **Zone centrale qui concentre la plupart des GDA : Karma, Hammad, Ben Salem**

Les secteurs Karma, Hammad et Ben Salem concentrent un nombre important de PPI, mais la nappe dans ces secteurs est plus profonde (profondeur moyenne des puits : 137 m), avec une salinité qui dépasse parfois 2,5 g/l. La dynamique agricole y est importante mais moins qu'à Abida et Chebika. Le secteur Karma et Hammad connaissent une augmentation à la fois de la superficie et de l'effectifs. Le secteur de Sidi Ali Ben Salem se distingue, quant à lui, par une augmentation des effectifs d'exploitations mais une diminution de la superficie¹⁶.

Dans le secteur de Karma, les plantations d'arbres fruitiers et les cultures maraîchère ont été réalisées au sein des PPI dans certains cas depuis leur création.

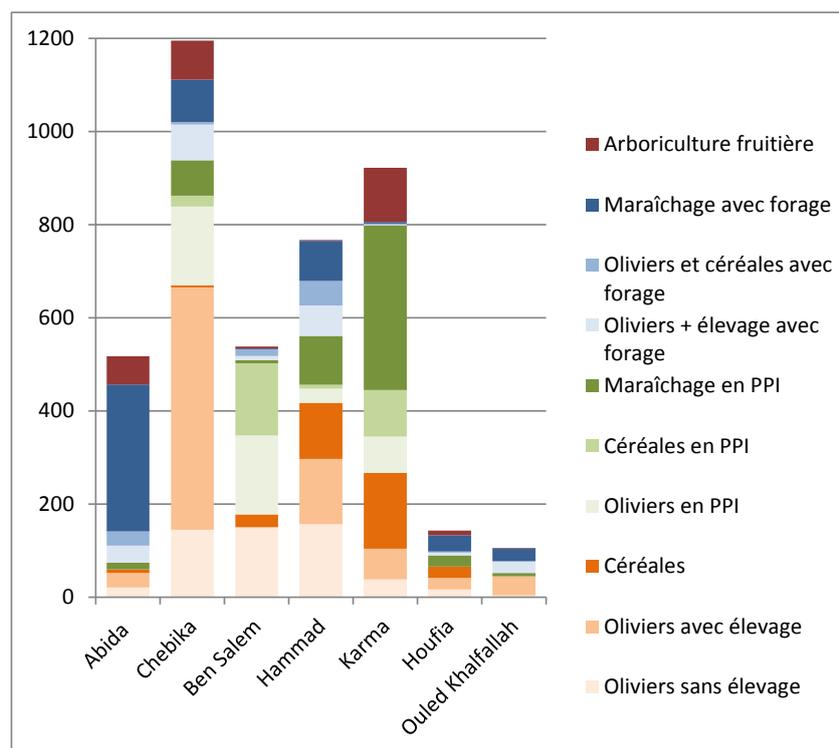
Les exploitations produisant des céréales en sec sont principalement localisées dans les secteurs d'El Karma et Hammad, alors que celles produisant des céréales en irrigué dans les PPI sont situées dans les secteurs de Ben Salem et Karma.

➤ **Zone en déprise agricole : Houfia, Ouled Khalfalah**

Les secteurs de Houfia et Ouled Khalfallah connaissent au contraire un exode rural marqué avec une réduction à la fois des effectifs d'exploitations et de la superficie agricole. En effet, ces deux secteurs sont en déprise agricole : ils ne comptent qu'un seul PPI, connaissent de plus un rabattement très important de la nappe (profondeur moyenne des puits : 173 m) et souffrent de sols non adaptés au maraîchage et à l'arboriculture d'où la dominance des cultures pluviales.

¹⁶ Cette situation peut être liée à des imprécisions dans l'évaluation des superficies des exploitations par les Omdas : en effet une erreur de 0.5 ha sur la superficie de toutes les exploitations de ce secteur correspond à 18% de la superficie recensée en 2005.

Figure 4-3 : Répartition des exploitations par orientation de production et imada (Effectif d'exploitations)

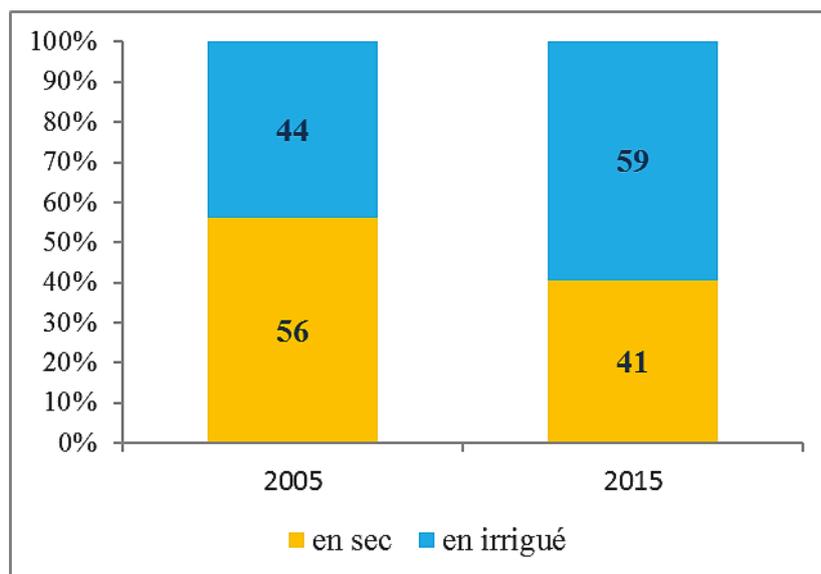


Source : Inventaire 2015 réalisé par Amal Azizi

Après avoir effectué le zonage territorial et connaître les caractéristiques de chaque secteur de la plaine nous allons essayer dans la partie suivante de présenter l'assolement en 2015 tout en comparant avec la situation en 2005. Ceci va nous permettre de dégager les principaux changements dans les systèmes de cultures qui sont apparues durant une décennie.

4.1.3 Evolution générale vers des cultures irriguées principalement l'arboriculture associée à l'olivier

Afin de caractériser l'évolution de la demande en eau globale dans la plaine de Kairouan, nous avons commencé par analyser les données des deux inventaires de 2005 et 2015, comme on a évoqué dans la méthodologie, on n'a pas pu avoir des données sur la superficie irriguée par type de culture en 2015, par conséquent l'analyse est basé sur l'effectif des exploitations (effectif des exploitations irriguées, effectifs par système de culture). Les classifications d'exploitations réalisées sur chacun des deux inventaires de 2005 et 2015 montrent une évolution sensible des orientations de production, marquée par un développement de l'irrigation dans les exploitations ne pratiquant à l'origine que des cultures pluviales. La part des exploitations irriguées passe ainsi de 44% en 2005 et 59% en 2015. Ce développement de l'irrigation profite surtout aux cultures maraîchères et dans une moindre mesure à l'arboriculture (Tableau 4-4).

Figure 4-4 : Part de l'effectif des exploitations irriguées en 2005 et 2015

Source : inventaire réalisé par Poussin et al., pour 2005 ; inventaire réalisé par Amal Azizi pour 2015

En 2005, l'analyse permet de distinguer 8 classes d'exploitations, dont les quatre premières, orientées vers les cultures pluviales et l'élevage, rassemblent 56 % des exploitations sur 46 % de la surface totale. On observe deux classes où dominent le maraîchage ou l'arboriculture fruitière, qui regroupent 9 % des exploitations sur 18 % de la surface (Poussin *et al.*, 2008).

En 2015, l'analyse permet de distinguer 10 classes d'exploitations dont les trois premières, non irriguées rassemblent 41% des exploitations sur 30% de la superficie. L'information sur le mode d'accès à l'eau permet de distinguer 7 classes d'exploitations irriguées. On retrouve une classe d'exploitations pratiquant l'arboriculture fruitière et deux classes d'exploitations produisant des cultures maraîchères (classe C9 à partir de puits ou forage et C6 au sein d'un PPI). On peut remarquer cependant que certaines exploitations bien qu'ayant un accès à l'eau (classe C4 située dans un PPI et classe C7 avec puits ou forage) se contentent d'irriguer les oliviers. Environ la moitié des exploitations de la classe C4 sont localisées dans des PPI non fonctionnels, ce qui explique l'absence de cultures exigeantes en eau.

Tableau 4-4 : Classification des exploitations en 2005 et 2015 : caractères dominants, effectifs et superficie en % du total, superficie moyenne

Année	Classe	Irrigation	Caractérisation de la classe	Effectif	Surface	Sup.moy
				% total	% total	ha
2005	B1	Non irrigué	Absence de céréales, un peu d'oliviers	15	5	2.6
	B2		Absence de maraîchage, un peu de céréales et d'oliviers	22	19	6.7
	B3		Céréales et oliviers dominants avec un peu d'élevage ovin	10	13	9.8
	B4		Elevage ovin important avec oliviers et céréales	9	9	7.7
	B5	Irrigué	Un peu de céréales, de maraîchage et d'oliviers	25	27	8.3
	B6		Absence d'oliviers et d'arboriculture, céréales et maraîchage	10	9	6.4
	B7		Maraîchage dominant, avec un peu de céréales	7	12	13.8
	B8		Arboriculture dominante	2	7	22.3
2015	C1	Non irrigué	Olivier sans élevage	13	7	2.1
	C2		Olivier avec élevage, plus de 2 ha	20	16	3.2
	C3		Céréales sans olivier	8	8	3.7
	C4	PPI	Olivier, sans maraîchage ni céréales, avec ou sans élevage	11	8	2.7
	C5		Céréales sans olivier ni maraîchage	7	5	2.9
	C6		Maraichage, le plus souvent avec oliviers et sans céréales	14	9	2.4
	C7	Puits ou forage	Oliviers et élevage, sans maraîchage ni céréales	5	6	4.7
	C8		Oliviers et céréales	3	4	6.5
	C9		Maraichage, le plus souvent avec oliviers	13	22	6.4
	C10	Forage ou PPI	Arboriculture fruitière	7	17	9.8

Source : Poussin *et al.*, 2008 pour 2005 (n=2230), inventaire réalisé par Amal Azizi pour 2015 (n=4188)

L'analyse des données sur les assolements pratiqués par les exploitations enquêtées en 2005 (150 exploitations) et 2015 (126 exploitations) (Figure 4-5) ainsi pour l'échantillon des exploitations communes (69 exploitations), (Figure 4-21) confirme les dynamiques dégagées à partir des données des deux inventaires (Tableau 4-5). Les 69 exploitations enquêtées en 2005 et revisitées en 2015 ne se distinguent pas en moyenne des échantillons totaux aux deux dates et elles présentent les mêmes tendances et évolutions.

En effet en 10 ans, nous observons une diminution de la part des cultures pluviales (olivier et grandes cultures), passant de 25% de la superficie totale en 2005 à 7% en 2015. L'évolution

générale vers des cultures irriguées plus rémunératrices a pu être accentuée en 2015 par des conditions climatiques défavorables (hiver 2014-2015 plus sec que l'hiver 2004-2005) qui peuvent expliquer un recours à l'irrigation pour des cultures souvent conduites en pluvial comme les céréales et les oliviers.

L'olivier, culture traditionnelle de la région, bien adapté à ses conditions climatiques et pédologiques, demeure la culture dominante pratiquée par plus de 90% des exploitations. Par contre, on constate une diminution des superficies conduites en sec et un développement de la culture de l'olivier en association avec des arbres fruitiers, des grandes cultures ou des cultures maraîchères, elle a passé de 9 % à 22 % de la superficie totale respectivement en 2005 et 2015.

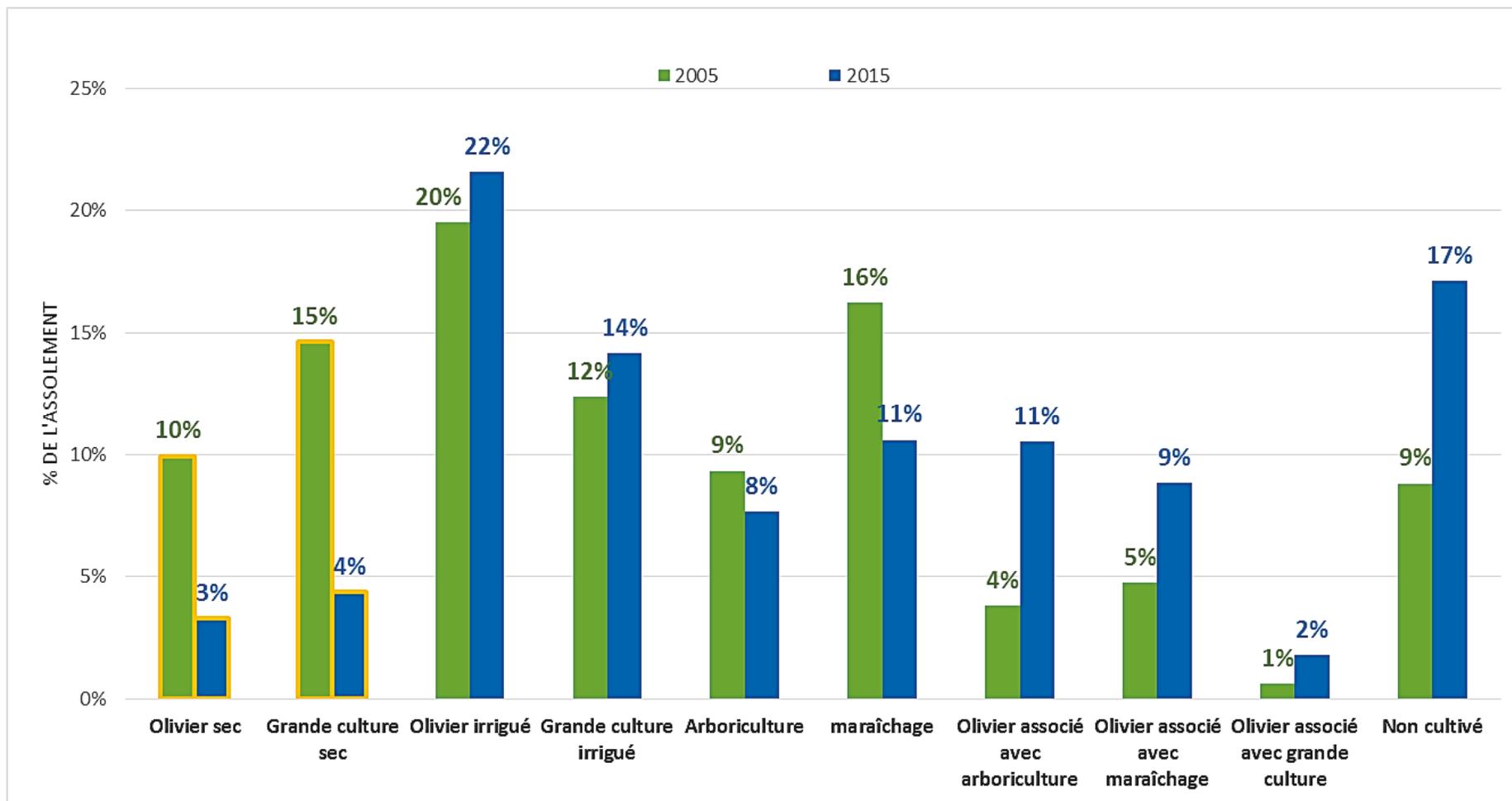
Le changement le plus remarquable durant ces 10 années est le développement de l'arboriculture fruitière en intercalaire avec les anciens oliviers, sa part dans l'assolement global de l'échantillon est multipliée à peu près par 3 en 2015. Cette tendance peut être expliquée par la rentabilité de l'arboriculture fruitière qui garantit un revenu annuel relativement stable, et des exigences plus faibles en main d'œuvre et en intrants comparée aux cultures maraîchères.

On note aussi une diminution de la superficie des cultures maraîchères pures, qui passe de 16% en 2005 à 11% en 2015 cette réticence est expliquée selon les agriculteurs par leurs exigences en intrants (eau, fertilisants, pesticides) et en main d'œuvre. La décision d'installation du maraîchage reste tributaire de la trésorerie des exploitations, de leurs disponibilités en main d'œuvre et du coût des intrants.

Les agriculteurs de la plaine préfèrent cultiver du maraîchage en intercalaire avec l'olivier pour bénéficier des quantités d'eau apportées à la fois pour l'olivier et le maraîchage. La part des cultures maraîchères en intercalaire est passé de 5% en 2005 avec une superficie moyenne de 2,4 ha à 9% en 2015 avec une superficie moyenne de plus de 4 ha

On remarque aussi que la proportion des terres non cultivées a significativement augmenté en 2015 ; elle a passé de 9 % à 17%. Ceci peut être, probablement, un signe de la dégradation de l'accès à l'eau et d'épuisement des terres agricoles suite à l'intensification et l'utilisation accentuée des engrais chimiques, ou par la non rentabilité de l'agriculture en sec.

Figure 4-5 : Evolution des systèmes de culture entre 2005 et 2015 (échantillon global : 126 exploitations et 2005 ha en 2015 et 150 exploitations et 2839 ha en 2005) en % de la superficie totale



Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Poussin et al., 2008 pour l'année 2005 et enquêtes technico-économiques réalisées par Azizi Amal pour l'année 2015

Tableau 4-5 : Les systèmes de cultures pratiqués dans l'échantillon de 2005 (150 exploitations) et 2015 (126 exploitations)

Système de culture pratiqué	En 2005					En 2015				
	Superficie (en ha)	% de la superficie totale de l'échantillon	Nombre d'exploitations en ayant	% du nombre total d'exploitations	Superficie moyenne de la culture dans les exploitations en ayant	Superficie (en ha)	% de la superficie totale de l'échantillon	Nombre d'exploitations en ayant	% du nombre total d'exploitations	Superficie moyenne de la culture dans les exploitations en ayant
Olivier en sec	282	10%	49	33%	5.8	66	3%	14	11%	4.7
Grandes cultures en sec	415	15%	64	43%	6.5	88	4%	13	10%	6.8
Grandes cultures irriguées	351	12%	48	32%	7.3	284	14%	38	30%	7.5
Olivier irrigué	554	20%	97	65%	5.7	433	22%	77	61%	5.6
Arboriculture	265	9%	36	24%	7.4	154	8%	22	20%	7
Maraîchage	460	16%	77	51%	5.9	213	11%	46	43%	4.6
Olivier et arboriculture associés	109	4%	27	18%	4.0	211	11%	35	32%	6
Olivier et maraîchage associés	135	5%	55	37%	2.4	178	9%	43	39%	4.1
Olivier et grandes cultures associés	18	1%	11	7%	1.6	36	2%	11	10%	3.3
Non cultivé	250	9%	90	60%	2.8	343	17%	57	37%	6
Total	2839	100%	150		18.9	2005	100%	126		16

Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Poussin et al., 2008 pour l'année 2005 et enquêtes technico-économiques réalisées par Azizi Amal pour l'année 2015

En conclusion, on peut retenir cinq faits majeurs dans l'évolution des exploitations de la plaine de Kairouan entre 2005 et 2015 :

- Des dynamiques agricoles contrastées entre les différents secteurs de la plaine,
- Un morcellement important des exploitations agricoles,
- Un développement de l'irrigation dans les exploitations qui pratiquaient auparavant seulement des cultures pluviales mais aussi chez les exploitations initialement irriguées,
- Un développement important de l'arboriculture fruitière associé avec l'olivier,
- Une extension du maraîchage en intercalaire,
- Une baisse de la surface cultivée (affecte quelques secteurs orientés céréales sèches).

Face à ces changements de structure et de fonctionnement qu'a connu la plaine de Kairouan durant ces 10 dernières années, on se demande quelle est la relation avec l'accès et la demande en eau agricole : Est-ce que le disfonctionnement de la moitié des GDA (Chapitre 3), le développement de l'arboriculture fruitière et le maraîchage en intercalaire sont accompagnés par une augmentation des prélèvements ou au contraire la généralisation de l'irrigation gouttes à gouttes et la diminution de la superficie de maraîchage pur (en plein champ) ont amené à une baisse de la demande en eau ?

Pour vérifier la tendance d'évolution de la demande en eau régionale, nous allons adopter dans la partie suivante une approche agrégée en se basant à la fois sur les données de l'inventaire et de l'échantillon 2015 et sur l'inventaire des forages effectué en 2010 par CRDA de Kairouan.

4.1.4 La hausse contenue de la demande en eau régionale une réalité à gérer

Après l'analyse des différentes dynamiques qu'a connue la plaine de Kairouan, nous allons dans cette partie détailler deux approches différentes d'estimation de la consommation en eau agricole ce qui nous permettra de croiser les résultats et de vérifier la fiabilité de nos estimations. Nous distinguerons une consommation collective dans les PPI et une consommation privée. Nous allons aussi calculer la consommation par zone agricole pour vérifier si le zonage agricole identifié peut se traduire significativement par une variation de niveau de la consommation entre les zones.

4.1.4.1 Estimation d'une consommation en eau par agrégation des besoins théoriques

A partir de l'inventaire de 2015 des exploitations agricoles de la plaine nous avons définie 4 classes de superficie : inférieur à 3 ha, entre 3 et 5 ha, entre 5 et 10 ha et supérieure à 10 ha. Nous avons remarqué qu'il y a une forte corrélation entre la superficie des exploitations et le mode d'accès à la ressource. En effet les petites exploitations sont surtout irriguées par l'eau de GDA. A partir de 5 ha les agriculteurs commencent à installer des forages privés. Nous avons distingué 3 types d'accès à la ressource : par GDA, par forage privé et par combinaison des deux. Comme nous avons mentionné dans la méthodologie, nous n'avons pas l'information sur la superficie par culture. Nous avons émis l'hypothèse que notre échantillon de 126

exploitations irriguées est représentatif de la population agricole de la plaine. Nous avons calculé alors l'assolement moyen par classe de superficie de l'exploitation et par chaque mode d'accès à la ressource (PPI, forage, mixtes). Les proportions de chaque système de culture sont après appliqués à l'ensemble des exploitations recensées pour dégager la superficie irriguée par système de culture. En fonction des besoins théorique des cultures installées nous avons pu estimer la demande en eau globale dans la plaine de Kairouan qui s'élève à 52 Mm³. pour une surface irriguée de 16 874 ha.

La grande proportion de l'eau consommée provient des exploitations ayant des forages privés, elles prélèvent à elles seules 32 Mm³ (63%) en effet, l'investissement dans un forage privé traduit un besoin important en eau d'irrigation et constitue un facteur d'extension des superficies des cultures à fortes valeurs ajoutées, très consommatrices en eau.

Tableau 4-6 : La variation de la demande en eau par mode d'accès à la ressource

Mode d'accès à l'eau	Nombre d'exploitations	Surface irriguée	Consommation en eau	Pourcentage par rapport à la demande globale
	-	ha	Mm ³	%
PPI	1276	3612	16.72	32%
Forage	839	6537	32.48	63%
PPI + Forage	154	765	2.37	5%
Sans accès à l'eau	1842	5959	ε (achats informels)	-
Total en 2015	2269	16874	51.58	100%

Source : Inventaire 2015 et enquêtes technicoéconomique 2015 réalisés par Azizi Amal

Tableau 4-7 : La variation de la consommation en eau par classe de superficie

Classe de superficie	Nombre d'exploitations (en irrigué)	Surface irriguée	Consommation en eau	Consommation moyenne par exploitation	Pourcentage par rapport à la demande globale
	-	ha	Mm ³	m ³	%
Inférieure à 3 ha	1007	1439	10.44	5337	20%
Entre 3-5 ha	551	1959	11.25	9590	22%
Entre 5-10 ha	432	2667	11.48	17527	22%
Sup à 10 ha	279	4849	18.41	56300	36%
Total en 2015	2269	10915	51.58	22732	100%

Source : Inventaire 2015 et enquêtes technicoéconomique 2015 réalisés par Azizi Amal

Les moyennes et grandes exploitations (plus de 5 ha) sont les plus consommatrices, elles concentrent 58 % de la demande globale (pour 31% de l'effectif des exploitations irriguées) avec des consommations moyennes annuelles importantes. Ceci peut être un indice sur l'inégale répartition de la ressource en eau et sa concentration chez les grandes exploitations ayant du capital pour investir dans des forages privés,.

4.1.4.2 Estimation des prélèvements des forages privés et publics de la plaine

Pour vérifier l'exactitude des résultats de l'approche précédente, nous allons utiliser les données de l'inventaire des forages réalisé par le CRDA de Kairouan en 2010. L'inventaire comporte 580 forages privés¹⁷ avec des données sur le type d'énergie utilisée et la puissance de la pompe. Sylvain Massuel en 2017 (Massuel et al. 2017), a distingué 3 types de forage dans la plaine de Kairouan ayant des débits différents avec des pompes à puissances différentes et avec une capacité d'irrigation variée. Partant de ces informations nous avons classifié les forages de l'inventaire selon les mêmes critères utilisés par Sylvain Massuel, tous en multipliant par le prélèvement annuel moyen de chaque type de forage.

Tableau 4-8 : Estimation des prélèvements par les forages privés

Prélèvement par des forages privés	Nombre de forage privé	m3 extrait/an/forage (selon article de sylvain, 2017)	Prélèvements privés Millions m3
Gasoil	209	38500	8.05
Electrique puissance Inférieure ou égale à 7	154	65500	10.09
Electrique puissance Supérieure à 7	217	84700	18.38
Total	580	-	36.51

Source : Inventaire des forages, CRDA 2010

Les prélèvements privés dans la plaine sont estimés à 36,51 Mm³. En ce qui concerne les forages publics nous avons utilisé notre base de donnée GDA (Chapitre 3), leurs prélèvements atteint 19 Mm³, pour enregistrer un prélèvement global de 55 Mm³.

Nous avons essayé aussi de caractériser l'ampleur des prélèvements par zone agricole, nous avons constaté une concentration des prélèvements dans les secteurs Abida et Chebika, la zone qui connaît un développement agricole important. Quant à la zone de déprise agricole elle ne concentre que 0,99 Mm³. Cette répartition des prélèvements est en harmonie avec le zonage agricole identifié précédemment.

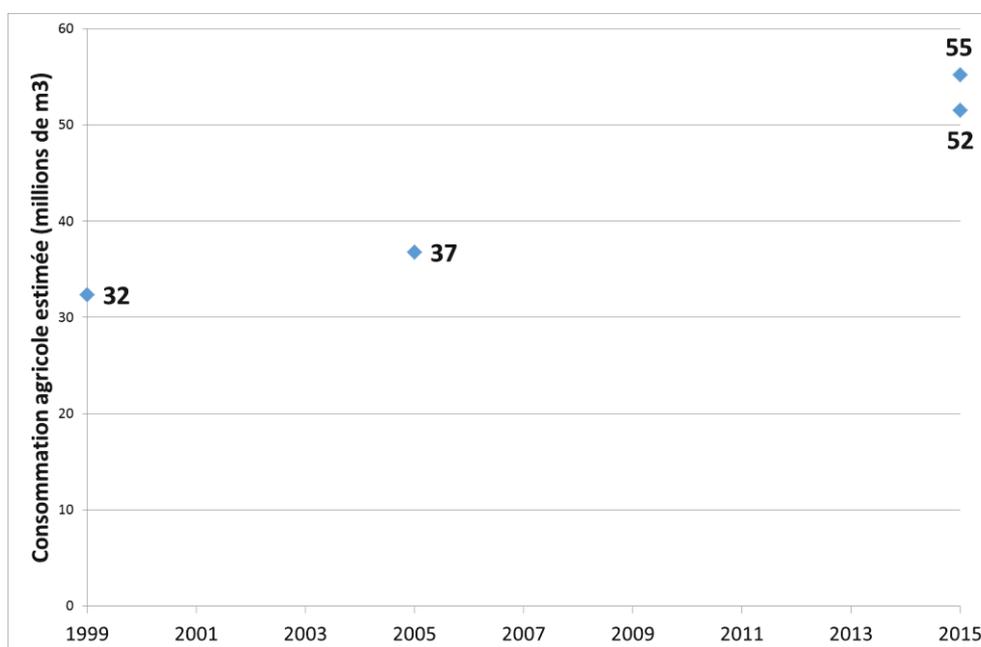
¹⁷ Sans compter les forages abandonnés, non équipés ou non fonctionnels au moment de l'inventaire

Tableau 4-9 : Estimation des prélèvements par zone agricole

Zonage agricole	Zone à fort potentiel agricole	Zone de concentration des PPI	Zone en déprise agricole	Total
Prélèvements annuels privés	28.46	7.32	0.73	36.51
Prélèvements annuels publics	4.70	14.03	0.25	19.00
Total	33.17	21.35	0.99	55.51

Source : Inventaire des forages 2010, base de données GDA 2015

En adoptant les deux approches de calculs, nous avons trouvé un résultat très proche. La consommation en eau est augmentée d'environ 40% par rapport à l'estimation de 2005 pour atteindre en 2015, 55 Mm³ en adoptant la méthode d'estimation des prélèvements des forages de la zone d'étude et 52 Mm³ en se basant sur l'agrégation des besoins des systèmes de cultures identifiés pour les exploitations recensées en 2015.

Figure 4-6 : Evolution de la consommation en eau agricole dans la plaine de Kairouan entre 1999 et 2015

Source : (Poussin, Benmihoub, et Beji 2007), Azizi Amal, 2015

L'approche globale d'estimation de la consommation en eau par les besoins des cultures ou par l'inventaire des forages est insuffisante pour comprendre les ressorts des dynamiques agricoles observées et des déterminants de la demande en eau : La consommation en eau calculée dans cette partie n'est qu'une estimation pour connaître si les changements des systèmes de culture

et de structure des exploitations, cette dernière décennie, ont été accompagnés par une augmentation ou une baisse de la demande en eau.

Face à cette augmentation de la consommation en eau, on s'interroge sur les conditions de mobilisation de la ressource, les modes d'accès développés dans un contexte de rareté et les réorientations productives pour assurer la viabilité des exploitations agricoles. Pour répondre à ces questions, il est primordial de passer à l'analyse de comportement individuels des exploitants dans leur diversité.

4.2. Analyse de la diversité des exploitations agricoles dans la plaine de Kairouan en 2005 et 2015

Nous analysons dans cette partie la diversité des exploitations agricoles en se basant sur les variables de structure et d'assolement les plus discriminantes afin de comprendre les logiques des comportements individuels et identifier les déterminants de la demande en eau. Pour ceci nous proposons une typologie des exploitations en 2005 et en 2015. Nous cherchons à répondre à deux questions : i) les variables discriminant le plus les exploitations ont-elles évolué entre 2005 et 2015 ? ii) les structures d'exploitations ont-elles un lien avec les choix d'assolement et in fine d'irrigation, aux deux dates ? Enfin, nous décrirons brièvement les types d'exploitations identifiés en 2005 et 2015 en spécifiant leurs modalités d'accès à l'eau, leurs techniques d'irrigation, leurs orientations culturelles, leurs marges brutes globales... Cette typologie va nous servir par la suite pour modéliser les comportements des types d'exploitations les plus répandus et influents sur la demande en eau régionale.

4.2.1 Les déterminants de la diversité des exploitations en 2005

4.2.1.1 Les variables de structure discriminantes en 2005

Pour l'ACP sur les variables de structures de 2005, l'observation de l'éboullis des valeurs propres ainsi que l'application de la règle de Kaiser¹⁸ conduisent à retenir une analyse des quatre premiers facteurs qui résument 71% de l'inertie de l'information.

¹⁸ La règle de Kaiser est une règle empirique qui préconise de retenir les facteurs dont la valeur propre est supérieure à la moyenne arithmétique des valeurs propres.

Figure 4-7 : Projection des variables de structure 2005 sur le plan factoriel (1 2)

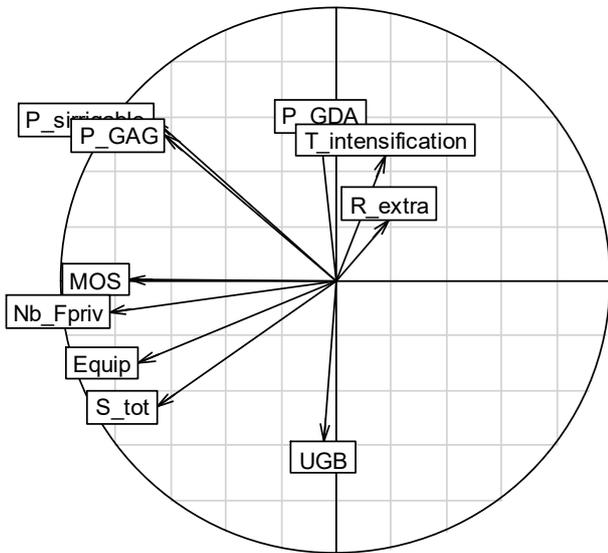
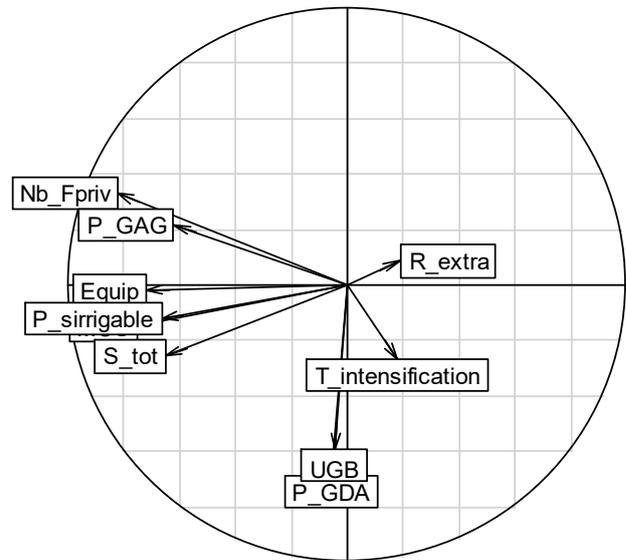


Figure 4-8 : Projection des variables de structure 2005 sur le plan factoriel (1 3)



Le premier axe factoriel 31 % de la variance. Il discrimine les exploitations par la taille, associée au nombre de forages privés, au niveau d'équipement agricole, à la part de superficie irrigable dans la surface totale et de superficie équipée en goutte-à-goutte.

L'axe 2 (18 % de la variabilité) permet de distinguer les exploitations pratiquant l'élevage (correspondant aux valeurs négatives sur cet axe). Il est aussi expliqué par les variables : part de la superficie irrigable et pourcentage de la superficie équipée en goutte-à-goutte, qui s'oppose à la taille de l'activité élevage. Le troisième axe (12% de la variance) est essentiellement expliqué par la variable pourcentage de la superficie irriguée par les GDA, en opposition assez logique avec le nombre de forages privés.

4.2.1.2 Les variables d'assolement discriminantes en 2005

L'ACP sur les variables d'assolement en 2005 montre que ces dernières sont moins structurantes du jeu de données que les variables de structure d'exploitation. Il faut en effet retenir 5 axes factoriels au lieu de quatre pour représenter plus de 70% de la variance.

Figure 4-9 : Projection des variables d'assolement 2005 sur le plan factoriel (1, 2)

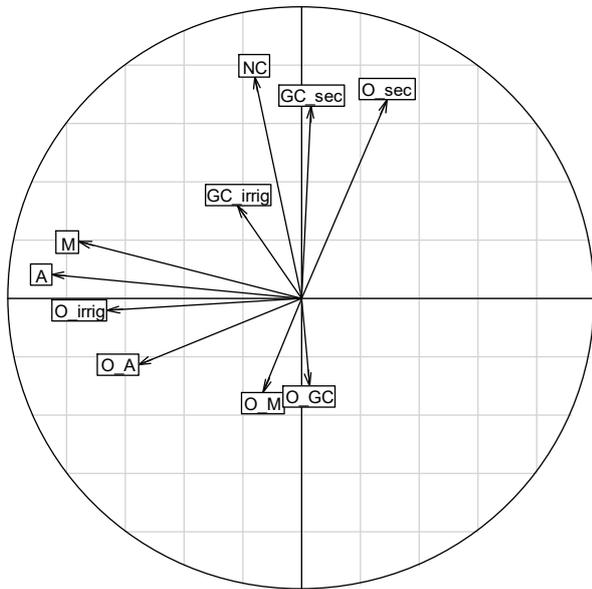
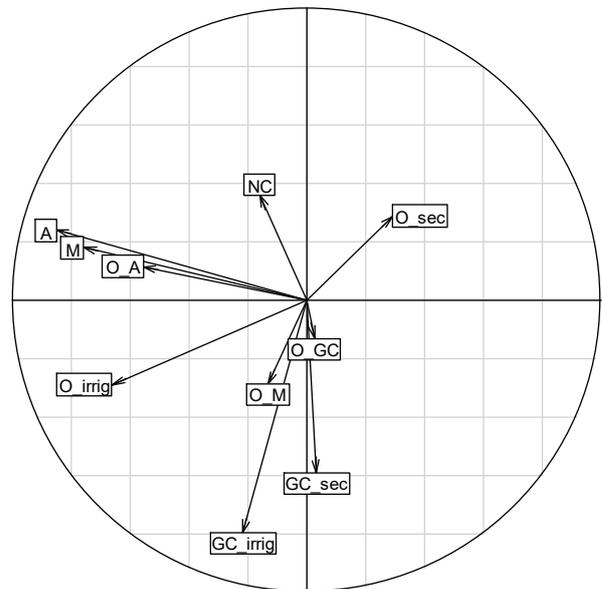


Figure 4-10 : Projection des variables d'assolement 2005 sur le plan factoriel (1, 3)



Une forte proximité est observée sur l'axe 1 (22% de la variance) entre la sole arboriculture et la sole maraîchage (toutes deux irrigués) qui sont donc développées ensemble dans l'assolement des exploitations. L'axe 2 (19% de la variance) distingue les exploitations ayant une part importante de cultures en sec (olivier, grandes cultures) et de surfaces non cultivées dans leur assolement. Les cultures en sec apparaissent donc indépendantes des cultures irriguées. L'axe 3 (15% de la variance) isole quant à lui les exploitations ayant une part importante de grandes cultures irriguées. En 2005 l'arboriculture, le maraîchage et les grandes cultures sont les cultures irriguées les plus discriminantes, quant aux cultures cultivées en secs l'olivier et les grandes cultures permettent aussi de différencier les exploitations. Les associations de cultures olivier-maraîchage, olivier-grandes cultures, peu répandues, contribuent peu aux axes.

4.2.1.3 Analyse de la co-inertie entre structure et assolement en 2005

Figure 4-11 : Projection des variables de structure et d'assolement de 2005 sur le plan factoriel (1,2) de co-inertie

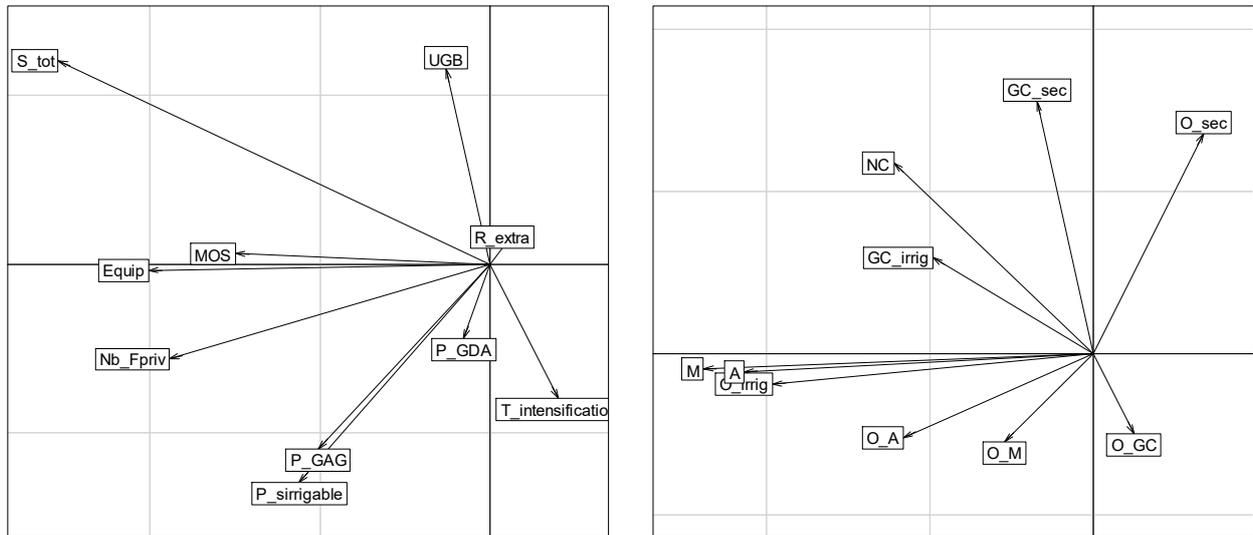
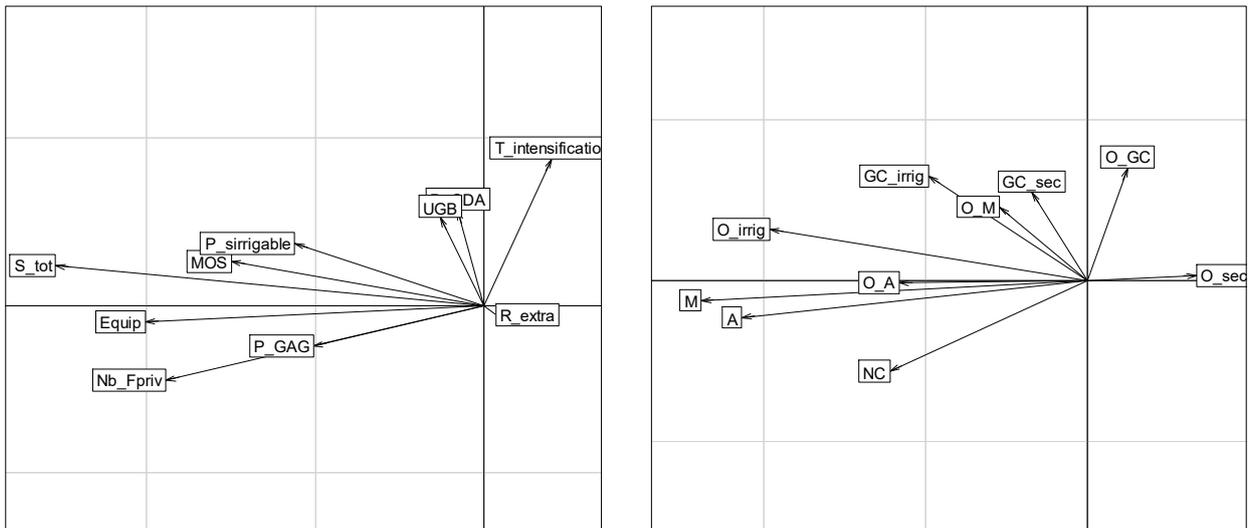


Figure 4-12 : Projection des variables de structure et d'assolement de 2005 sur le plan factoriel (1,3) de co-inertie



En superposant les variables de structure et d'assolement sur le premier plan factoriel de l'analyse de co-inertie (les axes 1 et 2 représentant respectivement 66% et 24% de la co-inertie), on peut constater la proximité donc une corrélation entre les variables de dimension et d'équipement (superficie totale, nombre de forages, matériel, main d'œuvre salariée) et les variables de surface en maraichage, arboriculture et olivier irrigué. Les grandes cultures en sec, indépendantes de la taille de l'exploitation, sont associées à la pratique de l'élevage.

La comparaison de la variance expliquée par les trois premiers axes des ACP sur les variables de structure et ACP sur les variables d'assolement montre que les données de structure permettent une meilleure différenciation des exploitations.

4.2.2 Les déterminants de la diversité des exploitations en 2015

4.2.2.1 Les variables de structure discriminantes en 2015

L'échantillon d'exploitations décrit par les variables de structure en 2015 semble un peu moins structuré qu'en 2005 : 6 facteurs sont nécessaires en effet pour représenter 76% de la variance totale de l'échantillon, contre quatre pour les données de structure de 2005.

Figure 4-13 : Projection des variables de structure 2015 sur le plan factoriel (1.2)

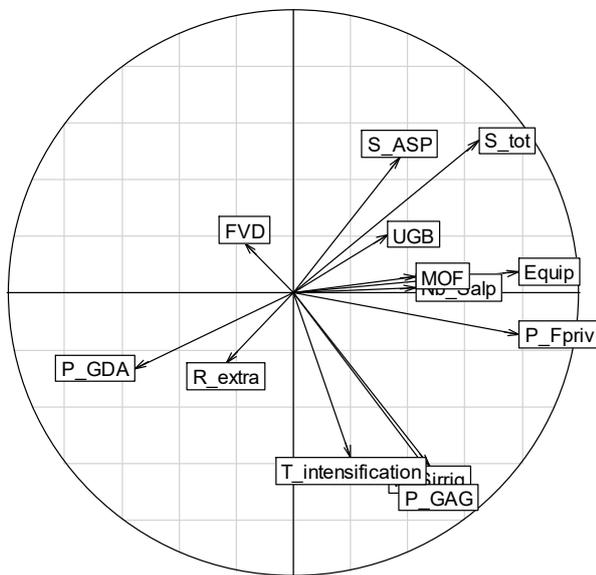
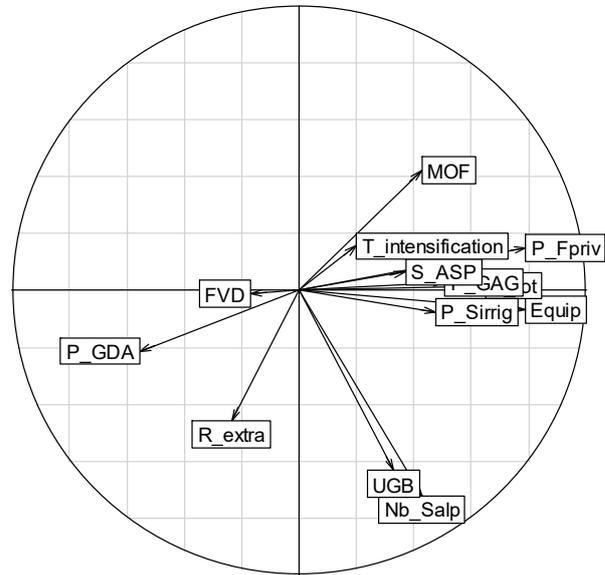


Figure 4-14 : Projection des variables de structure 2015 sur le plan factoriel (1.3)



Comme c'était le cas en 2005, le premier axe (qui représente 25% de la variance) discrimine les exploitations de grande superficie, au niveau d'équipement élevé et avec un fort pourcentage de surface irriguée à partir de forages privés. On note également sur cet axe, une opposition entre le pourcentage de superficie irriguée par des forages privés et celui irrigué à partir des GDA, ce qui est logique puisque ces deux variables sont complémentaires. Il faut noter cependant que la part irriguée à partir de GDA est assez loin du cercle de corrélation et n'est donc pas bien représentée sur ce plan.

Tandis que l'axe 2 (19% d'inertie) distingue les exploitations ayant un pourcentage élevé de superficie irriguée et de superficie équipée en goutte-à-goutte. Par contre, contrairement à 2005, le nombre d'UGB ne contribue ici qu'au 3^{ème} facteur (14% de l'inertie totale). Ce troisième axe montre aussi une forte corrélation, assez logique, entre le nombre d'UGB et le nombre des salariés permanents: l'activité d'élevage lorsqu'elle est importante nécessite des actifs permanents dans l'exploitation pour mener les tâches quotidiennes d'alimentation du cheptel et d'entretien des étables.

4.2.2.2 Les variables d'assolement discriminantes en 2015

Comme pour 2005, nous retenons trois facteurs, qui représentent 44% de la variance totale pour caractériser la diversité des exploitations en fonction des variables d'assolement en 2015. L'échantillon paraît encore moins structuré du point de vue des variables d'assolement que des variables de structure : ainsi on observe une part d'inertie portée par les différents axes assez équilibrée, respectivement 16%, 15% et 14% pour les axes 1, 2 et 3. Ceci illustre l'extrême diversité des combinaisons de production observées dans l'échantillon d'exploitations enquêtées, et la présence de nombreuses cultures dans la plupart des exploitations.

Figure 4-15 : Projection des variables

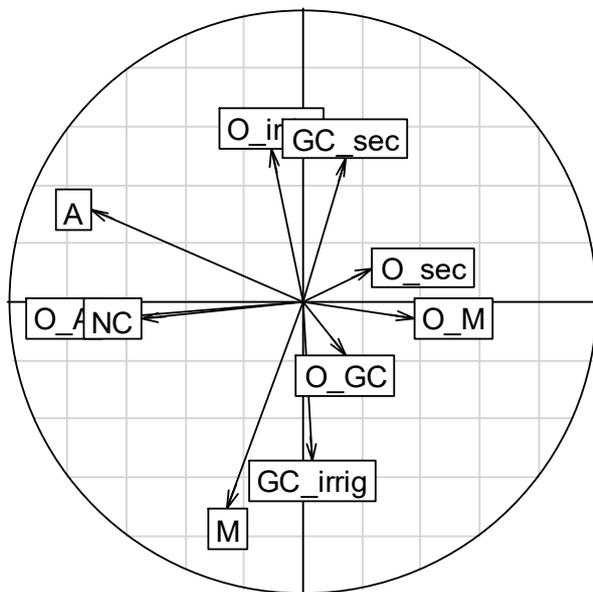
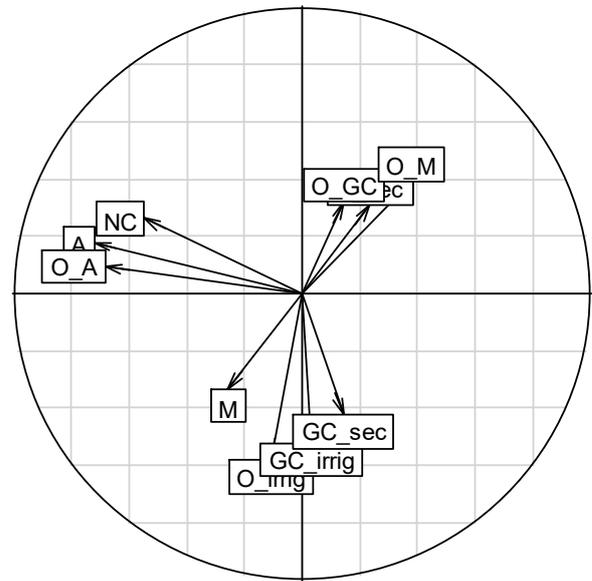


Figure 4-16 : Projection des variables d'assolement sur le plan factoriel (1,3)



Si certaines des variables qui structuraient l'échantillon d'exploitations en 2005 demeurent discriminantes en 2015 (la part de l'arboriculture fruitière contribue toujours fortement au premier axe, on constate aussi des évolutions : contrairement à 2005 où la part d'arboriculture fruitière était proche du pourcentage du maraîchage, en 2015 cette variable est corrélée sur cet axe avec le pourcentage d'olivier-arboriculture fruitière. Le maraîchage contribue à l'axe 2 et apparaît donc indépendant de l'arboriculture . Une opposition apparaît sur l'axe 2 entre maraichage et olivier irrigué

Comme en 2005, l'axe 3 est principalement expliqué par la part de grandes cultures irriguées, mais qui est cette fois associée à la part d'olivier irrigué, alors qu'en 2005 il était plutôt proche de l'axe 1.

4.2.2.3 Analyse de la co-inertie entre structure et assolement en 2015

L'analyse de co-inertie entre variables de structure et d'assolement est un peu moins probante en 2015 qu'en 2005. En effet les deux premiers axes de co-inertie ne représentent plus que 49% de l'inertie (contre 66% en 2005) et 19% (contre 24% en 2005), respectivement. Pour l'essentiel, on retrouve en 2015 les mêmes proximités entre variables de structures et

d'assolement que celles observées en 2005, avec quelques variantes (Figure 4-17 et Figure 4-18) :

- Proximité entre superficie totale et part de grandes cultures irriguées, auquel s'ajoute la part de superficie irriguée par aspersion (variable non disponible pour 2005), qui est le mode d'irrigation privilégié pour les grandes cultures dans la zone ; on notera que la proximité entre la part de superficie par aspersion et la part des grandes cultures irriguées est également bien visible sur les deux plans 1-2 et 1-3 de co-inertie.
- Proximité entre la proportion de superficie irriguée et de goutte-à-goutte, d'une part et la part de l'association olivier-maraîchage d'autre part. Alors qu'en 2005 la part de l'arboriculture fruitière était proche de ce groupe de variables, elle s'en éloigne un peu en 2015 tandis que l'association olivier-arboriculture, peu discriminante en 2005 s'en rapproche. A ce groupe de variables est également associé un taux d'intensification important.
- La part d'olivier en sec, peu structurante en 2005 (elle n'apparaissait que sur l'axe 3), l'est un peu plus en 2015, où elle contribue à l'axe 2 en opposition avec les associations d'oliviers irrigués avec du maraîchage ou de l'arboriculture.

Figure 4-17 : Projection des variables de structure et d'assolement de 2015 sur le plan factoriel (1,2) de co-inertie

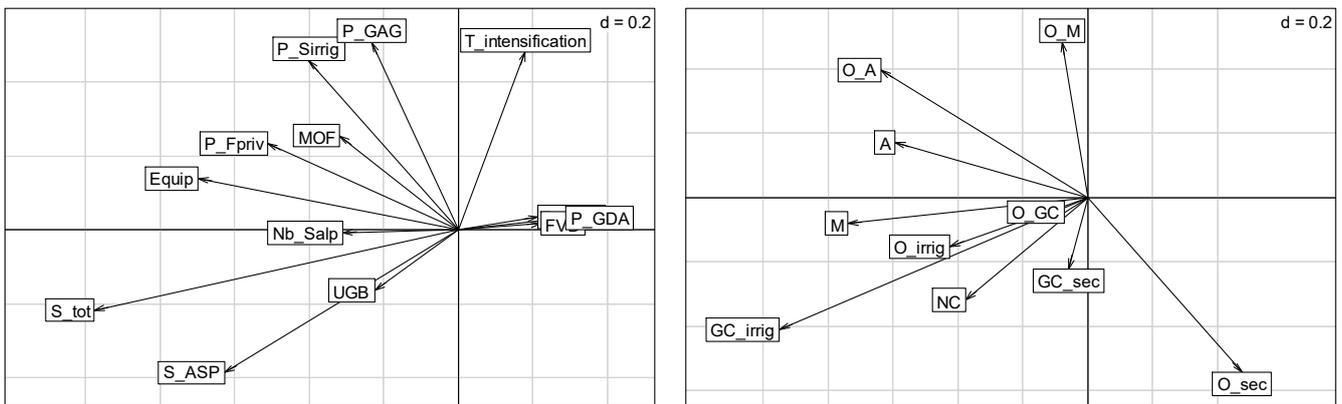
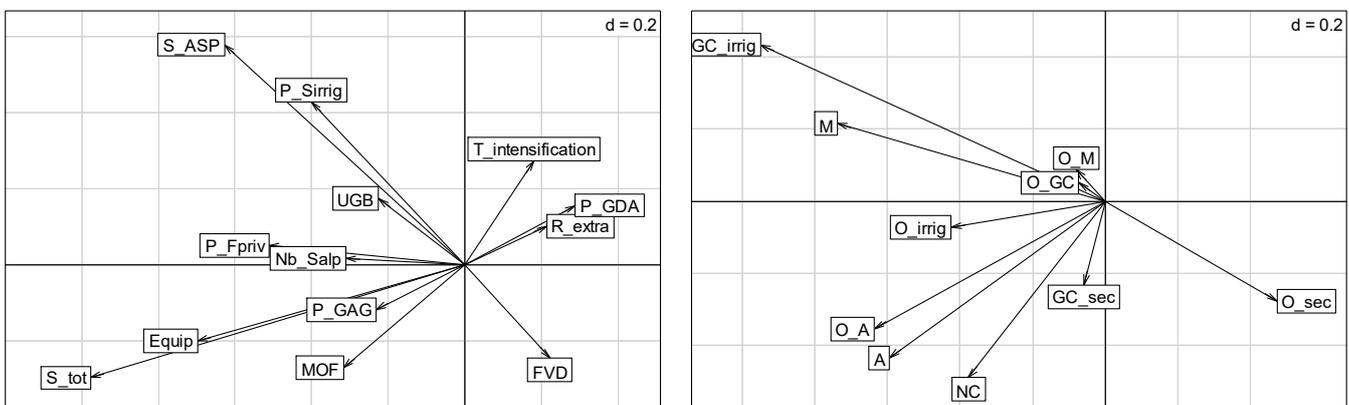


Figure 4-18 : Projection des variables de structure et d'assolement de 2015 sur le plan factoriel (1,3) de co-inertie



En comparant les valeurs propres des deux ACP sur variables de structure et d'assolement, on constate comme pour 2005, que les données de structure différencient mieux les exploitations, ce qui nous amène à choisir de construire notre typologie en fonction des données de structure.

Tableau 4-10 : Récapitulatif sur les variables structurant les typologies en 2005 et 2015

Variables les plus discriminantes	Axes	En 2005	En 2015
ACP sur les variables de structure	1	Superficie totale, nombre de forages privés, niveau d'équipement, % de surface irrigable, % de surface irriguée en goutte-à-goutte	Superficie totale, % de surface irriguée par des forages privés, niveau d'équipement
	2	UGB	% de superficie irriguée, % de surface irriguée en goutte-à-goutte
	3	% de surface irriguée en GDA	UGB
ACP sur les variables d'assolement	1	Arboriculture Maraîchage	Arboriculture Olivier-arboriculture
	2	Olivier en sec Grandes cultures en sec Non cultivé	Maraîchage
	3	Grandes cultures irriguées	Grandes cultures irriguées Olivier irrigué

En conclusion, ce sont globalement les mêmes variables de structure qui discriminent les exploitations en 2005 et en 2015. Certaines différences sont toutefois à noter, en particulier :

- Le poids moins important de la part de superficie irriguée (ou irrigable) et du pourcentage de goutte-à-goutte, qui ne sont plus corrélées à la superficie totale ; en effet avec la multiplication des forages privés, l'irrigation se généralise même dans les plus petites exploitations (à condition qu'elles aient les moyens financiers d'investir).
- Le poids moins important de la taille du cheptel.
- L'association olivier-arboriculture fruitière devient structurante en 2015 alors qu'elle ne l'était pas en 2005.
- La superficie en maraîchage reste structurante en 2015 mais moins qu'en 2005, mais surtout elle n'est plus corrélée à la superficie en arboriculture fruitière.
- Les superficies d'olivier en sec et de grandes cultures en sec structurantes en 2005, ne le sont plus en 2015.

Aux deux dates, les variables décrivant les facteurs de production sont plus structurantes que les variables d'assolement. Les variables liées à l'accès à la ressource en eau et aux techniques

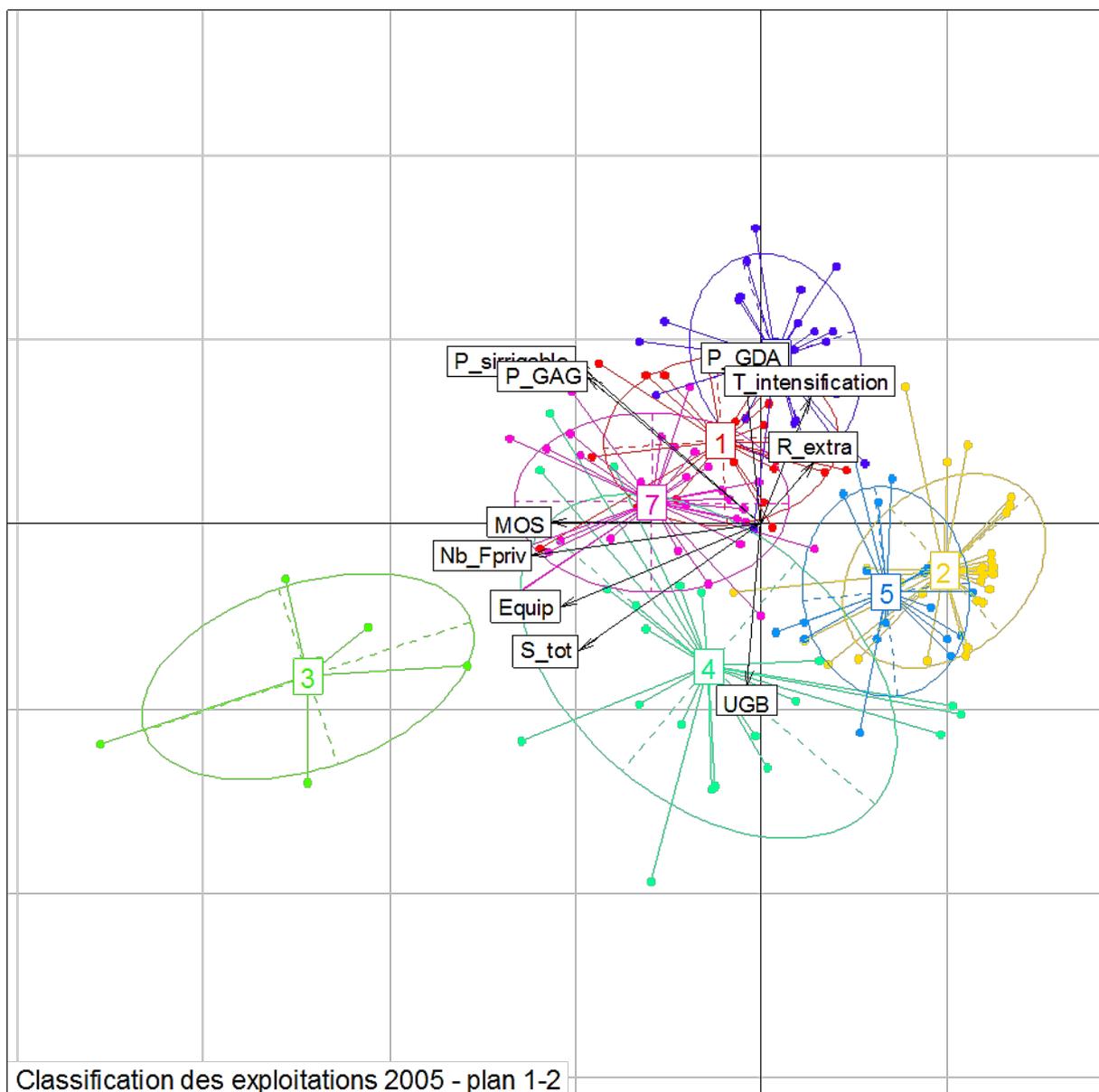
d'irrigation jouent un rôle important dans la différenciation entre les exploitations. Par contre, l'influence des structures d'exploitations sur les choix d'assolement semble diminuer entre 2005 et 2015, en lien avec une diversité accrue des systèmes de cultures.

4.3. Description des types d'exploitations

4.3.1 Typologie des exploitations en 2005

La classification hiérarchique ascendante sur les données de structure 2005 nous a permis d'identifier 7 groupes d'exploitations. La Figure 4-19 montre la projection de ces groupes sur le premier plan factoriel de l'ACP sur les données de structure.

Figure 4-19 : Projection des classes d'exploitations selon les structures en 2005 sur le plan factoriel 1-2 de l'ACP



➤ **Grandes exploitations bien équipées, diversifiées avec un bon accès à l'eau (groupe 3, 6 exploitations)**

Comme le montre la Figure 4-19, ce groupe diffère des autres par plusieurs caractéristiques. Ce sont des exploitations qui possèdent un capital foncier important, en moyenne 80 ha (avec un maximum de 145 ha et un minimum de 39 ha). Elles sont caractérisées par un bon niveau d'équipement (elles possèdent des tracteurs, des moissonneuses batteuses, et des moyens de transport...) ce qui permet d'effectuer aisément leurs pratiques agricoles. L'accès à la ressource en eau est facile : en effet le nombre de forages privés varie de 2 à 5 et elles ont la capacité financière pour supporter le coût d'électricité ou de gasoil. Par conséquent toute la superficie est irrigable. 65% de la superficie est équipée en goutte-à-goutte (pourcentage le plus élevé de tous les groupes, la moyenne générale est égale à 35 %). La disponibilité de la ressource fournit à ces agriculteurs une grande souplesse dans le choix de leurs systèmes de production : elles sont principalement orientées vers l'olivier, l'arboriculture fruitière et le maraîchage (ANNEXE 16). Les cultures intercalaires ne sont pas développées, car ces exploitations possèdent assez de terres pour cultiver en plein champ leurs cultures maraîchères. Une grande partie de la surface agricole n'est pas cultivée (en moyenne 22 ha). Ceci s'explique par des raisons techniques : les agriculteurs appliquent une rotation qui se base sur la jachère pour ne pas épuiser la terre. Par conséquent elles ont un faible taux d'intensification. La taille des exploitations exige le recrutement d'une main d'œuvre salariée pour assurer les différentes pratiques culturales.

Ces exploitations ont pu accumuler un bon capital financier qui leur a permis d'investir dans l'installation de forages et dans les équipements d'irrigation. Ce type d'exploitation représente une minorité (4% des exploitations enquêtées).

➤ **Petites et moyennes exploitations avec un bon accès à l'eau principalement orientées vers l'arboriculture avec maraîchage en intercalaire (groupe 1 - 22 exploitations et groupe 7 - 30 exploitations)**

On remarque une grande proximité entre les groupes 1 et 7. Ces types d'exploitations, contrairement aux exploitations du groupe 3, possèdent un niveau faible d'équipements agricoles. Elles ont une superficie moyenne respective de 12 et 16 ha. Elles possèdent toutes des forages privés et peuvent irriguer la totalité de la superficie agricole. Quelques exploitations du groupe 7 irriguent à la fois à partir du GDA et d'un forage privé. Elles possèdent une superficie importante équipée en goutte-à-goutte (55% de la superficie irriguée). La majorité de ces exploitations possède un cheptel moyen (ovin et bovin) utilisé comme forme d'épargne et parfois destiné à l'autoconsommation.

L'olivier irrigué est la culture principale (respectivement 65% et 46% de l'assolement des groupes 1 et 7). Ces exploitations cultivent aussi du maraîchage (respectivement, 15 et 24%). Au-delà de leurs points communs, ces deux groupes se distinguent par le mode de conduite des cultures maraîchères : dans le groupe 7, le maraîchage est cultivé en plein champ tandis que dans le groupe 1, il est cultivé en intercalaire avec l'olivier, ce qui conduit à un niveau d'intensification culturelle plus élevé (120% contre 100% pour le groupe 7). Les agriculteurs du groupe 1 ont tous des revenus non agricoles, ce qui leur procure une certaine sécurité financière.

➤ **Exploitations en PPI avec un système de culture diversifié et un bon accès à l'eau (groupe 6 : 24 exploitations)**

Ce sont des petites et moyennes exploitations (9,5 ha en moyenne) qui appartiennent à des PPI et dont 93% de la superficie agricole est irrigable. 45% seulement sont équipés en goutte-à-goutte. Ces exploitations ne possèdent pas d'équipement agricole. L'activité agricole est assurée par la main d'œuvre familiale et salariée. Pour améliorer la rentabilité de leurs terres ces exploitations ont choisi de diversifier leurs assolements : l'olivier irrigué est la culture dominante avec 65% de la superficie totale, suivi par le maraîchage et les grandes cultures qui occupent respectivement 40% et 28% (ces dernières sont cultivées en partie en intercalaire avec les oliviers). L'importance des grandes cultures dans ce groupe est le fruit d'un programme national qui encourage l'installation des cultures stratégiques dans les PPI pour garantir la sécurité alimentaire à l'échelle nationale. La part des cultures maraîchères intercalaires atteint 23% de la superficie totale, ce qui conduit à avoir un bon taux d'intensification (118%). Ce taux élevé d'intensification est permis notamment par les performances satisfaisantes des GDA, qui, en 2005 étaient capables de répondre aux besoins d'irrigation de leurs bénéficiaires.

➤ **Grands céréaliculteurs éleveurs cultivant en majorité en sec (groupe 4 : 21 exploitations)**

Ces agriculteurs détiennent un capital foncier important (en moyenne 42 ha avec un maximum de 150 ha et un minimum de 20 ha). 76% de ces exploitations ont un accès à l'eau mais seuls 48 % de la superficie sont irrigables. Ces exploitations sont donc orientées principalement vers les cultures en sec. L'élevage y est beaucoup plus important que dans les autres groupes (en moyenne 10 UGB, soit une cinquantaine de brebis). Pour assurer l'alimentation de leur cheptel, la majorité de ces exploitations sont orientées vers les grandes cultures en pluvial qui couvrent 32 % de la superficie totale. On note aussi la présence de l'olivier en sec qui occupe 17 % de l'assolement. Ces types d'exploitations se trouvent incapables d'exploiter la totalité de leur superficie, 27% de leurs terres sont non cultivées, ce qui explique leur faible taux d'intensification.

La taille des exploitations assure des revenus agricoles suffisants pour les familles, et seuls 38% ont un revenu non agricole. Cependant l'accès limité à la ressource en eau et l'orientation vers les cultures non irriguées à faible valeur ajoutée limitent les possibilités d'investissement dans les équipements agricoles. Seuls 25% des exploitations dans ce groupe ont pu installer leurs propres forages et commencent à cultiver du maraîchage et de l'olivier en irrigué.

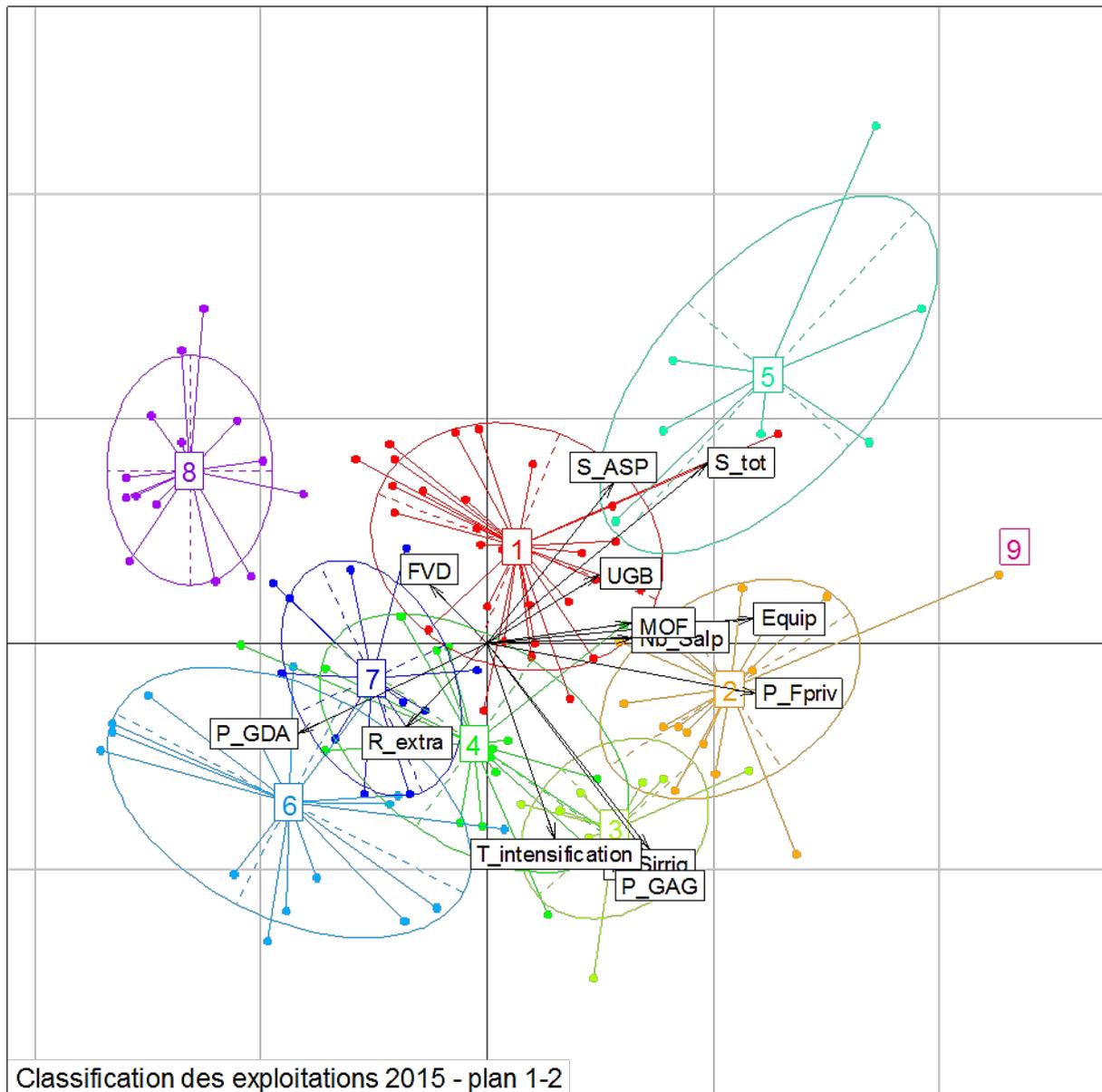
➤ **Moyennes et petites exploitations spécialisées en olivier et grandes cultures en sec (groupe 5 - 18 exploitations et groupe 2 - 29 exploitations)**

Comme le montre la Figure 4-19, les groupes 5 et 2 présentent une forte proximité qui témoigne de caractéristiques communes. En effet, les deux groupes ont des faibles superficies, respectivement 12 et 10 ha en moyenne (ANNEXE 16), Elles sont en majorité hors PPI, ne possèdent pas de forages et sont mal équipées. Le groupe 2 est spécialisé en olivier sec qui présente à lui seul 55% et en grandes cultures en sec qui occupent 28 % de la superficie totale. Dans le groupe 5, on remarque un développement de l'irrigation par l'installation de quelques forages privés pour quelques exploitations. Les exploitations de ce groupe sont aussi

spécialisées en grandes cultures en sec (29% de la superficie) et en olivier irrigué (18%). Les deux groupes n'arrivent pas à cultiver la totalité de leurs terres. La superficie non cultivée atteint 56% pour le groupe 2 et 35% pour le groupe 5. Compte tenu de leur superficie limitée et de leur faible niveau d'intensification, ces agriculteurs sont conduits à chercher d'autres sources de revenu non agricole (c'est le cas pour la totalité des exploitations du groupe 2) ou à compléter les revenus tirés des cultures par une petite activité d'élevage (cas des exploitations du groupe 5).

4.3.2 Typologie des exploitations en 2015

Figure 4-20 : Projection des types d'exploitations en 2015 sur le plan factoriel 1-2 de l'ACP sur les variables de structure



➤ **Grands arboriculteurs avec un capital d'exploitation important et un bon accès à l'eau (groupe 2 : 18 exploitations)**

Ces exploitations ont une superficie moyenne de 25 ha. Elles possèdent un bon niveau d'équipements agricoles : la majorité possède un moyen de transport qui facilite la commercialisation de leur production et des équipements agricoles adaptés à leur système de culture. Ce groupe rassemble des propriétaires qui sont principalement orientés vers l'olivier, l'arboriculture fruitière et l'association olivier et arboriculture fruitière et des exploitants en faire-valoir mixte (part importante des terres en location et métayage) qui cultivent une part importante de leur superficie en maraîchage (ANNEXE 17). Ces exploitants n'ont pas de revenus non agricoles. En plus de la main d'œuvre familiale, ils emploient des salariés permanents. Malgré un coût énorme d'investissement (coût moyen=17692,31DNT), ils possèdent tous des forages privés (1,83 forages/exploitation) et irriguent presque la totalité de leur superficie agricole. La superficie moyenne irriguée par forage est de 12,29 ha. 58% des forages sont autorisés et 73% fonctionnent avec l'énergie électrique (tarif agricole). Ce type d'exploitation connaît un mouvement d'approfondissement important à l'ordre de 1,42 m par an et coûte en moyenne 122 DNT/m, (ANNEXE 18). 91% de la superficie irriguée est équipée en goutte-à-goutte. Ces agriculteurs ont tendance à se spécialiser dans l'arboriculture. En effet, ils ont indiqué lors des enquêtes, qu'ils ont choisi de remplacer les superficies qui étaient cultivées en maraîchage en intercalaire par de l'arboriculture fruitière qu'ils jugent moins consommatrice en main d'œuvre et en intrants.

➤ **Grands céréaliculteurs bien équipés avec un bon accès à l'eau (groupe 5 : 8 exploitations)¹⁹**

Ce sont des exploitations ayant une grande superficie (en moyenne 44 ha avec un maximum de 63 ha et un minimum de 30 ha). Elles sont caractérisées par un bon niveau d'équipement : en effet certaines exploitations de ce groupe louent leur matériel à d'autres agriculteurs, ce qui leur apporte un revenu supplémentaire. La superficie est irriguée en majorité à partir des forages privés (1,88 forages/ exploitation). Ces forages sont en majorité autorisés (60%) et fonctionnent par l'énergie électrique (67%). Cependant, on assiste aussi à des forages qui fonctionnent par l'électricité domestique (13%) et le gasoil (20%) Du fait de l'importance de la superficie exploitée, des besoins en eau de leur système de production et du tarissement de quelques forages (27%) (ANNEXE 18) les agriculteurs ont recours aussi à d'autres modes d'accès à l'eau ou ressources en eau : des achats d'eau auprès d'agriculteurs voisins ou l'exploitation de l'émergence du barrage. La technique d'irrigation dominante est l'aspersion en lien avec l'importance des grandes cultures irriguées (céréales et fourrages) qui sont prépondérantes (en moyenne 66% de la superficie totale). Cette orientation culturelle est accompagnée par le développement de l'activité d'élevage qui représente un poids économique important dans quelques exploitations. En complément, ces exploitations ont aussi gardé dans leur assolement la culture de l'olivier et du maraîchage qui occupent ensemble 30% de la superficie totale et qui

¹⁹ Ce groupe inclut également une exploitation (groupe 9), qui a un système de production spécialisé basé sur l'intégration élevage-grandes cultures irriguées, et qui a un nombre très élevé de salariés permanents.

sont irriguées en goutte-à-goutte. Les exploitations du groupe 5 utilisent principalement de la main d'œuvre familiale.

➤ **Grands arboriculteurs avec un accès limité à l'eau (groupe 1 : 30 exploitations)**

Ce groupe compte l'effectif d'exploitations le plus important de l'échantillon. Il s'agit de propriétaires à grande superficie agricole (21 ha en moyenne), sans salariés permanents ni d'activités non agricoles, avec un niveau d'équipement moyen. Ces exploitations sont principalement orientées vers la culture de l'olivier irrigué qui occupe à elle seule 44% de leur assolement. Malgré la présence des forages (1,33 forages/ exploitation), la majorité des exploitations n'arrivent pas à irriguer la totalité de leurs terres agricoles. Cela peut être expliqué soit par le faible débit (puissance moyenne = 9 ch) extrait soit par le coût de l'énergie (cas des forages à gasoil : 21% et de l'électricité tarif non agricole : 13%) qui limitent les volumes pompés. Ayant de très forts besoins en eau ces exploitations complètent leurs forages par d'autres ressources. Elles ont recours à des achats d'eau ou à la mise en location de leurs terres contre l'irrigation des parcelles. La superficie irriguée est équipée en goutte-à-goutte. Le taux d'intensification est faible, les agriculteurs se limitent à irriguer leurs oliviers sans pouvoir installer des cultures intercalaires ou estivales (double cycle), et elles ont une part importante de terres non cultivées (20% en moyenne).

➤ **Moyens et petits arboriculteurs ayant un bon accès à l'eau (groupe 4 : 17 exploitations)**

Les exploitations de ce groupe ont une superficie moyenne de 9 ha. Elles possèdent toutes des forages privés (1,06 forages/ exploitation) et peuvent irriguer la totalité de leurs terres (8,32 ha /forage). Ces exploitations possèdent la grande proportion des forages à gasoil (28%) et des forages qui fonctionnent avec l'énergie électrique à tarif non agricole (17 %) ce qui alourdit les charges d'exhaure d'eau. Elles sont principalement orientées vers l'olivier irrigué (71%). Malgré leur faible niveau d'équipement, ces exploitations ont pu équiper plus de la moitié de leur superficie en goutte-à-goutte. La disponibilité de la ressource et leurs superficies limitées les ont incitées à installer des cultures intercalaires (maraîchage, arboriculture fruitière) qui couvrent en moyenne 32% de la superficie totale. Elles ont par conséquent un taux d'intensification élevé (le 3^{ème} de tous les groupes). En parallèle du travail de la terre ces agriculteurs ont aussi des activités extra agricoles.

➤ **Exploitations moyennes avec un bon accès à l'eau et une part importante de cultures maraîchères (groupe 3 : 10 exploitations)**

Ce sont principalement des propriétaires à petite à moyenne superficie avec un faible équipement agricole. Par contre, ils ont pu investir dans des forages privés (1,4 forages/ exploitation) et peuvent irriguer toute leur superficie. La superficie irriguée par forage est faible (7,32 ha/ forage) comparée aux autres groupes cela est dû à la nature d'assolement qui est basé sur des cultures exigeantes en eau. La part d'équipement en goutte-à-goutte atteint en moyenne 88% de la superficie irriguée. L'assolement est dominé par l'olivier irrigué qui représente 86% de la superficie. Il est le plus souvent associé à des cultures maraîchères en intercalaire (45 % de la superficie), mais aussi des arbres fruitiers (12% de la superficie) ou des grandes cultures (9%). On note aussi une petite part de cultures maraîchères seules (8%). Par conséquent, ces

exploitations ont le taux d'intensification le plus élevé (195 %) de tous les groupes. Cette stratégie d'intensification via les cultures maraîchères est aussi permise par une main d'œuvre familiale abondante (3.4 personnes en moyenne, ce qui est la valeur la plus élevée de tous les groupes) avec un savoir-faire important.

➤ **Moyennes et petites exploitations appartenant aux PPI (groupe 7 - 13 exploitations et groupe 6 - 16 exploitations)**

En examinant la Figure 4-20, on observe une forte proximité entre les exploitations des groupes 6 et 7, qui appartiennent, pour la plupart, à des PPI (83% et 31% de la superficie irriguée sont alimentés en eau à partir de GDA, respectivement dans les groupes 6 et 7). De superficie faible à moyenne (respectivement 5,9 ha et 8,3 ha), elles ont un faible niveau d'équipement. Par contre leur niveau d'intensification est assez élevé (127% pour le groupe 6 et 112% pour le groupe 7). Les spéculations dominantes sont l'olivier irrigué, qui occupe 64% de la superficie pour le groupe 6 et 43% pour le groupe 7, et le maraîchage qui occupe 49% de la superficie dans le groupe 6 (dont presque la moitié en intercalaire) et 28% (dont un tiers en intercalaire) pour le groupe 7. La main d'œuvre familiale est la principale force de travail. Ces agriculteurs n'ont pas d'autres sources de revenus en dehors de leur exploitation agricole. La principale différence entre ces deux groupes réside dans la nature de leur approvisionnement en eau. En effet, les exploitations du groupe 6 s'approvisionnent principalement à partir de l'eau d'un GDA (pas de forage), (83% de la superficie irriguée), et arrivent à satisfaire leur besoin en eau d'irrigation, car elles appartiennent à des GDA fonctionnels (Houwareb1, Mlelsa Houwareb, Karma1, Karma 2, Wled Nacer, Draa Affen). Au contraire, les exploitations du groupe 7 ne peuvent irriguer que 79% de la superficie totale. 31% des superficies irriguées le sont à partir d'un GDA et 14 % par des forages privés (0,46 forages/ exploitation), 70% de ces forages sont non électrifiés. Le reste de la superficie est irrigué via des achats d'eau à des agriculteurs voisins ou par des arrangements fonciers (location de terres plantées d'oliviers à un métayer ou un locataire qui fournit l'eau). En effet ces exploitations possèdent des superficies hors PPI, les GDA n'arrivent pas à desservir ces parcelles (au cas où les parcelles appartenant aux PPI sont desservis, le GDA peut alimenter les parcelles aux alentours des limites géographiques du PPI). Ce manque d'eau est aussi dû pour certaines exploitations à la dégradation du service de quelques GDA, qui peut aller parfois jusqu'à leur fermeture suite à des problèmes techniques ou à une accumulation des dettes envers la STEG qui aboutit à la coupure de l'électricité et à l'arrêt de distribution d'eau (Ajifre, Henchir El Borj).

➤ **Petits arboriculteurs faiblement irrigués (groupe 8 : 13 exploitations)**

Comme le montre la Figure 4-20 le groupe 8 se distingue clairement des autres groupes par son plus faible taux d'irrigation (34% en moyenne de la superficie est irriguée contre 83% pour l'ensemble de l'échantillon). L'olivier et la culture principale (58% de la superficie dont un peu moins de la moitié est mené en sec. L'olivier irrigué (26% de la superficie totale) est arrosé pour une faible partie à partir d'un GDA, ou le plus souvent par des achats d'eau et par l'accès à des sources secondaires (émergence du barrage, oueds, lacs collinaires). En raison de l'accès limité à l'eau, les cultures intercalaires (maraîchage ou arbres fruitiers) sont absentes, sauf dans 3 exploitations, et une proportion importante de la superficie totale n'est pas cultivée (28%), ce

qui conduit au plus faible niveau d'intensification de tous les groupes (77%). Ces exploitations ne possèdent ni équipements agricoles ni matériels d'irrigation. Les quelques parcelles irriguées le sont par gravité (séguia). Contraintes par un accès à l'eau limité et probablement par leurs moyens financiers, ces exploitations n'ont pas réussi à se développer comme celles des autres groupes. Ces exploitants n'expriment pas de projets de développement futur de leur exploitation.

La description des différents types d'exploitations, nous a permis de cerner la diversité existante dans un paysage agricole qui connaît des dynamiques agricoles importantes et une grande évolution de la ressource et des systèmes de production. Nous avons identifié, 8 types d'exploitations en 2015 sur la base des données de structure. Les données de l'enquête de 2005 ont également été remobilisées afin d'analyser la diversité de systèmes de production sur la base d'un jeu de variables similaires et a permis d'identifier 7 types d'exploitation.

Les principales variables discriminantes de la diversité des exploitations en 2015 comme en 2005 sont la superficie totale, la part de superficie irriguée à partir de forage privés, le niveau d'équipement global et la part de superficie irriguée en goutte-à-goutte. L'analyse de co-inertie montre une certaine relation entre variables de structure et variables d'assolement mais l'influence des structures d'exploitations sur les choix d'assolement semble diminuer entre 2005 et 2015, en lien avec une diversité accrue des systèmes de cultures.

Nous nous sommes rendus compte après l'analyse des types, d'une grande diversité des modalités d'accès à l'eau avec des orientations culturelles conséquentes. Globalement on assiste à une généralisation de l'irrigation même chez les plus petites exploitations via l'investissement dans des forages privés et une tendance vers l'investissement dans l'arboriculture.

Dans la partie suivante on essayera d'analyser les trajectoires des exploitations communes enquêtées en 2005 et 2015 pour identifier les changements qui ont eu lieu en 10 ans et essayer d'expliquer les facteurs et les mécanismes qui ont amené à ces changements.

5. LES TRAJECTOIRES DES EXPLOITATIONS AGRICOLES FRUIT DES CHOIX STRATEGIQUES DANS UN ENVIRONNEMENT PARTAGE

Après l'identification et la caractérisation des différents types d'exploitations en 2005 et 2015, nous allons dans cette partie essayer d'analyser les transitions qu'ont connues 69 exploitations enquêtées en 2005 et revisitées en 2015. Nous voulons détecter les différents changements qui ont eu lieu dans une décennie et les transitions des exploitations d'un type à un autre. On ne se limitera pas à une simple description des évolutions mais on cherchera à comprendre les mécanismes qui sont à l'origine de ces changements, avec les facteurs d'environnement climatiques, économiques, institutionnels, technologiques, etc. Ces moteurs de changement sont activés à différents moments tels que : la succession des périodes de sécheresse, la disponibilité des eaux souterraines, la révolution de Jasmin, l'accès aux marchés, la fluctuation des prix, etc.

5.1. Aperçu des trajectoires individuelles des exploitations entre 2005 et 2015

A partir des deux typologies de 2005 et 2015 nous avons construit une matrice de passage qui résume les transitions des exploitations d'un type à un autre, marquant un changement d'orientation ou une certaine stabilité. Les transitions les plus importantes sont marquées en rouge et orangé.

Le changement le plus observé qui a marqué l'évolution des exploitations en une décennie, est la généralisation de l'irrigation. En effet les exploitations orientées en 2005 vers des cultures pluviales (marquées en jaune) sont toutes irriguées en 2015. Il y a ceux qui ont gardé la même spéculation, d'autres ont apporté un changement radical dans leurs assolements.

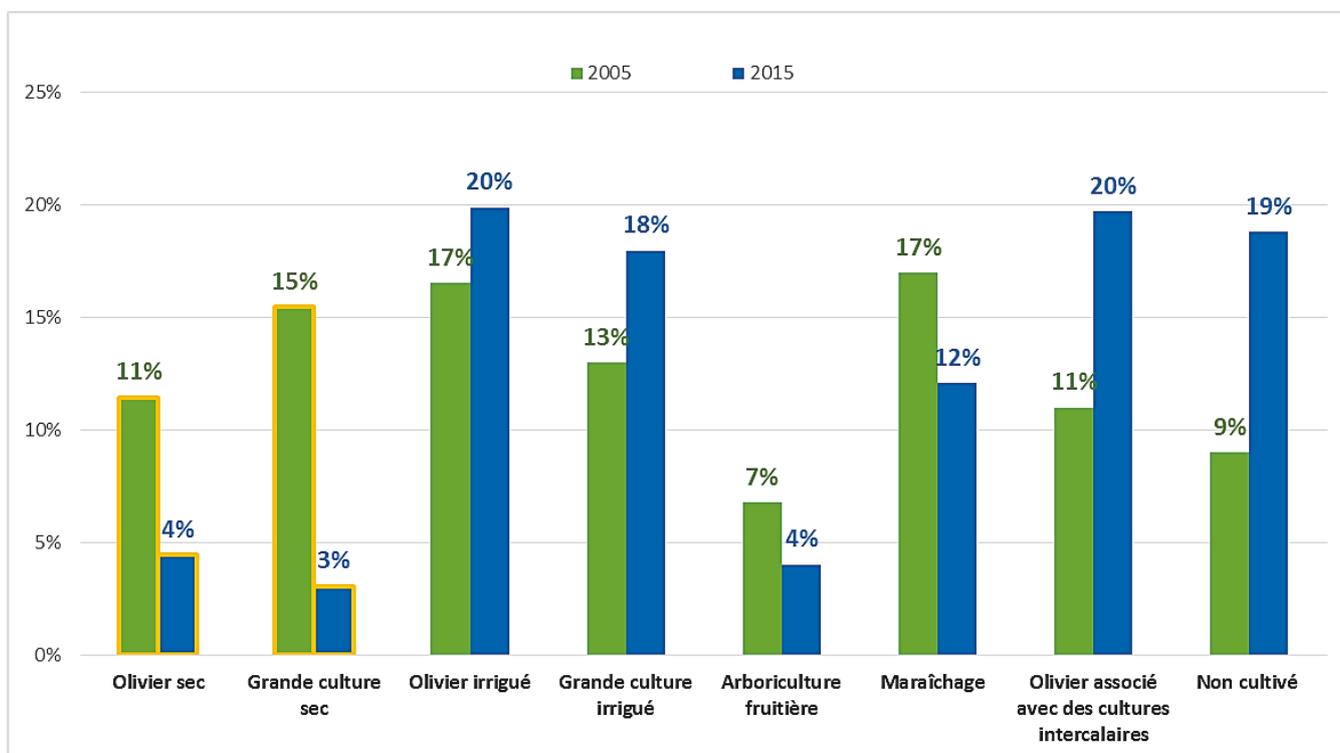
Les exploitations qui étaient orientées vers l'arboriculture et le maraîchage en intercalaire ayant un accès limité à l'eau sont devenues spécialisées en arboriculture (passage de I à 1 et 4) avec des investissements dans la mobilisation de la ressource (forages). Tandis que les exploitations qui cultivaient de l'arboriculture et du maraîchage en pur, pour une grande partie d'entre elles ont gardé la même stratégie d'intensification en cultivant plus de maraîchage (passage de VII à 3) avec un bon accès à l'eau, et une autre partie a gardé seulement l'arboriculture (passage de VII à 4). Les exploitations appartenant à des PPI qui avaient en 2005 un bon accès à l'eau et une grande diversification des systèmes de culture se trouvent en 2015 avec des assolements basés surtout sur l'arboriculture. Ils se sont limités à irriguer leurs oliviers (passage du groupe VI au groupe 4).

Tableau 4-11 : Matrice de passage des exploitations entre 2005 et 2015

	2015	2005						Total	
		Grandes exploitations bien équipées, diversifiées avec un bon accès à l'eau	Petites et moyennes exploitations avec un bon accès à l'eau principalement orientées vers l'arboriculture avec maraîchage en intercalaire	Petites et moyennes exploitations avec un bon accès à l'eau principalement orientées vers l'arboriculture avec maraîchage en plein champ	Exploitations en PPI avec un système de culture diversifié et un bon accès à l'eau	Grands céréaliculteurs éleveurs en majorité en sec	Moyennes exploitations spécialisées en olivier et grandes cultures en sec		Petites exploitations spécialisées en olivier et grandes cultures en sec
		III	I	VII	VI	IV	V	II	
Grands arboriculteurs avec un capital d'exploitation important et un bon accès à l'eau	2	0	0	4	0	1	0	0	5
Grands céréaliculteurs bien équipés avec un bon accès à l'eau	5	0	0	2	0	5	0	0	7
Grands arboriculteurs avec un accès limité à l'eau	1	0	6	3	2	2	5	1	19
Moyens et petits arboriculteurs ayant un bon accès à l'eau	4	0	3	0	4	0	2	3	12
Exploitations moyennes avec un bon accès à l'eau et une part importante de cultures maraîchères	3	0	1	5	1	0	0	1	8
Moyennes et petites exploitations appartenant aux PPI, alimentées principalement par les GDA	6	0	0	1	2	0	1	1	5
Moyennes et petites exploitations appartenant aux PPI, alimentées par des sources d'eau secondaires	7	0	0	1	1	0	1	1	4
Petits arboriculteurs faiblement irrigués	8	0	1	0	2	0	3	3	9
Total		0	11	16	12	8	12	10	69

Les transitions observés d'un type à un autre se traduisent, à l'échelle globale de la zone d'étude, par des inflexions des systèmes de cultures pratiqués. Le graphique ci-dessous résume l'évolution de l'assolement régional entre 2005 et 2015.

Figure 4-21 : Evolution des systèmes de cultures entre 2005 et 2015 (69 exploitations communes) en % des surfaces agricoles



Source : Enquêtes technico-économiques auprès de 69 exploitations : réalisées par Poussin et al., pour l'année 2005 et par Azizi Amal pour l'année 2015

Les évolutions observées pour les 69 exploitations communes suivent en moyenne les mêmes évolutions observées dans l'analyse de l'inventaire des exploitations. On remarque une diminution des superficies cultivées en sec qui passent de 26 % en 2005 à 7 % en 2015. Les superficies cultivées en olivier ont connu une augmentation de 12 % (olivier pur et olivier associé à d'autres cultures). Les cultures maraîchères en pur quant à elles ont connu une diminution de 5 %, ce qui est déjà ressenti lors de nos entretiens avec les agriculteurs qui ont exprimé une réticence de cultiver des cultures assez exigeantes en eau et en intrants. Cependant on assiste à une hausse de la proportion du maraîchage en intercalaire avec les oliviers ceci pour une meilleure valorisation de la ressource en eau apportée à la parcelle.

L'extension des superficies irriguées a été accompagnée par un équipement en goutte -à-goutte : les superficies équipées en goutte -à- goutte passent en 10 ans de 29% à 48 % de la sole irriguée (ANNEXE 13, ANNEXE 15). On a constaté aussi une diminution de la part de la superficie irriguée par les GDA, elle passe de 24% à 16% cela est expliqué par la dégradation du service des GDA et la fermeture de près de la moitié des PPI.

L'augmentation de potentiel d'irrigation observée chez ces exploitations n'est cependant pas un indice sur la disponibilité en quantité suffisante de la ressource et l'accomplissement des besoins ; en effet, on se rend compte d'une augmentation des superficies non cultivées de 10 % ; cela peut être un signe important de manque d'eau qui empêche les agriculteurs d'irriguer toutes les parcelles ou d'une insuffisance de trésorerie pour investir dans d'autres cultures. Dans d'autres cas la jachère est expliquée par des raisons agronomiques (rotation, préservation de la fertilité des sols).

Ces évolutions observées sont sans doute le fruit d'un environnement socio-économique et environnemental. Nous allons essayer dans la partie suivante de comprendre cet environnement partagé des exploitations, il va nous permettre de mieux comprendre les stratégies adoptées par ces agriculteurs et leur comportement vis-à-vis de la ressource en eau dans les différentes situations.

5.2. Environnement partagé des exploitations

Les exploitations agricoles ne sont pas dans un état immuable, elles évoluent. Elles ne sont pas aussi des entités de production isolées de leur milieu extérieur, elles sont au contraire influençables par les facteurs socioéconomiques et environnementaux avec lesquels elles interagissent et se transforment.

5.2.1 Facteurs économiques

5.2.1.1 Prix des intrants agricoles

Les prix des intrants connaissent une hausse très importante, ce qui pénalise les cultures à forte consommation (en intrants), comme les cultures maraîchères. En effet, le problème majeur dans cette filière est la flambée de prix des intrants dans une proportion plus importante que l'augmentation des prix de vente. L'agriculteur se trouve confronté à un besoin de financement important pour assurer son cycle d'exploitation au début de la campagne agricole, cette contrainte a limité la mise en place des superficies de maraîchage de plein champ.

5.2.1.2 Prix et marchés des produits agricoles

L'agriculteur en tant qu'agent économique rationnel dans son processus de production, vise à optimiser mais aussi à sécuriser son revenu dans un cadre de contraintes qui pèsent sur le fonctionnement de son exploitation. Le prix des produits agricoles est un élément incitatif puissant dans l'orientation des choix des agriculteurs. Entre 2005 et 2015 on remarque une hausse importante de prix d'huile d'olive qui passe de 4,190 DNT au 7,071 DNT (valeur nominale) le prix relatif est le plus élevé. L'évolution des prix relatifs donnent l'avantage à l'olivier par contre elle pénalise le maraîchage (ANNEXE 21). La culture de l'olivier est aussi une culture résistante aux conditions climatiques de la zone et elle est moins exigeante en intrants comparée aux autres cultures. Elle permet alors à l'agriculteur de dégager un revenu important ce qui explique l'extension des superficies cultivées en olivier durant cette période.

Les agrumes aussi sont très développées surtout dans le secteur de Abida, le prix de vente a connu une augmentation modérée (2012-2013), on a assisté à l'investissement dans plusieurs

vergers d'orange, de citron et de mandarine, cependant à partir de l'année 2014, on assiste à une chute de prix de ces produits sur les marchés, ceci est due à une surproduction à l'échelle nationale. L'Etat n'a pas pris de mesures d'interventions pour écouler le surplus de production enregistré et les agriculteurs ont subi les conséquences de ce déséquilibre. A partir des années 2013, on remarque un remplacement des vergers d'agrumes par la culture de pêcher et de pommier qui sont devenus plus rentables.

Pour les cultures maraîchères, les prix de ces produits sont soumis aux mécanismes de marchés concurrentiels régis par la loi de l'offre et de la demande, aggravés par leur caractère périssable ; ils subissent des grandes fluctuations d'une année à l'autre en fonction du volume de la récolte. La fluctuation des prix affecte énormément la décision des agriculteurs: en effet, l'augmentation de prix d'une culture en année N encourage les agriculteurs à la cultiver en année N+1 (un effet d'imitation). Ces mauvaises anticipations des producteurs alimentent les surproductions et baisses de prix.

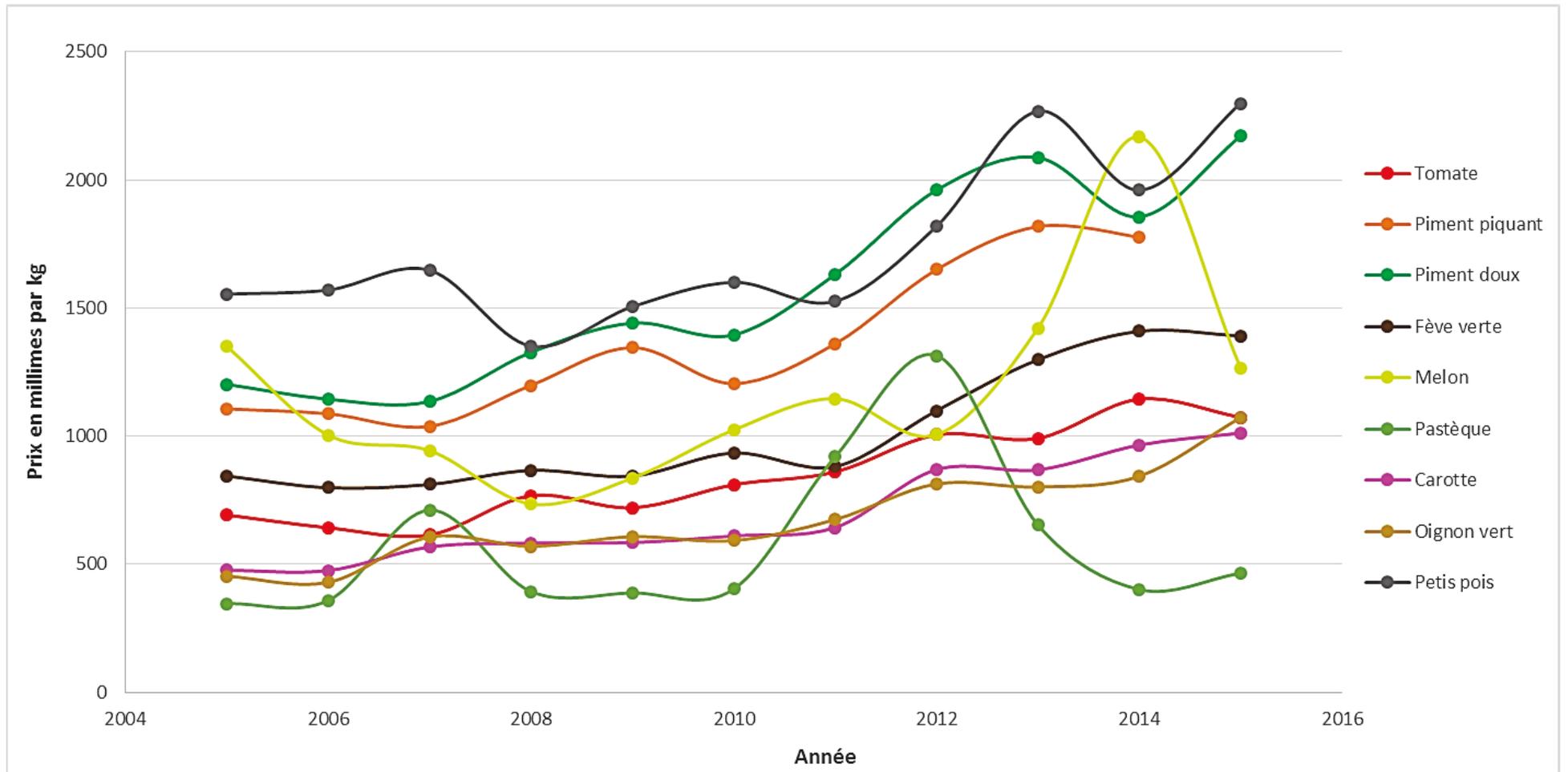
En 2015 on remarque une chute importante des prix du melon, il passe de 2,167 DNT en 2014 à 1,265 en 2015 (valeur nominale). Les cultures maraîchères les plus rentables en 2015 dans la plaine de Kairouan sont le petit pois le piment et la fève verte.

A ces problèmes de fluctuation des prix des produits et de l'absence d'intervention de l'Etat dans la régulation des marchés des fruits et légumes, s'ajoutent les problèmes de manque de main d'œuvre agricole qui est absorbée par le secteur industriel.

5.2.1.3 -Main d'œuvre

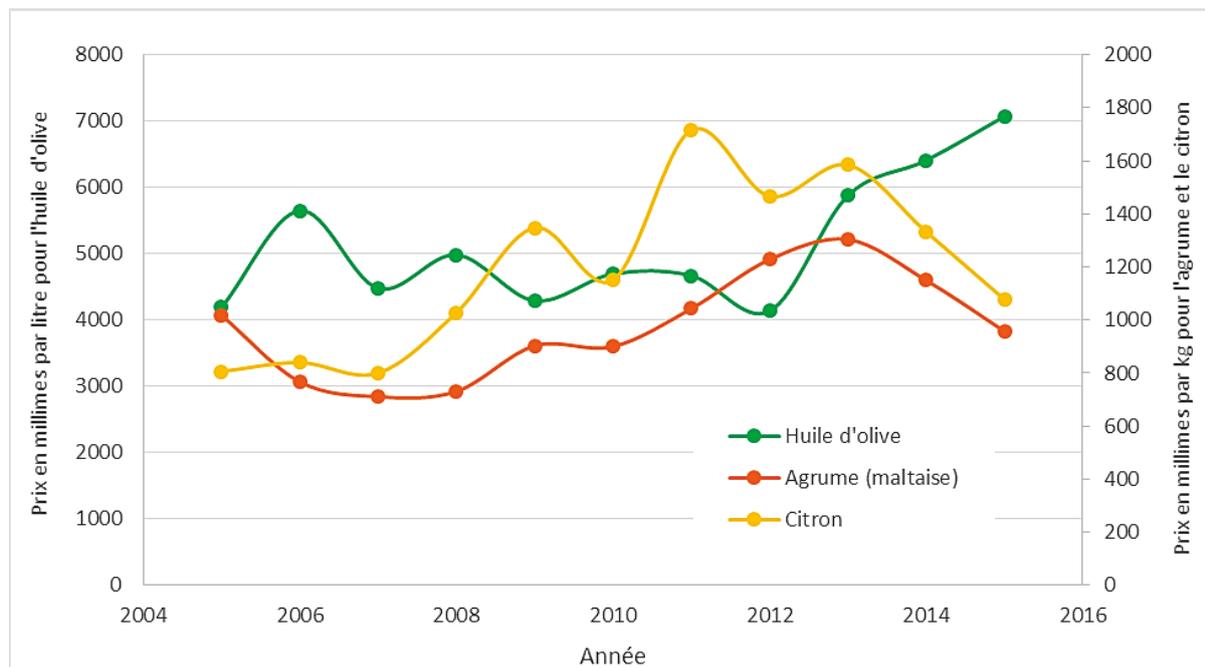
Les travaux agricoles dans la plaine de Kairouan sont dans la majorité assurés par les femmes rurales avec une rémunération très faible (12 DNT/ jour de travail sans compter les frais de transport). ces conditions amènent à un exode rural de la main d'œuvre agricole Kairouanaise vers la région du sahel pour travailler dans les industries (textile...) et garantir un revenu plus stable. Par conséquent dans les périodes de pointes (récolte, binage, semis...) les agriculteurs peuvent rencontrer des difficultés à mobiliser toute la main d'œuvre nécessaire.

Figure 4-22 : Evolution des prix au marché de gros des cultures maraîchères plaine de Kairouan 2005 - 2015



Source : INS (2005-2015)

Figure 4-23 : Evolution des prix au stade marche de gros de quelques produits arboricoles



Source : INS (2005-2015)

5.2.1.4 Commercialisation

Faute de moyens financiers et du volume de la production, les petites et moyennes exploitations sont généralement dépourvues des moyens de transport, se trouvent obligés de vendre leurs récoltes à des intermédiaires motorisés qui passent quotidiennement sur les différents secteurs de la zone. La marge la plus importante est tirée par ces intermédiaires (enquêtes typologie 2015), qui vendent la production au marché de gros de Kairouan et de Tunis. Les grands agriculteurs possèdent généralement des moyens de transport, ils ont le choix de vendre leur production sur les différents marchés selon l'importance de prix de vente, étant donné qu'ils disposent des informations sur le prix de différents marchés.

Les dernières années il y a un développement important de la modalité de vente avant récolte, les agriculteurs signent des contrats de commercialisation avec les intermédiaires ou directement avec les commerçants pour surmonter les difficultés de récolte (rareté de la main d'œuvre) et la périssabilité des produits. En effet, ce sont les produits maraîchers et arboricoles qui posent certains problèmes au niveau de leur commercialisation. Le problème est de plus en plus aigu pour les produits périssables (abricot, pêcher, tomate...).

Chaque année, une part importante de la production d'olives est transférée vers le Sahel et Sfax pour y être transformées. De même, le piment est souvent acheminé vers d'autres régions de la Tunisie (Tunis, Nabeul...) pour y être transformé en harissa.

Pour surmonter les problèmes de commercialisation, et éviter le risque de variation de prix, les agriculteurs étalent les semis et diversifient la production. En effet, actuellement, la pratique des cultures sous tunnel et paillage, qui assurent une récolte précoce, est très développée sur la

zone en particulier quand il s'agit des cultures en intercalaire avec l'arboriculture (brises vent). En effet, pour les cultures de pastèque et de melon, la marge entre prix au début de campagne et fin de campagne est importante. Suivant la même logique les producteurs de piment) font du piment tardif, piment de saison, piment précoce pour gagner sur le prix et pour équilibrer leur budget.

5.2.1.5 Prix de l'énergie

Un autre facteur important est le coût de l'eau dans la zone d'étude et les facteurs qui l'influencent. Le coût de l'eau diffère selon le mode d'accès à la ressource (PPI, forage, émergence) et aussi selon le type d'énergie utilisée pour le pompage (électricité ou gasoil).

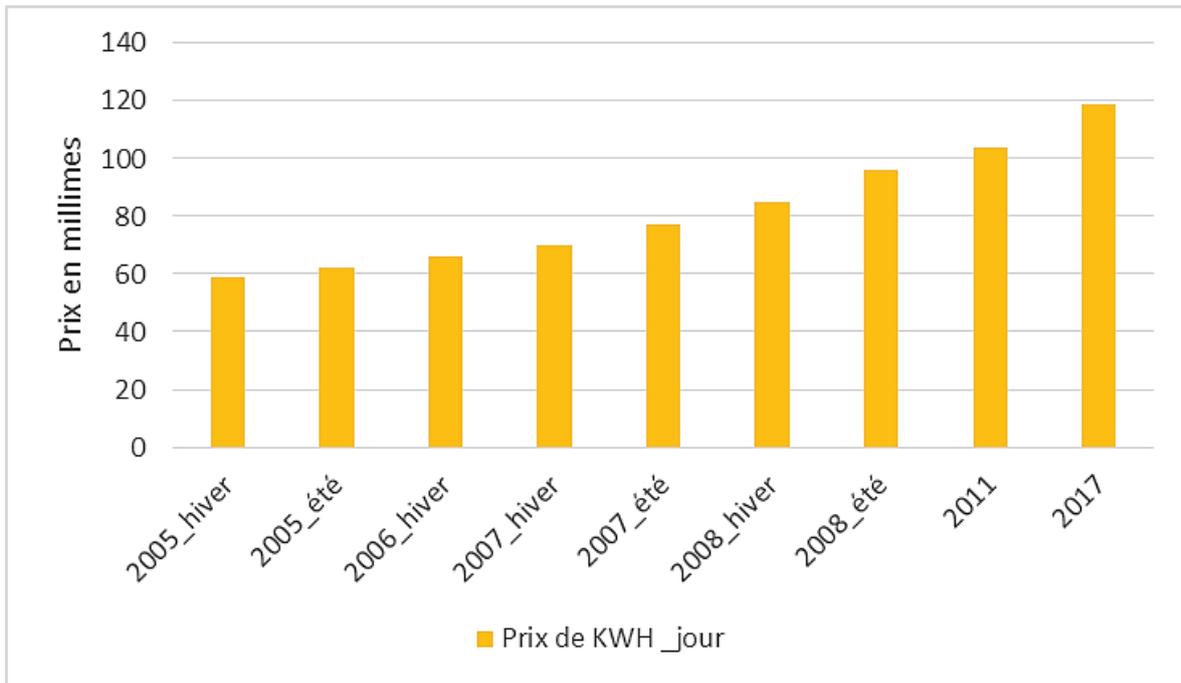
Les agriculteurs qui s'approvisionnent auprès des GDA ont le coût le plus faible, le prix moyen de vente d'eau dans les GDA est de 0,120 DNT par m³ ;

A ceci s'ajoutent les frais des conduites et des vannes et des goutteurs ces derniers dépendent de la position de l'exploitation dans le périmètre (tête de réseau, au milieu, fin du réseau), de la superficie de la parcelle et de la nature de la culture installée. Malgré un coût d'irrigation plus ou moins acceptable, ces agriculteurs souffrent d'une pénurie d'eau qui est due soit à des tours d'eau très longues soit à des interruptions de distribution causés par des pannes dans le réseau et des coupures d'électricité suite au non-paiement des dettes envers la STEG, ce qui les amène à installer leurs propres forages (Chapitre 3).

Pour les agriculteurs qui ont des forages, l'augmentation de prix d'électricité alourdit énormément les charges de production des agriculteurs surtout dans le cas des forages non autorisés, en effet, ils se trouvent obligés soit d'utiliser l'électricité domestique avec un tarif non subventionné soit d'installer des moteurs à gasoil qui sont de loin plus coûteux.

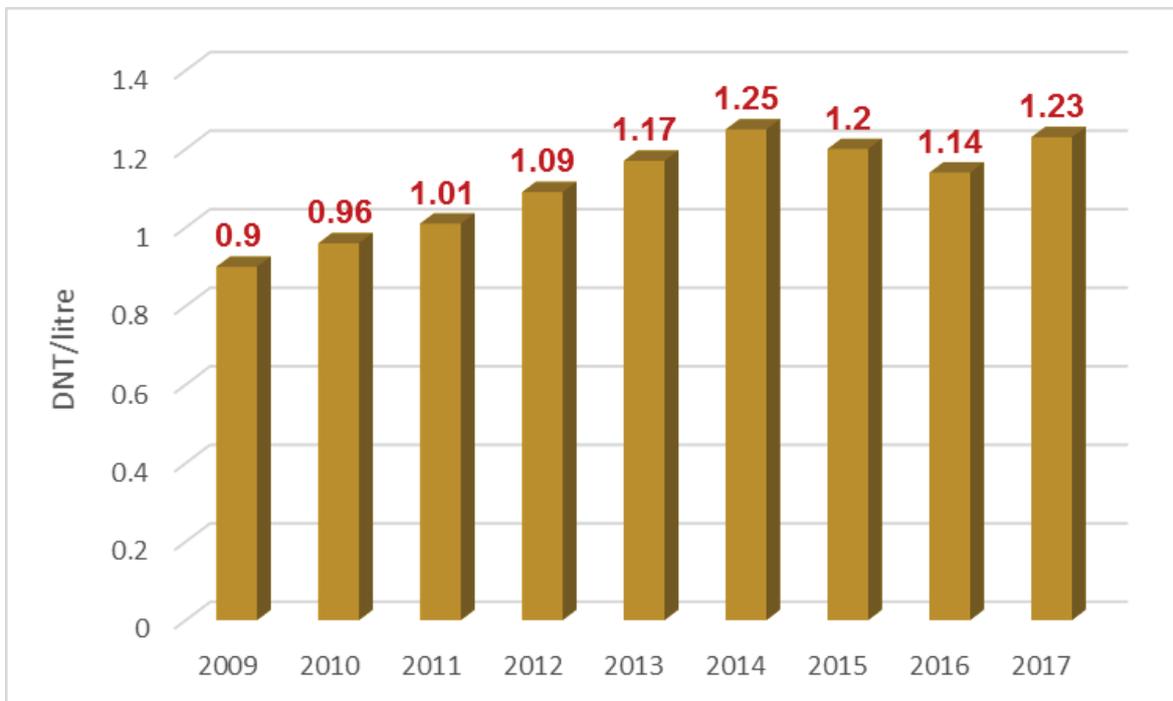
Quel que soit le coût de l'eau les agriculteurs continuent à irriguer leurs parcelles, en adaptant leurs systèmes de culture à la disponibilité de la ressource ou en cherchant à combler le manque d'eau par d'autres moyens, sans avoir pensé à des initiatives réelles pour limiter la surexploitation de la nappe. Ils pensent que c'est l'affaire de l'Etat et qu'ils n'ont pas d'autres alternatives pour irriguer leurs parcelles et assurer leur subsistance. Au cours de nos entretiens nous avons remarqué que les agriculteurs ressentent bien le rabattement de la nappe (1 m en moyenne chaque année) mais ils n'ont pas de solutions, ils disent « une année pluvieuse peut rétablir l'équilibre et sauver la situation ».

Figure 4-24 : Evolution de prix de KWH d'électricité : tarif agricole



Source : CRDA (2005-2017)

Figure 4-25 : Evolution de prix de gasoil (par litre)



Source : CRDA (2009-2017)

5.2.2 Facteurs institutionnels et sociaux

L'événement le plus important qui a marqué l'histoire moderne de la Tunisie est « la révolution de Jasmin » (14 janvier 2011). Cette révolte populaire tunisienne a mis fin au « pacte social »

fondé sur la « logique de l'obéissance » (Béatrice 2006) articulé à un modèle spécifique de développement économique. La crise de ce pacte social se manifeste dans les revendications liées au travail et à l'augmentation du taux de chômage. Cette révolte populaire a permis l'émergence de différentes tentatives de reconstruction politique, dans une phase dite de « transition » (De Facci 2014).

Ce contexte de transition a eu des effets en cascade surtout dans le monde rural et l'exploitation des ressources naturelles du pays. En effet, l'administration avait pour objectif de calmer la situation, elle a attribué les autorisations pour installer les forages privés, La STEG a électrifié en conséquence ces forages.

Concernant la gestion des PPI, dès le lendemain de la Révolution tunisienne, les membres des GDA ont contesté les conseils d'administration en place. Ils ont exprimé leur revendication contre le manque de représentativité, la corruption et la mauvaise gestion, et ont affirmé leur volonté de choisir eux-mêmes leurs représentants (Ghana 2011). Ces réclamations ont débouché sur de nouvelles élections. Outre une amélioration du fonctionnement de la démocratie locale au sein de ces GDA, la Révolution a permis une plus grande liberté de parole (Elloumi 2011). Les acteurs locaux ont acquis une plus grande capacité d'exprimer leurs points de vue et leurs propres analyses (Ben Mustapha et al. 2015), ce que nous avons déjà ressenti au moment des entretiens avec les membres de GDA. Cependant ce processus d'émancipation des tutelles publiques s'est accompagné de plusieurs insuffisances, les nouveaux conseils d'administration n'ont pas été choisis selon des critères fiables (niveau d'éducation, capacité de gestion...) et avec une situation héritée déjà dégradée, ils se trouvent incapables de gérer les ressources des GDA et de subvenir aux besoins de ses membres. La STEG dans la période de révolution n'a pas pris des décisions de coupure pour les GDA endettés, les dettes s'accumulaient sans aucune restriction de la part du STEG ce qui a augmenté le taux d'endettement des GDA qui ont finis, ces dernières années, par un dysfonctionnement totale suite à des coupures d'électricité. L'état des GDA a encouragé les irrigants à installer leurs propres forages et la crise ne s'arrête pas à s'accroître.

L'effet de ces facteurs sur les exploitations agricoles n'est pas identique et les conséquences qui en découlent varient d'un type à un autre, même d'une entité de production à une autre. La réponse des agriculteurs et les manières d'adaptation sont aussi diverses.

Les traits marquant l'environnement partagé de ces exploitations sont :

- Des conditions climatiques très irrégulières,
- Des PPI non fonctionnels et d'autres avec une dégradation du service (allongement des tours d'eau ou rupture d'approvisionnement),
- Des forages privés en expansion et un Etat incapable de gérer la ressource , d'où une sur-exploitation de la nappe,
- Une fluctuation des prix des produits agricoles,
- Des conditions difficiles de commercialisation,
- Un manque de main d'œuvre qualifiée,

- Contexte post révolutionnaire entre la décentralisation, la liberté d'expression et l'absence d'une véritable application de la loi.

Dans la partie suivante, on essayera d'expliciter les transitions des exploitations d'un type à un autre. . On veut comprendre les stratégies des différents types d'exploitations pour s'adapter aux contraintes du milieu extérieur et notamment à la raréfaction de la ressource en eau, compte tenu de leurs spécificités, objectifs et contraintes. Dans quelle mesure la raréfaction de la ressource engendre-t-elle des échanges d'eau entre les agriculteurs ou une concentration des prélèvements dans certains types d'exploitations? La fluctuation des prix amène-t-il à une diversification des systèmes de production ou au contraire à une spécialisation dans des cultures plus rentables et moins risquées?

5.3. Mécanismes d'évolution des exploitations agricoles

Face à un contexte économique fluctuant et des conditions environnementales en voie de dégradation avec l'abaissement des nappes , les agriculteurs réagissent différemment, chacun adoptant une stratégie en fonction de ses objectifs, ses moyens et ses contraintes. En analysant la matrice du passage des exploitations enquêtées, 6 trajectoires d'évolution peuvent être identifiées en fonction de plusieurs mécanismes (internes et externes à l'exploitation).

5.3.1 L'accès à l'eau entraîne des changements importants des structures et systèmes de culture dans les exploitations initialement en sec, (passage du groupe IV au groupe 5, du groupe V au groupe 1)

Dans les exploitations initialement en sec en 2005 et bien dotées en capital foncier ou financier, l'installation de forages ou l'accès à d'autres sources d'eau ont engendré des modifications importantes. Cela concerne 13 exploitations (soit près de 20% des exploitations communes) des groupes IV, V, II en 2005 qui ont évolué respectivement vers les groupes 5, 1, 4, en 2015. Les changements d'orientation de production sont plus ou moins importants selon les cas.

Dans les grandes exploitations orientées principalement en grandes cultures en sec en 2005 (groupe IV), les revenus importants liés à la taille des exploitations, la stabilité des prix des céréales fixées par l'Etat, ont permis d'investir dans l'installation de forages privés. Ces exploitations ont conservé leur orientation vers les grandes cultures, dorénavant conduites en irrigué. L'amélioration des revenus qui en a résulté a permis à ces agriculteurs d'acheter des équipements agricoles plus performants (groupe 5 en 2015).

Exemple 1:

L'exploitation de Ammar Ben Salah (n°79), passage du groupe IV au groupe 5, située dans le secteur Hammad, douar Gjajif, avait une superficie totale de 76 ha en 2005, dont seulement 5 ha étaient irrigables(par des sources naturelles), car elle n'avait aucun accès privé à l'eau. Elle cultivait 20 ha de céréales en sec, 3 ha d'olivier en sec, 3 ha olivier irrigué, 5 ha de maraichage en intercalaire. Le reste de la superficie était constituée de parcours pour l'alimentation du cheptel (60 brebis et 3 vaches laitières). En 2015, la superficie totale a diminué (35 ha) en liaison probablement avec une division des terres entre les héritiers. Le propriétaire a installé en 2014 un forage privé, autorisé à 120 m de profondeur qui lui permet

d'irriguer 30 ha (15 ha grandes cultures, 12 ha olivier, 3 ha maraîchage) et les t 5 ha restants sont non cultivés. Seuls 25 % de la superficie sont équipés en goutte-à-goutte, le reste est irrigué par aspersion. L'exploitant projette d'installer de l'arboriculture fruitière.

Dans les exploitations plus petites (groupes V et II en 2005) l'investissement dans un forage privé s'est accompagné d'un changement radical dans les assolements : passage d'un système basé sur les grandes cultures et l'olivier en sec vers l'arboriculture irriguée (olivier et arbres fruitiers). Cette transition s'est accompagnée pour la majorité des exploitations d'une extension des superficies cultivées par achat ou location et d'un développement important de l'irrigation (passage des groupes V et II en 2005 vers les groupes 1 et 4 en 2015).

Exemple 2 :

L'exploitation de Ammar (n°73), passage du groupe V au groupe 1, est une exploitation familiale appartenant au secteur Hammad, douar Graguya, de 27,5 ha en 2005. Elle cultivait des céréales et de l'olivier en sec (groupe 5). Elle possède un puits de surface depuis les années 1980 mais qui s'est tari en raison du rabattement de la nappe. Le propriétaire a décidé d'approfondir son puits pour atteindre une profondeur de 120 m. Le forage non autorisé fonctionne avec une pompe électrique. La superficie déclarée en 2015 est de 21 ha. L'accessibilité à l'eau souterraine a permis d'irriguer les grandes cultures et les oliviers et de planter des arbres fruitiers en intercalaire, et d'évoluer ainsi vers le groupe 1 en 2015. 48% de la superficie est équipée en goutte-à-goutte. Le projet de cet agriculteur est de planter toute la superficie en arboriculture fruitière.

Exemple 3 :

L'exploitation des héritiers de Hassan (n°96), passage du groupe V au groupe 1, située dans le secteur Houffia, douar Ksesba. L'exploitation avait une superficie de 40 ha en 2005 cultivée en olivier et grandes cultures en sec. Après le décès du père la propriété a été divisée à parts égales entre les 5 frères, mais continue à être exploitée comme une seule entité. La profondeur importante de la nappe dans ce secteur rend coûteuse l'installation d'un forage. Par contre la localisation des parcelles à proximité de l'oued a conduit ces agriculteurs à exploiter l'eau de l'oued : ils ont installé des moteurs à gasoil sur la rive et irriguent la totalité de leurs parcelles d'oliviers, par seguida.

L'investissement dans des forages privés permet une disponibilité en eau qui offre à ces exploitations une certaine souplesse dans le choix des systèmes de culture

On observe une tendance de ces agriculteurs à valoriser l'investissement dans un meilleur accès à l'eau par l'arboriculture (olivier et arboriculture fruitière), en effet cette culture est moins exigeante en main d'œuvre et en intrants, et assure un revenu annuel plus sécurisé qui offre à ces exploitations une grande sécurité financière. Cette tendance peut être un motif d'évolution vers d'autres trajectoires dans les prochaines années.

5.3.2 L'intensification par l'installation de cultures maraîchères à forte valeur ajoutée : une stratégie pour valoriser la ressource en eau, supporter le coût des prélèvements et créer de la richesse, (passage de groupe VII au groupe 3)

Les cultures maraîchères sont des cultures exigeantes en eau, en main d'œuvre et en intrants (fertilisants, phytosanitaires) par contre elles peuvent être très rémunératrices et sont considérées comme les cultures à plus forte productivité et plus forte valeur : en 2015, le Kg du piment doux est vendu à 2.171 DNT sa marge brute à l'ha est d'environ 8000DNT/ha. .

Certaines exploitations de la plaine (*passage du groupe VII au groupe 3*) pratiquant déjà un peu de maraichage ont choisi la stratégie d'intensification pour rentabiliser leurs petits lots de terre. Le taux d'intensité culturale (surface développée/ surface physique) est passé de 94% en 2005 à 215% en 2015. En effet, ils ont en majorité des faibles superficies (en moyenne 7 ha) cultivées principalement en olivier. Les agriculteurs choisissent de cultiver le maraichage en intercalaire avec leurs oliviers. La part des cultures maraîchères est passée pour ces exploitations de 32% à 43% de la surface physique ? mais il faudrait raisonner sur la surface développée (+ de 50%?).

La stratégie d'intensification a été accompagnée par une grande utilisation de la main d'œuvre familiale et occasionnelle, en effet ces maraîchers ont développé un savoir-faire important : ils maîtrisent le programme de fertilisation et d'apport d'irrigation pour chaque culture et ils savent aussi sélectionner les variétés adaptées à leurs sols. La présence des forages privés permet d'apporter les quantités d'eau nécessaires surtout en période de pointe. Ces exploitations sont caractérisées par une généralisation des équipements en goutte-à-goutte et par un accès maîtrisé à l'eau d'irrigation.

Malgré la grande fluctuation des prix des cultures maraîchères, le risque lié aux possibilités de commercialisation et la sensibilité de la majorité des produits (périssables) aux conditions de transport et de stockage, ces exploitations s'orientent vers les mêmes types de cultures à cycle court: melon, pastèque, tomate et piment. Ces cultures sont très pratiquées par les agriculteurs surtout en intercalaire avec l'olivier dans la plaine de Kairouan. Un effet d'imitation peut être ressentis en discutant avec les agriculteurs.

La baisse de prix d'une culture pour une année laisse les agriculteurs penser qu'il va augmenter l'année suivante. Dans les dernières années, les agriculteurs de la plaine ont surmonté les crises conjoncturelles de surproduction en diversifiant les espèces cultivées avec la fève, carotte, petits pois, etc. Le prix de ces cultures sont plus aux moins stables par rapport aux prix de pastèque et du melon (Figure 4-22) qui connaissent des chutes importantes en 2013 et 2015.

Pour pallier ces instabilité des marchés certains agriculteurs ont cherché des contrats de commercialisation avec des grossistes en vendant leur production sur pied avant la récolte (le marchand réalise la tâche de récolte) ou en établissant des transactions avec différents commerçants après la récolte. L'investissement dans des cultures maraîchères nécessite la disponibilité d'une trésorerie qui permet de supporter le coût de l'investissement. Les agriculteurs sont encouragés par la possibilité d'avoir des avances d'intrants et d'équipements d'irrigation (goutteurs, les conduites...) auprès des sociétés de services agricole de la zone (des

sociétés privées qui vendent les intrants et les équipements d'irrigation), au début de la campagne. Ces sociétés constituent un facteur facilitateur pour l'installation de ces types de cultures.

Exemple 4 :

Exploitation de Khmais (n°11), (passage de groupe VII au groupe 3), située dans le secteur Chebika , douar Jbilette , elle a une superficie de 10,5 ha , elle était exploitée sous forme mogharsa ; en 2005 cette exploitation avait un seul forage avec un bassin de réserve. L'assolement était basé sur l'olivier irrigué avec du maraîchage en intercalaire et en plein champ. Avec le temps l'agriculteur arrive à s'approprier d'une partie de la terre. Cette sécurité foncière l'encourage à installer un second forage en 2014 ; le forage est autorisé, possède une profondeur de 120 m et fonctionne par l'énergie électrique.

La disponibilité de l'eau à encourager l'exploitant à installer plus de maraîchage en effet sur les 10,5 ha qu'ils possèdent 7,5 ha sont cultivées en maraîchage (4 ha melon en plein champ et 3,5 ha piment et fève en intercalaire avec les oliviers). Ils sont tous équipés en goutte-à-goutte. L'agriculteur vise à investir dans un autre forage privé et à installer de l'arboriculture fruitière et plus de maraichage en intercalaire. Grace à cette stratégie d'intensification réussie basée sur des cultures à forte valeur ajoutée, cet agriculteur a pu s'assurer une promotion sociale et économique, il est passé d'un statut de petit métayer à celui d'un propriétaire qui dégage des revenus importants.

5.3.3 Naissance d'un marché d'eau : les échanges d'eau un motif pour surmonter la rareté de la ressource et fournir une souplesse au système, (passage du groupe V au 7, du groupe I au groupe 4, du groupe 2 au groupe 8)

Dans un contexte de rabattement important de la nappe et des changements climatiques, le coût d'exhaure de la ressource est devenu de plus en plus important. Par ailleurs le prix d'électricité ne cesse pas à augmenter (Figure 4-24). En cas d'absence d'autorisation d'installation de forage, l'agriculteur se trouve amené à payer un tarif non agricole qui est de loin plus élevé au tarif agricole. Dans le cas d'extraction de l'eau par le gasoil, le coût d'accès à la ressource est plus cher (Figure 4-25) et alourdi énormément le budget de l'agriculteur en effet un litre de gasoil est vendu en 2015 à 1,2 DNT. Certains agriculteurs utilisent l'eau potable pour garantir la survie de leurs oliviers.

Certains agriculteurs possèdent des forages taris suite au rabattement important de la nappe, ils n'arrivent pas à supporter le coût d'approfondissement (100-250 DNT/ mètre creusé), d'autres ne possèdent aucune source d'eau et ne peuvent pas investir dans un forage privé (coût d'installation d'un forage de 120 m peut atteindre 45 millions).

La difficulté d'accès à la ressource en eau constitue un blocage aux petits et moyens agriculteurs qui ont cherché à trouver d'autres solutions qui leur permettent à irriguer leurs parcelles.

Durant la phase de terrain, nous avons remarqué une grande diversité d' exploitants, en termes d'accès au foncier et à l'eau, de force de travail et de capital financier, qui génère des modalités d'échanges variées entre les détenteurs de ces capitaux (Amichi et al., 2016).

Nous avons identifié dans notre échantillon 7 exploitations qui vendent de l'eau dont 5 exploitations sont déjà enquêtées en 2005.

7 exploitations enquêtées déjà en 2005 parmi les 16 exploitations qui ont choisi de combler le manque d'eau par achat d'eau.

Ainsi, nous avons pu repérer dans la plaine de Kairouan différentes modalités d'échanges liés au foncier et à l'eau:

- Certains agriculteurs qui n'ont pas accès à la ressource en eau préfèrent louer leurs terres à d'autres agriculteurs qui ont des forages privés ou qui peuvent payer les redevances des GDA, pour cultiver du maraîchage en intercalaire de leurs oliviers. La location de la terre se fait parfois sans contrepartie monétaire, la rente foncière correspond dans ce cas à l'irrigation des oliviers.
- Une autre modalité d'échange se fait entre voisins : l'exploitant qui possède un forage privé vend l'eau contre un prix fixe par heure ou l'équivalent des frais d'énergie (électricité ou gasoil).

Exemple 5 :

L'exploitation de Ali (n°106), (passage du groupe V au 7), appartient au secteur Karma, douar Chouarbia, elle a une superficie de 12 ha. En 2005 l'agriculteur ne cultive que l'olivier et les grandes cultures en sec. Elle fait partie du périmètre irrigué Henchir Bouali qui fait face à plusieurs difficultés. La dégradation du service du GDA a engendré un manque d'eau structurel dans l'exploitation. Pour irriguer ses parcelles l'exploitant achète l'eau des voisins contre 150 millimes le m³ et parfois il irrigue avec de l'eau potable.

L'exploitant a aussi pris des terres en métayage qui appartiennent à un GDA non fonctionnel (Henchir el Borj), le propriétaire de ces parcelles n'arrive pas à les irriguer, il les cède en location contre 1/5 de la production (métayage 1/5, 4/5).

L'achat d'eau permet à cet agriculteur d'irriguer ces oliviers et de cultiver un peu de maraîchage. (58% de la superficie est devenue irriguée).

Malgré l'insuffisance de la ressource, l'achat d'eau est sécurisé, l' agriculteur a exprimé son intention d'installer de l'arboriculture fruitière.

Exemple 6 :

L'exploitation de Mouhamed (n°33), (passage de I au 4), étendue sur une superficie de 7 ha dans le secteur Chebika, douar Wled Zair. Il possède un forage privé non autorisé qui fonctionne par le gasoil. Malgré son bon potentiel d'irrigation, l'exploitant choisit d'abandonner les cultures maraîchères. Il a aussi arraché ses amandiers Il se limite à irriguer ses oliviers. En contrepartie une nouvelle activité s'est développée c'est « la vente d'eau ». Il vend les 30000 litres (30 m³) à 160 DNT. Cette activité est devenue une activité commerciale

pour l'exploitant qui lui apporte un revenu supplémentaire qui remplace la marge qui aurait dû être dégager en installant le maraîchage.

Enfin, une nouvelle dynamique apparaît dans la zone d'étude : des vendeurs d'eau qui ont des moyens de transport vont chercher la ressource à l'amont (lacs collinaires) ou dans l'émergence du barrage pour apporter des citernes d'eau et les revendent à un prix élevé aux agriculteurs qui veulent garantir la survie de leurs oliviers. Une citerne de 5000 litres est vendue à 35 DNT.

Exemple 7 :

L'exploitation de Nabil (n°83), (passage du groupe 2 au 8), est une exploitation située dans le secteur Ouled Khalfalah, douar Ouled Khelif étendue sur une superficie de 12.5 ha dont seulement 3,5 ha sont cultivés en olivier en sec en 2015. L'exploitant possède un forage à gasoil, en 2008 ils ont cultivé 5 ha de tomate, suite à un manque d'eau (incapacité de supporter les frais de gasoil), ils ont raté leur production. Suite à cet évènement, la situation économique de l'exploitation n'a pu être relancée, les deux frères se limitent à irriguer les oliviers avec de l'eau achetée par citerne auprès des commerçants d'eau dans la zone. La citerne (5000 litres) est vendue à 35 DNT. Cette activité a permis à ces agriculteurs de maintenir la production de leurs oliviers et de garantir un minimum de revenue agricole.

Les deux frères ont un niveau universitaire, ils sont en train de développer un système d'irrigation sans recours à l'utilisation de gasoil ou à l'énergie électrique (énergie hydraulique). Le manque structurel d'eau constitue pour cette exploitation un frein au développement de l'exploitation et un facteur qui a obligé les deux frères à abandonner l'activité agricole.

Ces types d'échanges augmentent fortement la valeur économique de l'eau et génère une concentration de la ressource chez une catégorie d'exploitants qui ont les moyens financiers pour installer des forages privés. L'iniquité de la répartition de la ressource accroît ainsi les inégalités sociales.

Les échanges d'eau redynamisent les arrangements contractuels formels et informels et génèrent l'apparition de différentes modalités d'échanges de foncier et de capitaux. La diversité de ces échanges peut influencer les choix stratégiques des agriculteurs (leurs assolements, leurs rotations, leurs consommations en eau...) d'où la nécessité de les prendre en compte dans l'analyse du processus décisionnel des agriculteurs et sa modélisation.

5.3.4 Un désengagement des cultures maraîchères de plein champ (passage du groupe I au 1 et du groupe I à 4) au profit de l'arboriculture

La fluctuation des prix des cultures maraîchères, la rareté et le coût élevé des intrants, la variation des conditions climatiques, le manque d'eau, la rareté de la main d'œuvre qualifiée et les problèmes de commercialisation de ces produits ont engendré chez certaines exploitations une réticence à cultiver du maraîchage. C'est surtout les grandes exploitations qui possèdent du capital foncier et financier pour investir dans des vergers d'arboriculture qui ont choisi d'abandonner ces cultures. Cette stratégie est très répandue dans la zone d'étude : en effet l'orientation vers l'arboriculture malgré qu'il immobilise un capital important, elle est moins

risquée que l'installation des cultures maraîchères, et fournit à l'agriculteur un revenu annuel plus sécurisé (Figure 4-23). La culture de l'olivier reste la plus prépondérante, d'une part elle constitue la culture traditionnelle de la zone d'étude d'autre part elle permet aux exploitants de dégager un revenu très important (surtout par la transformation en huile d'olive). En effet le prix d'une litre d'huile d'olive est vendue en 2015 à 7,071 DNT (prix courant).

Un autre motif qui a encouragé ce choix cultural est le développement des contrats de commercialisation avant récolte, ceci constitue pour l'agriculteur un moyen de sécurité contre la variation de la demande sur le marché, la rareté de la main d'œuvre et le coût élevé de transport et présente pour le marchand un moyen pour garantir un produit à meilleur qualité et à faible prix comparé aux prix sur les marchés.

Cette stratégie est très développée dans le secteur Abida « secteur des bourgeois » comme le nomme les agriculteurs de la plaine ceci est due à la fertilité des sols de ce secteur et au pouvoir économique des agriculteurs dans la zone (marchés, participation à la vie politique...)

Exemple 8 :

L'exploitation de Salem (n° 75), (passage du groupe I à I) située dans le secteur Hammad, Douar Briquette. Elle avait en 2005 une superficie de 18 ha, elle n'avait pas d'équipement, l'activité agricole était assurée surtout par une main d'œuvre familiale, seulement 28 % de la superficie était irrigable équipée en goutte à goutte et elle était cultivée en maraichage en intercalaire avec l'olivier. Le taux d'intensification était de 140%. En 2015, on remarque une extension de la superficie totale qui est étendue sur 24 ha. On assiste aussi à une absence des cultures maraîchère dans l'assolement au profit des céréales et de l'olivier et de l'arboriculture fruitière. Par conséquent le taux d'intensification baisse pour atteindre 100%. L'exploitant a choisi de s'orienter vers les cultures les moins risquées et les moins exigeantes. Cette stratégie permet à l'agriculteur de dégager un revenu plus élevé qui lui permet d'acquérir un matériel de transport et de labour et d'acheter plus UGB qui a passé de 3,6 à 6,9

La source d'eau pour cette exploitation est un puits privé autorisé installé en 2002 qui a subi une succession d'approfondissement pour atteindre 90 m. Il est électrifié et irrigue 14 ha.

5.3.5 Agrandissement de l'exploitation et développement du capital foncier (passage du groupe I et VII au groupe 1)

Le marché foncier (achat et vente) dans notre zone d'étude est peu actif. En effet, la valeur de la terre dépasse la simple valeur monétaire à un patrimoine hérité par les différentes générations. En outre, la zone a un potentiel agricole important, posséder une terre dans la plaine de Kairouan constitue une opportunité et engendre une compétition entre les différents agriculteurs. Cependant, quelques exploitations ont pu acheter les terres des propriétaires qui sont à l'étranger ou qui veulent délaisser l'activité agricole.

Ces agriculteurs ont adopté tout d'abord une stratégie d'intensification qui traduit une volonté de conserver une certaine flexibilité, par le maintien d'une diversité de productions et la transformation rapide des différentes activités en réponse aux changements tels que la baisse des prix des récoltes, la hausse des prix des intrants, les problèmes techniques ou une opportunité de

gain, tout en épargnant quand cela s'avère possible. L'épargne dégagée était investie après pour accroître le foncier cultivé (association, location, achat) en effectuant des arrangements avec d'autres agriculteurs pour palier à un manque d'eau sur l'exploitation. Les agriculteurs qui ont adopté cette stratégie se sont orientés après en arboriculture fruitière.

Exemple 9 :

L'exploitation de Belgacem (n° 25) appartient au secteur Chebika, douar Wled Zaier étendue en 2005 sur 12 ha, toute la superficie est irriguée par un puits de surface autorisé, à gasoil installé en 1993 qui avait une profondeur de 32 m après une série d'approfondissement pour atteindre une profondeur de 65 m. Sa capacité d'irrigation est de 3 ha. Le système de production est diversifié avec une dominance de l'arboriculture : 67 % arboriculture fruitière, 25 % olivier irrigué. Toute la superficie est cultivée (taux d'intensification 100%). L'exploitant a pu accéder à plus de terre par achat et location, la superficie totale couvre en 2015, 20 ha, 65 % de la superficie est irriguée, l'arrachage du pommier et l'investissement dans un nouveau verger d'olivier a augmenté les besoins en eau de cette exploitation. L'agriculteur a investi en 2007 dans un deuxième forage autorisé électrifié à 117m de profondeur et permet l'irrigation de 10 ha.

5.3.6 Exploitations caractérisées par une stabilité de structure et de système de production : (passage de II, V au 8)

Certaines exploitations sont restées stables, c'est le même système de production qui est reproduit. Cette stagnation peut être expliquée par le manque des ressources financières des exploitants et de réels motifs de changement qui peuvent amener à l'évolution. Cette situation caractérise les petites et moyennes exploitations (groupe II et V) qui sont menées en sec. Durant les dix dernières années la majorité de ces exploitations n'ont pas pu investir ni dans l'achat des nouvelles parcelles, ni dans l'installation des forages. Les agriculteurs ont gardé la même spéculation basée sur l'olivier en sec qui permet de dégager un revenu annuel complémentaire à leurs activités non agricoles. Ils préfèrent ne pas prendre de risques et valoriser les ressources dont ils disposent, plutôt que de dépendre d'achats d'intrants et d'autres ressources. Ils favorisent les cultures pluviales dont les prix sont plus stables et dont les coûts totaux de production sont les plus faibles. La main d'œuvre familiale effectue la majorité des travaux de l'exploitation et les ouvriers saisonniers sont rarement sollicités.

Exemple 10 :

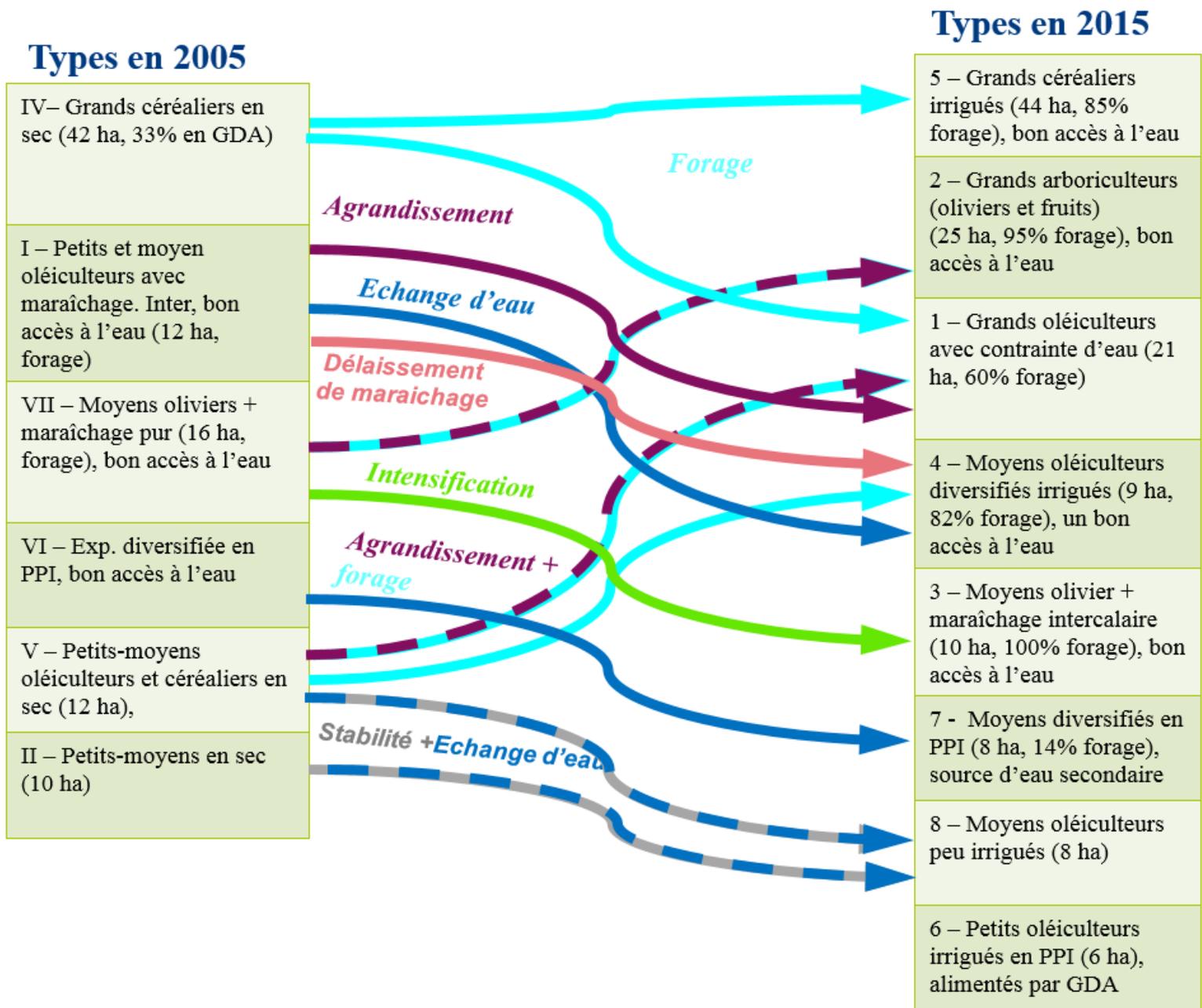
L'exploitation de Fraj (n°107), passage du groupe V au groupe 8, étendue sur une superficie de 9 ha, elle n'a pas une source d'eau ni d'équipements, l'assolement est basé sur les cultures pluviales (grandes cultures et olivier). En 2005, 56% de la superficie est non cultivée. L'exploitant a gardé la même stratégie et les mêmes orientations culturelles sauf qu'une partie de la superficie est mise en location. Il y a aussi une diminution des têtes ovines. L'agriculteur n'a pas de projection future pour moderniser l'exploitation. Il tend vers le délaissement de l'activité agricole.

La combinaison des trajectoires des exploitations entre ces systèmes-types, aboutit à une nouvelle image du paysage agricole en 2015. Les évolutions observées sont résumées dans la

Figure 4-26. 6 trajectoires sont identifiées, le détail de ces mouvements est donné dans la matrice de passage (Tableau 4-11) .

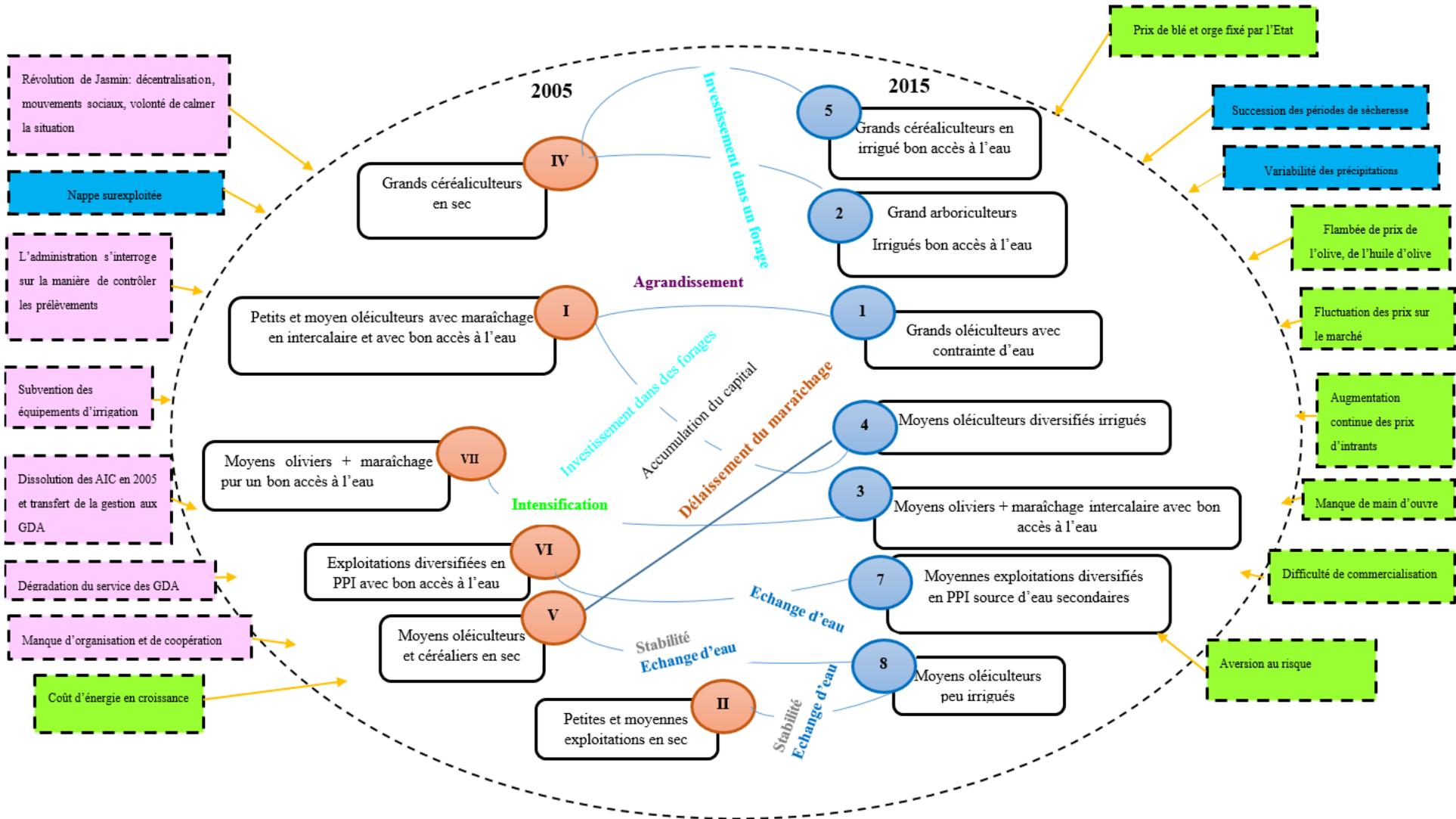
Les stratégies ne sont pas indépendantes les unes des autres. En effet le choix stratégique des agriculteurs en 2015 est certainement une succession d'une série de stratégies antérieures. La Figure 4-27 montre les différentes phases transitoires pour chaque stratégie adoptée.

Figure 4-26 : Les trajectoires d'évolution des exploitations entre 2005 et 2015



Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Poussin et al., 2008 pour l'année 2005 et enquêtes technico-économiques réalisées par Azizi Amal pour l'année 201

Figure 4-27 : Les mécanismes et stratégies adoptées dans un environnement partagé



6. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons cherché, dans un premier temps, à identifier les changements globaux qui ont eu lieu dans la plaine de Kairouan à partir la comparaison des résultats d'analyse de deux inventaires d'exploitations réalisés en 2005 et 2015. En une décennie, la plaine a connu des dynamiques agricoles contrastées entre les différents secteurs de la plaine marquées par un morcellement important qui a conduit au dédoublement des exploitations. La part des exploitations irriguées a également augmenté, s'accompagnant d'une modification des systèmes de culture : augmentation des superficies cultivées en olivier et en arboriculture fruitière, retrait du maraîchage cultivé en plein champ, augmentation de la part du maraîchage en intercalaires qui assure une meilleure valorisation des ressources utilisées, accroissement des superficies mises en jachère. Cette évolution a été accompagnée par une augmentation globale de la consommation en eau (passant de 32 Mm³ en 1999 à une quantité estimée entre 52-55 Mm³ en 2015).

Dans deuxième temps, nous avons cherché à caractériser la diversité existante dans ce territoire en se basant sur une étude réalisée en 2005 sur la même zone d'étude. Pour cela, nous avons réalisé des enquêtes technicoéconomiques auprès des exploitations agricoles. Notre approche de terrain était en boule de neige partant des exploitations visitées en 2005, en essayant d'analyser les principales évolutions en une décennie tout en cherchant à identifier les nouveaux types qui sont apparus. Nous avons pu enquêter 126 exploitations agricoles dont 69 avaient déjà été enquêtées en 2005. Nous avons collecté des informations sur la structure des exploitations, l'évolution historique, les systèmes de production (cultures, pratiques agricoles, utilisation des facteurs de production, etc.). Nous avons cherché à dégager les contraintes qui pèsent sur leur fonctionnement en se concentrant sur la question de l'eau : l'évaluation de sa disponibilité de la ressource, des modalités d'accès et des moyens d'adaptation en cas de manque structurel ou conjoncturel.

Nous avons identifié par la suite les variables de structure et d'assolement les plus discriminantes pour différencier les exploitations agricoles à l'aide d'ACP. Ce sont les variables de structure qui sont les plus discriminantes aux deux dates, notamment celles liées à l'accès à la ressource en eau et aux techniques d'irrigation. Certaines différences sont toutefois identifiées entre les deux dates : la contribution de la part d'irrigation (superficie irrigable, superficie irriguée) et la part d'équipement en goutte à goutte ne sont plus corrélées avec la superficie totale en 2015 : on assiste en effet à une généralisation de l'irrigation et une multiplication des forages privés même pour les petites exploitations qui ont pu accumuler du capital. L'association olivier-arboriculture fruitière devient structurante en 2015 alors qu'elle ne l'était pas en 2005 tandis que les cultures pluviales ne le sont plus.

Une classification hiérarchique ascendante a ensuite été appliquée sur les deux bases de données. Sept types d'exploitations sont identifiés en 2005 contre 8 types en 2015.

- En 2005, nous avons distingué 3 groupes d'exploitations en secs orientés principalement en olivier et grandes cultures, 3 autres groupes caractérisés par un bon

accès à la ressource et des systèmes de culture diversifiés (arboriculture, maraîchage) et un groupe d'exploitation en PPI ayant aussi un bon accès à l'eau.

- En 2015, nous avons distingué, des grandes exploitations ayant un bon accès à l'eau : un groupe est spécialisé en grandes cultures, l'autre est orienté principalement en arboriculture (olivier + part importante de fruit). Nous avons aussi identifié des grands arboriculteurs qui ont pu investir dans des nouveaux vergers d'olivier et d'arboriculture fruitière mais qui ont un accès limité à l'eau. Les arboriculteurs moyens possèdent quant à eux dans leur majorité des forages qui leur procurent un accès sécurisé à l'eau. Est également présent un groupe de maraîchers possédant un accès facile à l'eau, ayant un niveau important d'intensification. Deux types d'exploitations appartenant aux PPI ressortent aussi : le premier alimenté principalement par le GDA et le second alimenté par des sources secondaires. Enfin des petits arboriculteurs faiblement irrigués sont identifiées.

Nous avons ensuite retracé les trajectoires des exploitations présentes en 2005 et cherché à identifier les principaux bouleversements qui se sont produits en 10 ans. Les évolutions observées quant à la structure des exploitations et aux systèmes de cultures sont soit le résultat de contraintes importantes qui poussent l'agriculteur à réorienter ses choix (conditions climatiques, accès difficile à la nappe, trésorerie...), soit le produit des décisions publiques.

Ainsi, dans le cadre de la recherche d'une meilleure valorisation des ressources allouées au secteur agricole et face à la raréfaction de l'eau et aux performances encore réduites du secteur irrigué, l'Etat Tunisien a adopté dès 1995 un programme national d'économie d'eau en irrigation dont les objectifs primordiaux résident dans la rationalisation de l'utilisation de l'eau d'irrigation. Ceci se traduit par l'octroi de subventions à l'irrigation aux agriculteurs disposant de titres fonciers, des encouragements pour l'installation de forages privés et des investissements pour la réhabilitation des PPI. Ces initiatives ont conduit à une extension des superficies irriguées et au développement du goutte-à-goutte surtout chez les grands propriétaires terriens relativement aisés et intégrés à l'économie de marché. Des acquis importants sont réalisés en matière d'économie d'eau et d'amélioration de la productivité. Mais des défis demeurent : l'équipement en matériel d'économie d'eau à la parcelle n'a pas abouti à une économie d'eau significative au niveau national. Par contre, il a permis à l'échelle de l'exploitation une meilleure rentabilité suite à des bénéfices additionnels importants, l'eau économisée ayant été utilisée pour intensifier les systèmes de cultures (Al Atiri, 2005).

Dans la plaine de Kairouan, l'investissement dans des forages et l'apparition du goutte-à-goutte chez les grandes exploitations, initialement orientés vers la céréaliculture et l'olivier en sec, a favorisé l'intensification du système de culture par l'installation des fourrages d'été pour les exploitations qui ont gardé la céréaliculture comme culture spéculative (groupe 5) et par l'investissement dans des cultures maraîchère chez d'autres exploitations ce qui leur permet à cumuler des capitaux et investir dans des vergers d'olivier et d'arboriculture fruitière (groupe 2). L'orientation vers les cultures irriguées permet à ces exploitations de dégager des revenus importants utilisés après dans la modernisation et l'équipement des exploitations.

Contrairement aux grands propriétaires terriens, l'accès à l'eau se traduit chez les petites exploitations (groupe 3) par l'orientation vers les cultures maraîchères créatrices de richesse (piment, tomate, pastèque, melon et récemment cultures de fève verte, petits pois et carotte), pour rentabiliser leurs petits lots de terre. Ceci a été encouragé par le développement des sociétés de services agricoles qui avancent des crédits d'intrants aux agriculteurs et par l'importance de prix de ces cultures sur le marché malgré sa grande variation.

Une autre trajectoire a été identifiée chez des exploitations ayant pu assurer un agrandissement de leur exploitation par location de terres ou plus rarement par achat sans modification de l'orientation de production (groupe 1).

Les changements intervenus sur l'environnement économique des exploitations agricoles surtout après la révolution tunisienne (2011) se sont traduits par une libéralisation des prix des intrants. Cela s'est surtout matérialisé par une dégradation de la rentabilité financière des céréales et de quelques cultures maraîchères. La question des moyens d'atteindre un seuil minimum de rentabilité se pose alors de manière encore accrue, les charges d'électricité ainsi que le prix des engrais, des herbicides et autres produits phytosanitaires ayant connu une grande flambée, tandis que les prix à la production sont restés en moyenne stables même si fortement fluctuants. Dans ce contexte, certaines exploitations (groupe 4) ont choisi de délaisser les cultures maraichères pour s'orienter vers l'arboriculture avec une dominance de la culture de l'olivier.

Les agriculteurs de la plaine de Kairouan font ainsi face à différentes contraintes liées à l'accès à la ressource en eau :

- La dégradation du service rendu par les GDA et la fermeture de plus que la moitié d'entre eux (cf. Chapitre 3) ont provoqué un manque structurel d'eau chez les exploitations dans les PPI. Différentes stratégies ont alors été adoptées : des exploitations ont choisi d'abandonner une partie de leurs parcelles, d'autres se sont contentées de cultiver en pluvial, d'autres enfin ont décidé d'investir dans des forages privés (parfois pour certains en continuant d'alterner deux sources d'eau pour irriguer leurs terres : celle du GDA et celle du forage).

La dégradation du service des GDA a donc engendré une expansion des forages privés. Cette tendance est accentuée après la révolution : dans un contexte de pression sociale tendue de contestation et de tentatives de déstabilisation, l'administration n'a pas pu freiner ce mouvement et les agriculteurs se sont permis de contourner la loi et d'installer des forages illicites.

- Le coût d'investissement dans l'installation des forages ou l'approfondissement des puits de surface est important, les frais d'exhaure de l'eau (électricité, gasoil) également, conduisant certains agriculteurs à abandonner leur forage. Cela a conduit à l'émergence d'un clivage entre deux catégories d'agriculteurs : ceux possédant le capital et qui arrivent à installer leurs propres forages s'accaparant la ressource en eau, les autres donnant leurs terres en location ou métayage ou achetant l'eau des propriétaires des forages ou des commerçants d'eau dans la zone (groupe 7 et 8). On

assiste alors à la naissance d'un marché d'eau informel offrant une certaine flexibilité aux agriculteurs pour accéder à la ressource et irriguer leurs parcelles mais augmentant les iniquités sociales préexistantes dans la zone, avec des effets en cascade sur l'accès aux facteurs de production (intrants et main d'œuvre), la commercialisation des produits dans les marchés et aussi les négociations régionaux (UTAP).

L'analyse des différentes trajectoires observées en 10 ans et l'explication des différents motifs d'évolution des exploitations agricoles a fait ressortir que les éléments les plus discriminants dans le choix du système de culture et par conséquent le niveau de la consommation en eau sont la disponibilité en eau dans l'exploitation et les modes d'accès à la ressource. L'agriculteur adapte son système de production aux ressources disponibles dans l'exploitation ou à qu'il peut mobiliser par d'autres moyens. La combinaison des différentes contraintes (climatiques, économiques et sociopolitiques) qui ont émergé durant une décennie a conduit à une expansion des forages privés et à la dégradation des services du GDA.

Dans le contexte actuel de la Tunisie, il n'est pas possible d'instaurer des nouvelles politiques de gestion pour limiter le creusement des forages et l'utilisation d'une ressource en libre accès. Les autorités ne disposent pas des moyens nécessaires pour contrôler le dépassement d'un quota d'eau par exemple, il n'y a pas non plus de tenure foncière sécurisée qui permettrait d'établir un marché de l'eau. Il est donc important de mieux cerner le comportement des irrigants en présence de différents moyens d'accès à la ressource pour réfléchir aux outils qu'il serait bon d'instaurer dans une telle situation. C'est pourquoi nous modélisons dans le chapitre suivant le comportement d'exploitations types, confrontées à différents types d'accès à l'eau.

CHAPITRE 5

Du terrain au modèle : quelle demande en eau en présence de différents modes d'accès à la ressource ?

1. INTRODUCTION

La caractérisation de la situation des GDA et les difficultés qui entravent leur fonctionnement, l'identification des dynamiques globales qu'a connu la plaine de Kairouan et les différents changements des systèmes de cultures et des modalités d'accès à la ressource nous ont permis de mieux comprendre les contraintes qui pèsent sur le fonctionnement des exploitations agricoles et d'identifier quelques déterminants de leur demande en eau. La construction de la typologie des exploitations agricoles et l'analyse des trajectoires d'évolution nous ont donné une idée sur les stratégies d'adaptation développées pour surmonter un manque d'eau structurel ou conjoncturel. Nous voulons dans ce chapitre modéliser le comportement des irrigants face à différents modes d'accès à l'eau et en tenant compte de plusieurs stratégies d'irrigation. L'idée est de comprendre la façon dont les agriculteurs font leurs choix, d'identifier les déterminants clés, le degré de flexibilité et la capacité d'adaptation des systèmes de production et de décrire l'évolution des assolements dans leurs différentes composantes (techniques, économiques, sociales...) face à des changements probables de l'environnement extérieur (politique de prix, politique énergétique...) (voir Chapitre 2).

2. MODELISATION DU COMPORTEMENT DES IRRIGANTS

Pour modéliser le comportement des agriculteurs, nous avons eu recours à la programmation mathématique (PM). L'hypothèse de base des modèles de PM stipule que la rationalité d'un agent consiste à optimiser une fonction d'utilité sous contraintes. Cette hypothèse répond parfaitement à la théorie microéconomique néoclassique : rationalité et caractère optimisateur de l'agent.

2.1. Description générale du modèle

Bien que la programmation mathématique ait été utilisée par les économistes, dans plusieurs cas, en tant qu'outil d'aide à la décision purement normatif (voilà ce qu'il faut faire) (El Amami et al. 2014), nous nous sommes orientés dans cette partie vers une utilisation positive descriptive : il ne s'agit pas de viser des objectifs optimaux mais plutôt de reproduire une réalité de terrain, de comprendre les décisions des agriculteurs de manière à anticiper les adaptations futures face à des changements extérieurs. Notre modélisation emprunte toujours aux fondements de la théorie économique mais en la soumettant à une ouverture pluridisciplinaire tout en refusant systématiquement les approches trop normatives.

Comme nous l'avons mentionné dans le Chapitre 2, notre modèle est un modèle de programmation linéaire tant dans la fonction objectif que dans les contraintes techniques. Le modèle est aussi statique et mono-périodique et l'horizon de modélisation est annuel.

L'objectif principal du modèle est de représenter le fonctionnement d'une exploitation type (groupe 4 : moyen et petit arboriculteur ayant un bon accès à l'eau) dans différentes situations d'accès à l'eau (GDA, forage, GDA+ forage) (Figure 5-1). Chaque source d'eau définit un niveau de confort (disponibilité en eau) bien déterminé. La fixation de la structure d'exploitation et la modification de la modalité d'accès à l'eau revient à modéliser 3 types

d'exploitations différentes et permet d'identifier les stratégies d'agriculteurs et leur demande en eau dans chaque cas. Ceci nous permettra par la suite de comprendre le phénomène d'expansion des forages privés et de l'illustrer par des calculs économiques. Le modèle servira aussi à simuler l'impact de différents scénarios de variation de prix de l'eau, de niveau d'efficacité du GDA et de variation du coût de pompage pour les forages privés. Nous avons tenu en compte dans la modélisation du comportement des agriculteurs du risque de variation des rendements et des prix des produits agricoles. Notre modèle est alimenté par un modèle agronomique CROPWAT 8.0²⁰ qui sert à simuler la variation de rendement des cultures sur plusieurs années climatiques (Smith 1992). Nous avons aussi défini 3 stratégies d'irrigation et calculé la variation de rendement pour chaque cas. Cela va nous permettre d'évaluer la capacité des agriculteurs à s'adapter à une pénurie d'eau et le degré de flexibilité des assolements aux variations de la disponibilité en eau (passage d'une stratégie trop consommatrice en eau à une autre moins exigeante en ressource tout en gardant la même culture et tolérant une légère variation de rendement).

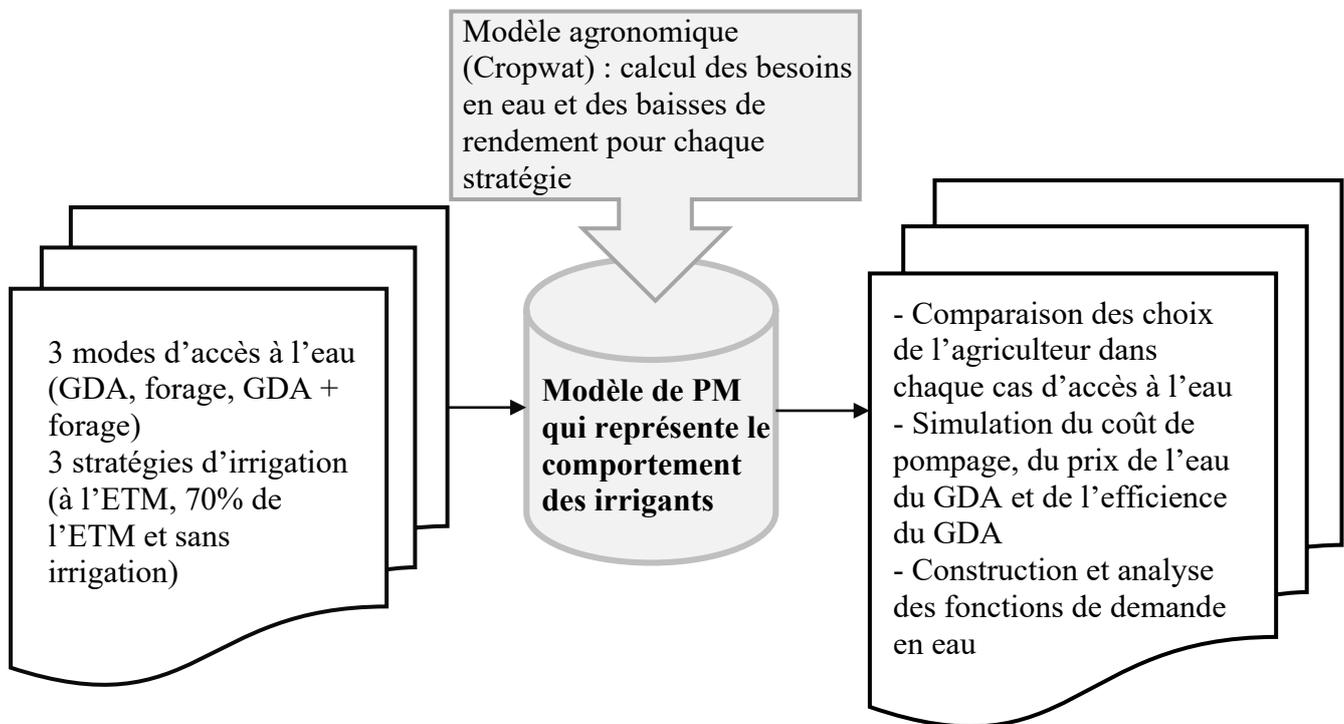


Figure 5-1 : Objectif du modèle construit

La formulation du modèle nécessite la spécification des activités de production, de leurs unités de mesure, de leurs besoins en ressources et de leurs rendements. Elle consiste aussi à définir les contraintes de ressources fixes de l'exploitation.

La « fonction objectif » est une fonction linéaire des inconnues x_j , qui désignent les superficies choisies pour les différentes cultures.

Mathématiquement, la formulation de notre modèle s'écrit :

²⁰ http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/faowater/Applications/CRW8.ZIP

$$\text{Max} \quad Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Sous contraintes} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \leq b_i \quad i = 1, 2 \dots m \quad \text{Eq. 2}$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2 \dots n \quad \text{Eq. 3}$$

Avec :

- Z : fonction objectif,
- c_j : vecteur de rendement économique de chaque activité (marge brute),
- x_{ij} : vecteur des activités,
- a_{ij} : matrice des coefficients techniques,
- b_i : vecteur qui exprime la disponibilité des ressources.

Le problème consiste à trouver le plan de production qui maximise le revenu de l'agriculteur tout en respectant les contraintes de ressources fixes de l'exploitation et les contraintes de non-négativité. En termes mathématiques, le problème consiste à trouver la combinaison de valeurs x_1, \dots, x_n qui maximise la fonction objectif (Eq. 1) en respectant les conditions (Eq. 2) et (Eq. 3).

2.2. Définition des activités de production

Nous nous sommes limités dans ce modèle à représenter les activités liées aux systèmes de production végétale : ce sont les plus consommatrices en eau comparées à l'activité d'élevage ; par ailleurs, les activités d'élevage sont assez minoritaires dans la plaine.

L'activité végétale X est définie en trois dimensions relatives au type de cultures, annuelles (ca) ou arboricoles (cp), au mode d'installation (a) : cultures associées²¹ ou cultures seules et à la stratégie d'irrigation (i) : $i1$ (irrigation à l'ETM²²), $i2$ (irrigation à 70% de l'ETM) et $i3$ (non irriguées).

Pour les cultures maraichères, nous avons distingué les cultures d'été des cultures d'hiver. Cette distinction est discriminante dans l'analyse de l'évolution de la demande en eau étant donné l'important différentiel de besoins en eau d'irrigation entre les cultures d'hiver et les cultures d'été.

Les cultures introduites dans le modèle sont l'olivier (écartement 10/10), l'oranger, la tomate d'été et d'hiver, le piment d'été et d'hiver, le melon de saison, le melon primeur sous tunnel et paillage, le blé dur et la jachère d'été. Ces cultures constituent les cultures les plus fréquentes dans la plaine. L'exploitation modélisée applique surtout la jachère d'été dans sa rotation

²¹ Cultures associées : ce sont des cultures installées en même temps que d'autres, en général des cultures arboricoles, sur la même parcelle. Dans la plaine, on trouve ainsi de l'arboriculture associée à des cultures maraichères ou à des grandes cultures. On parle aussi de « maraîchage et céréales cultivées en intercalaire avec l'arboriculture ».

²² ETM : l'évapotranspiration maximale (optimale) est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif, dans des conditions climatiques données. Elle se calcule en fonction d'une évaporation dite potentielle (ETP) et d'un coefficient cultural (KC) qui ramène le 'potentiel' aux conditions réelles.

culturelle pour des raisons agronomiques mais aussi du fait de la pression sur la ressource en eau en période d'été.

Toutes les stratégies d'irrigation définies ne sont pas réalisables pour toutes les cultures (par exemple les cultures maraichères ne peuvent pas être conduites en sec). Pour cette raison, nous avons défini un sous-ensemble des combinaisons possibles entre type de culture, mode d'installation et stratégies d'irrigation, que nous avons appliqué aux équations du modèle.

Pour donner de la souplesse au modèle, nous avons fixé seulement la superficie des cultures arboricoles, en admettant qu'un agriculteur qui possède un verger ne peut pas arracher ses arbres à moyen et court terme.

2.3. Les contraintes modélisées

Les décisions prises par l'agriculteur dans son exploitation ne sont pas seulement le résultat des objectifs qu'il vise à atteindre mais aussi une conséquence des contraintes qui pèsent sur le fonctionnement de son exploitation. Ces contraintes sont généralement liées à la disponibilité en facteurs de production. Le travail du modélisateur consiste à identifier celles qui ont un impact important sur les choix de l'exploitant. Dans notre modèle et en se basant sur les observations de terrain, nous avons identifié trois types de contraintes liées à trois facteurs de production : la terre, l'eau et le travail.

2.3.1 Contraintes relatives à l'occupation de la terre

La contrainte principale de terre est que la somme des superficies cultivées par les différentes cultures ne dépasse pas la superficie totale de l'exploitation s'il ne recourt pas à la location ou au métayage d'autres terres. Dans notre modèle, nous n'avons ainsi pas intégré la possibilité de louer d'autres terres : le prix des terres en location dans la zone est faible car ces dernières ne sont pas irrigables directement, le manque d'eau a même conduit plusieurs exploitations à donner leurs terres gratuitement contre l'irrigation de leurs oliviers ; par ailleurs l'échange de foncier se réalise selon différentes modalités difficiles à représenter dans un modèle.

Etant données la diversité des systèmes de cultures et la présence de cultures intercalaires associées aux cultures pérennes, d'autres types de contraintes s'imposent dans le modèle.

2.3.1.1 Contrainte de terre arborée

Elle traduit le fait que les superficies arborées sont constantes quelles que soient les choix d'autres cultures :

$$\sum_{a,i} X("OLI10", a, i) = Surf_{Arboree}("OLI10") \quad \text{Eq. 4}$$

Avec :

- $Surf_{Arboree}("OLI10")$: la superficie totale arborée occupée par l'olivier

$$\sum_{a,i} X("ORA05", a, i) = Surf_{Arboree}("ORA05") \quad \text{Eq. 5}$$

Avec :

- $Surf_{Arboree}("ORA05")$: la superficie totale arborée occupée par l'oranger

La culture de l'olivier dans la plaine de Kairouan peut être menée en sec ou en irrigué, tandis que l'oranger doit être irrigué. Imposer la superficie de l'oranger dans le cas d'une exploitation qui irrigue seulement à partir du GDA conduit à une solution infaisable, l'eau disponible dans le GDA ne permettant pas d'arroser les orangers à la dose fixée dans le modèle et cela quel que soit le prix de l'eau. Par conséquent, nous avons enlevé cette culture dans la modélisation de ce type d'exploitation.

2.3.1.2 Contrainte de terre nue

Cette contrainte exprime que la somme des superficies cultivées en plein champ ne doit pas dépasser la superficie non arborée disponible sur l'exploitation.

$$\sum_{ca,i} X(ca, "seul", i) * CalenCult(ca, m) \leq Surf_{NonArboree} \quad \text{Eq. 6}$$

Avec :

- $Surf_{NonArboree}$: la superficie totale non arborée disponible sur l'exploitation,
- $CalenCult(ca, m)$: matrice composée de 0 et de 1 reflétant le calendrier cultural des cultures annuelles mois par mois.

2.3.1.3 Contrainte d'association

La contrainte d'association est introduite pour garantir que la somme des superficies des cultures annuelles cultivées en association avec des cultures pérennes (maraîchage et blé) ne dépasse pas la superficie arborée associée.

Dans l'exploitation modélisée, seul l'olivier (écartement 10/10) peut être associé à d'autres cultures. L'oranger est cultivé en intensif (écartement 5/5) sans cultures intercalaires.

$$\sum_{ca,i} X(ca, "asso", i) * CalenCult_{(ca,m)} = \sum_i X("OLI10", "asso", i) * CalenCult_{(cp,m)} \quad \text{Eq. 7}$$

Avec :

- $CalenCult_{(ca,m)}$: le calendrier cultural des cultures annuelles,
- $CalenCult_{(cp,m)}$: le calendrier cultural des cultures pérennes.

2.3.1.4 Contrainte de rotation

La rotation culturale est la succession des cultures dans le temps sur une même parcelle, ce qui définit un assolement global sur toute l'exploitation. Les agriculteurs sont amenés à appliquer des rotations culturales pour des raisons agronomiques (maintien de la fertilité du sol, maladies) et pour éviter les risques liés à la spécialisation dans un seul type de culture (variation de prix, maladies...). Tenir compte des contraintes de rotation dans un modèle d'exploitation n'est pas toujours facile, étant donnée la difficulté d'estimer l'effet de ces rotations sur le rendement (précédent cultural). Par ailleurs, il est recommandé de ne pas multiplier ce type de contraintes car cela conduit à rigidifier le modèle.

Dans notre modèle, nous avons supposé que l'agriculteur applique une rotation triennale, dans laquelle deux années de maraîchage sont suivies par une année de céréales ou de jachère d'été. En effet cette pratique est couramment observée dans les exploitations enquêtées.

$$\begin{aligned} \sum_i ((X("TOM_H", "seul", i) + X("TOM_E", "seul", i) + X("PIM_H", "seul", i) \\ + X("PIM_E", "seul", i) + X("MEL_S", "seul", i) + X("MEL_TP", "seul", i)) \\ \leq 0.5(\sum_i X("BLEDU", "seul", i) + X("JACH_E", "seul", i3)) \end{aligned} \quad \text{Eq. 8}$$

2.3.2 Contrainte de travail

L'introduction des contraintes de travail dans les modèles de programmation mathématique exige de diviser l'année en périodes, les disponibilités en main d'œuvre n'étant pas transférables par nature d'une période à l'autre. Dans notre modèle, nous avons choisi de définir la disponibilité et le besoin en main d'œuvre à un pas de temps mensuel pour des raisons de simplicité. Nous avons ainsi défini le calendrier mensuel de travail par activité : besoin en main d'œuvre et les disponibilités en main d'œuvre familiale de l'exploitation. L'exploitation modélisée possède un actif familial qui travaille à temps plein (le chef d'exploitation) et d'autres qui participent à l'activité agricole à temps partiel (2 membres de la famille). L'agriculteur ne peut pas travailler tous les jours du mois, il faut prendre en compte les jours de repos et les empêchements climatiques. Nous avons supposé dans le modèle qu'un travailleur à temps plein dispose de 20 jours de travail par mois tandis qu'un travailleur à temps partiel apporte 10 jours de travail. Cette hypothèse est simplificatrice : il aurait été préférable de définir avec les agriculteurs le nombre mensuel de jours disponibles selon les périodes de l'année pour tenir compte des empêchements climatiques.

La disponibilité globale en main d'œuvre familiale dans l'exploitation est donc de 40 jours de travail par mois.

Le besoin mensuel en main d'œuvre de chaque culture :

- ne diffère pas entre le niveau d'irrigation i_1 et i_2 (la quantité de travail est la même quelle que soit la dose d'eau apportée) ;
- diffère entre cultures irriguées et non irriguées (i_1 et i_3) ;

- diffère entre cultures en plein champ et cultures en intercalaire proportionnellement à la superficie occupée par la culture sur la parcelle (pour le blé et les cultures maraîchères), voir ANNEXE 19;
- ne diffère pas entre cultures en plein champ et associées pour l'arboriculture.

$$\sum_{c,a,i} X(c, a, i) * BesMO(c, a, i, m) \leq MOoc(m) + DispMOfam \quad \text{Eq. 9}$$

Avec :

- $BesMO(c, a, i, m)$: besoin en travail des cultures selon les pratiques en jours par mois,
- $DispMOfam$: disponibilité mensuelle en main d'œuvre familiale en jours,
- $MOoc(m)$: embauche de main d'oeuvre occasionnelle en jours par mois.

Le caractère saisonnier de l'activité agricole conduit les exploitants à recruter de la main d'œuvre occasionnelle dans les cas où la main d'œuvre familiale permanente disponible ne satisfait pas les besoins pour la conduite de l'exploitation. Nous avons donc introduit dans le modèle la possibilité de recruter de la main d'œuvre occasionnelle.

2.3.3 Contraintes relatives à la disponibilité en eau

Dans la plaine de Kairouan, les trois modes d'accès à la ressource prépondérants sont : le GDA, les forages privés, et la combinaison des deux. La contrainte en eau traduit la capacité de l'agriculteur à satisfaire les besoins en eau d'irrigation de ses cultures. Nous avons défini dans le modèle trois stratégies d'irrigation pour estimer les besoins en eau dans chaque stratégie et les rendements résultants. Nous avons couplé notre modèle micro-économique à un modèle agronomique.

2.3.3.1 Couplage avec un modèle agronomique

Comme indiqué précédemment, pour tenir compte des différentes stratégies d'irrigation appliquées par les agriculteurs et du risque de variation des rendements en fonction des conditions climatiques et des apports d'irrigation, nous avons eu recours au modèle agronomique CROPWAT 8.0. C'est un système d'aide à la décision développé par la division de la mise en valeur des terres et des eaux de la FAO pour la planification et la gestion de l'irrigation (Smith 1992) cité par Souissi (2014). Il est conçu comme un programme informatique qui permet en fonction d'une large base de données climatiques de calculer les besoins en eau des cultures, les calendriers d'irrigation pour différentes conditions de gestion et la réponse du rendement à l'eau et à la salinité (Doorenbos et al. 1980). Le programme CROPWAT 8.0 est organisé en 8 modules, dont 4 modules d'entrée, qui requièrent un ensemble de données :

- *Données climatiques* relatives à l'évapotranspiration potentielle ET_0 et aux précipitations. Elles peuvent être structurées par mois, par décennie ou par jour. Cependant le programme présente l'inconvénient de ne pas pouvoir importer simultanément les données de toutes les années climatiques. Les simulations sont donc effectuées année par année. Nous avons pu collecter des données climatiques adaptées à la plaine de Kairouan, pour 7 années climatiques (de 2007 à 2013).

- *Données pédologiques* : le taux d'infiltration maximum, la profondeur d'enracinement maximale et l'épuisement initial du réservoir d'eau du sol. Nous avons utilisé les paramètres correspondant au « sol moyen » de la base de la FAO (sol contenant une part importante de limon), qui s'approche le plus des sols existant sur la plaine de Kairouan.
- *Données physiologiques et de croissance des cultures* : pour chaque culture, nous avons spécifié la date de semis ou de plantation, la durée de chaque stade végétatif, le coefficient cultural K_c , la profondeur d'enracinement, la fraction d'épuisement critique et le coefficient de réponse à l'eau du rendement K_y . En dehors de la date de semis, issue des enquêtes en exploitations, les autres paramètres utilisés sont ceux de la base de données de la FAO pour les cultures qui y sont référencées. Pour les cultures retenues dans le modèle mais absentes de la base de données CROPWAT (orange, olivier, melon), nous avons utilisé les paramètres (K_y , stade végétatif, fraction d'épuisement critique) issus de la littérature (R. Allen et al. 1998).

Les modules de sortie de CROPWAT sont les besoins en eau d'irrigation pour chaque période, le calendrier d'irrigation défini selon la stratégie fixée à chaque simulation. Ces stratégies d'irrigation consistent à appliquer différents apports d'eau (à l'ETM, 70% de l'ETM et non irrigué). La stratégie i2 (70% de l'ETM) est la stratégie la plus proche des pratiques des agriculteurs, la Figure 5-2 montre les besoins mensuels en eau d'irrigation pour quelques cultures.

Pour chaque niveau d'apport le modèle calcule la baisse de rendement correspondante K_y selon l'équation suivante :

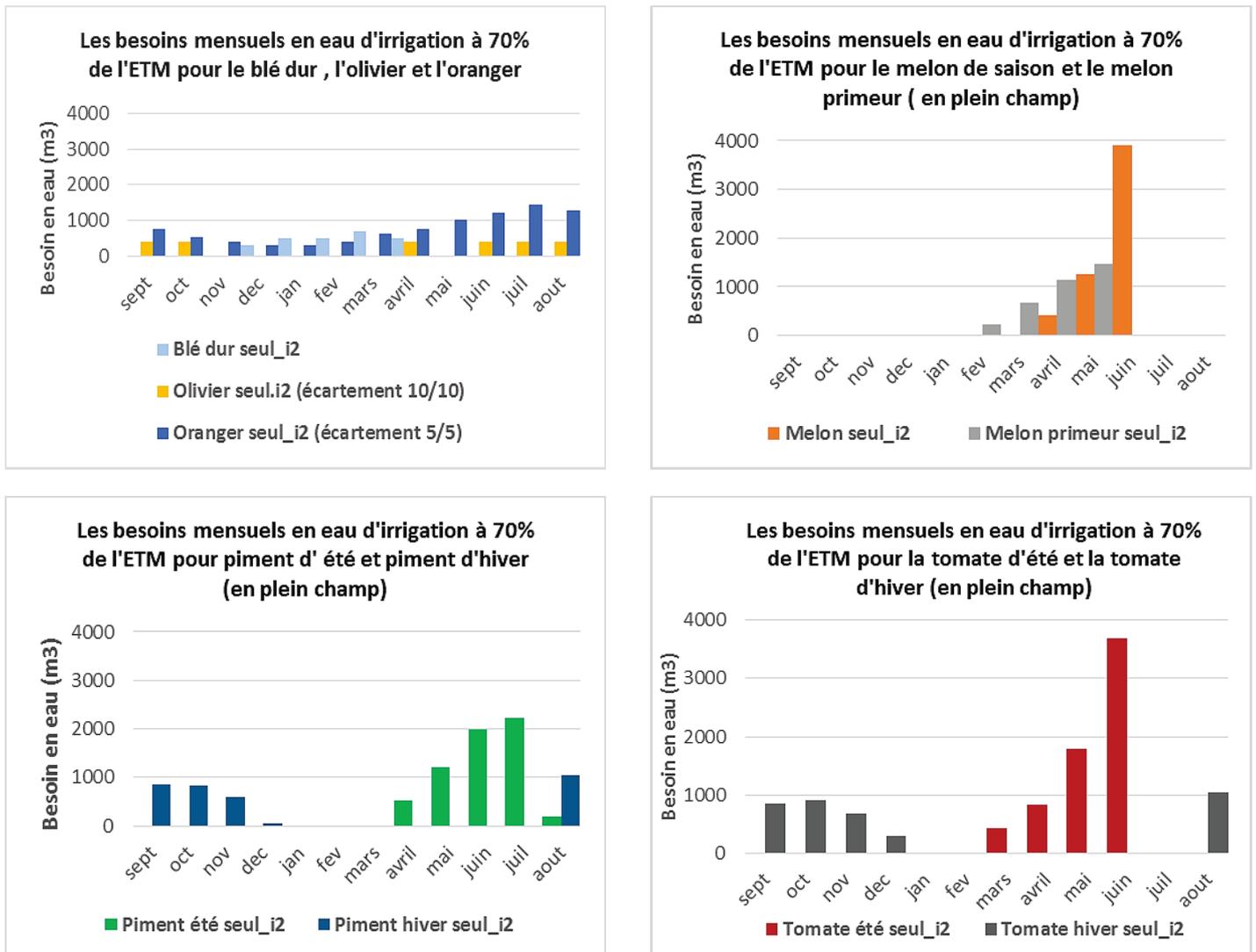
$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad \text{Eq. 10}$$

Avec :

- Y_a : le rendement relatif au niveau d'irrigation appliqué,
- Y_m : le rendement maximal de la culture sans stress hydrique (c'est-à-dire à l'ETM),
- ET_a : évapotranspiration relative,
- ET_m : évapotranspiration maximale,
- K_y : facteur de réduction du rendement.

L'information sur le rendement maximum observé a été collectée auprès des agriculteurs de la zone et du CTV de Chebika.

Figure 5-2 : La variation des besoins mensuels en eau d'irrigation entre quelques cultures pratiquées par les agriculteurs



2.3.3.2 Formalisation des contraintes de disponibilité en eau

Dans notre modèle, les besoins en eau d'irrigation et la disponibilité en eau dans l'exploitation sont définis au pas de temps mensuel et exprimés en volume (m³).

Le besoin en eau d'irrigation par culture :

- diffère selon la stratégie d'irrigation appliquée (à l'ETM, 70% de l'ETM et en sec), le calcul des besoins en eau dans chaque stratégie a été réalisé en utilisant le logiciel CROPWAT8.0 (voir section 2.3.3.1) ;
- diffère entre cultures intercalaires et cultures en plein champ (pour les cultures maraîchères et le blé dur) proportionnellement aux variations de superficie occupée par la culture sur la parcelle ;
- les arbres associés aux céréales ou aux cultures maraîchères ne sont pas irrigués, l'agriculteur apporte seulement les besoins de la culture intercalaire.

La disponibilité de l'eau dans la parcelle dépend de plusieurs facteurs. Elle peut être en relation avec l'état des équipements d'irrigation (puissance de la pompe, énergie utilisée...), la longueur des tours d'eau au sein des GDA, le nombre d'agriculteurs utilisant le réseau, etc.

Dans le cas d'un forage privé :

- La disponibilité mensuelle en eau dépend de son débit : pour une pompe émergée de puissance 7 chevaux et qui fonctionne à l'énergie électrique, le débit moyen a été estimé à 28,6 m³/h (8 l/s) (voir ANNEXE 20).
- Elle dépend aussi du nombre d'heures d'irrigation : on suppose dans notre modèle que l'agriculteur irrigue 12 heures par jour (8 heures le matin et 4 heures le soir). Il ne peut en effet pas irriguer toute la journée par crainte d'endommager ses équipements. L'eau disponible chaque mois (30 jours) est donc de 10 296 m³/s, elle est donnée par l'équation suivante :

$$DispEauFor = DebitFor * HFor \quad \text{Eq. 11}$$

Avec :

- DebitFor : débit du forage privé
- HFor : nombre d'heures de pompage par forage et par mois

Dans le cas d'un GDA :

- La disponibilité en eau dépend de l'efficacité du GDA, qui varie de 0,1 à 1. L'exploitation modélisée appartient à un GDA performant (GDA Ben Salem 2), le coefficient d'efficacité est donc fixé à 0.8.
- Elle est tributaire aussi de la période d'irrigation, la disponibilité de l'eau du GDA variant entre la période d'été et la période d'hiver en fonction du nombre d'agriculteurs qui irriguent. Conformément aux enquêtes dans les GDA et auprès des agriculteurs, nous avons supposé qu'en été les tours d'eau s'allongent, le nombre des irrigants augmentant, diminuant ainsi le nombre d'heures d'irrigation et donc le volume mensuel disponible pour chaque agriculteur.

Nous avons supposé que pour un GDA en bon état, le débit moyen est de 100 m³/h. Une seule ligne d'irrigation peut être desservie en même temps, chaque ligne comporte 4 agriculteurs, le débit moyen par agriculteur est donc de 25 m³/h (voir ANNEXE 20).

Pour la période d'octobre à avril :

Nous avons supposé que le tour d'eau est de 3 jours avec 14 h d'irrigation par jour ce qui correspond à 140 heures d'irrigation par mois ((30/3) *8). La disponibilité mensuelle en eau est donc de 2 800 m³ (25*140*0,8).

Pour la période de mai à septembre :

Le recours à l'eau devient contraint, les tours d'eau s'allongent (l'agriculteur ne peut irriguer que tous les 6 jours). L'agriculteur irrigue 14 h par jour, ce qui correspond à 70 heures

d'irrigation par mois (voir ANNEXE 20). Ainsi la disponibilité mensuelle en eau est égale à 1 400 m³. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$DispEauGDA(m) = DebitGDA * EffGDA * HGDA(m) \quad \text{Eq. 12}$$

Avec :

- DebitGDA : débit de l'eau fournie par le GDA à l'exploitation,
- HGDA(m) : nombre d'heures d'irrigation par mois fournies par le GDA,
- EffGDA : efficacité du GDA.

La demande en eau globale dans l'exploitation dépend du mode d'accès à l'eau présent sur l'exploitation. Dans le cas où l'irrigant bénéficie à la fois de l'irrigation par forage et de l'irrigation par GDA, la demande en eau de l'exploitation s'écrit :

$$EAU(m) = \sum_{c,a,i} X(c, a, i) * DoseEau(c, a, i, m) = ACHAT_EAU_GDA(m) + EAU_FOR(m) \quad \text{Eq. 13}$$

Avec :

- DoseEau(c, a, i, m) : dose d'irrigation en m³ appliquée mensuellement à la culture c selon la pratique d'association a et la stratégie d'irrigation i
- ACHAT_EAU_GDA(m) : quantité d'eau achetée au GDA par mois en m³
- EAU_FOR(m) : eau pompée du forage par mois en m³

La contrainte d'eau dans le cas du forage ou du GDA consiste à ne pas dépasser le volume d'eau fourni mensuellement :

- Contrainte d'eau pour le GDA

$$DispEauGDA_{EQ(m)} : ACHAT_EAU_GDA(m) \leq DispEauGDA(m) \quad \text{Eq. 14}$$

- Contrainte d'eau pour le forage

$$DispEauFor_{EQ(m)} : EAU_FOR(m) \leq DispEauFor \quad \text{Eq. 15}$$

2.4. Fonction objectif et prise en compte du risque

Pour chaque type d'exploitation modélisée l'agriculteur maximise le revenu espéré tiré des activités productives (son utilité espérée) en tenant compte dans sa prise de décision du risque de variation des prix et des rendements des productions.

- On distingue 12 états de nature (s1-s12) pour le risque sur les prix qui représentent la variation des prix des produits agricoles de 2005 à 2016. Les données sur les prix ont été collectées auprès de l'Institut National de la Statistique (INS 2016).
- Quant au risque sur les rendements, nous avons considéré 7 états de nature (e1-e7) qui correspondent respectivement aux rendements des années 2007 à 2013. La variation des rendements est simulée avec le logiciel CROPWAT.8.0 en calculant une baisse de rendement (Eq. 10) qui correspond à chaque année climatique. Le rendement

maximum calculé sur la période correspond au rendement maximum observé dans la zone selon les données collectées auprès du CTV de Chebika.

Face à un univers aléatoire qui peut prendre plusieurs états de nature, l'agriculteur cherche à maximiser son revenu tout en diminuant sa variabilité. Cette dernière peut être estimée de différentes manières (variance, écart-type...). Nous avons appliqué l'approche MOTAD dans la modélisation de la fonction objectif, qui consiste à calculer une approximation linéaire de l'écart-type du revenu à partir de la somme des déviations négatives et positives par rapport au revenu moyen (McCarl et Spreen 1997).

La formulation mathématique de la fonction objectif dans notre modèle s'exprime comme suit :

$$\text{Max} \quad U = \text{REV_MOY} - (\text{APR} * \text{APPROXSTDE}_{\text{REV}}) \quad \text{Eq. 16}$$

Avec :

- U : utilité espérée,
- REV_MOY : Revenu moyen de l'exploitation,
- APR : coefficient d'aversion au risque sur le revenu,
- APPROXSTDE_{REV}: approximation de l'écart-type de la fonction objectif.

Suivant McCarl et Spreen (1997), pour calculer l'approximation linéaire de l'écart-type, nous avons calculé le revenu moyen REV_MOY et le revenu aléatoire REV(e,s) qui dépend de l'état de nature des prix (s) et des rendements (e):

$$\sum_{c,a,i} X(c, a, i) * MB(c, a, i, e, s) - (\sum_m \text{ACHAT}_{\text{EAU}_{\text{GDA}(m)}} * \text{PEAU}) - (\sum_m \text{EAU_FOR}(m) * C_{\text{Pomp}}) - (\sum_m \text{MOoc}(m) * \text{CMO}) = \text{REV}(e, s) \quad \text{Eq. 17}$$

Avec :

- X(c, a, i) : superficie de la culture c, selon le mode d'association a et la stratégie d'irrigation i
- MB(c, a, i, e, s) : marge brute de la culture c selon le mode d'association a, la stratégie d'irrigation i, et les années climatique e et économique s,
- ACHAT_{EAU_{GDA(m)}} : volume d'eau achetée au GDA par mois,
- EAU_FOR(m) : volume d'eau pompée grâce au forage par mois ,
- PEAU : prix de l'eau en DNT par m³ dans le GDA,
- C_Pomp : coût de pompage du forage en DNT par m³ distribué,
- MOoc(m) : embauche de main d'œuvre occasionnelle en jours par mois,
- CMO : coût de main d'œuvre occasionnelle en DNT par jour.

La marge brute des cultures est calculée par l'équation suivante :

$$MB(c, a, i, e, s) = \sum_m Rdt(c, a, i, e) * CalenVente(c, m) * Prix(c, s) - Charges(c, a, i, m) \quad \text{Eq. 18}$$

Avec :

- $Rdt(c, a, i, e)$: rendement de la culture c en kg/ha selon les pratiques d'association a et d'irrigation i et l'année climatique e ,
- $CalenVente^{23}(c, m)$: matrice composée de 0 et de 1 reflétant le calendrier des ventes de la culture c ,
- $Prix(c, s)$: prix unitaire de vente en DNT/kg de la culture c l'année économique s ,
- $Charges(c, a, i, m)$: charges opérationnelles mensuelles de la culture c conduite avec la pratique d'association a et la stratégie d'irrigation i en DNT/ha, hors main d'œuvre et eau.

Les rendements des cultures maraîchères diffèrent selon le niveau d'irrigation et le mode d'installation des cultures (associées ou seules). Pour les cultures intercalaires, nous avons estimé le rendement selon l'écartement entre les arbres et l'espace entre chaque rangée cultivée (voir ANNEXE 19).

- Le rendement de la tomate associée = 60 % du rendement de la tomate en plein champ ;
- Le rendement du piment associé = 60 % du rendement du piment en plein champ ;
- Le rendement du melon associé = 75 % du rendement de melon en plein champ ;
- Le rendement de blé dur associé = 80 % du rendement du blé dur en plein champ ;
- Le rendement des cultures pérennes ne varie pas entre associé ou seul, il diffère seulement si la culture est irriguée ou non.

Pour les charges (hors main d'œuvre et eau) :

- Les charges des cultures pérennes sont les mêmes qu'ils soient seuls ou associés.
- Les charges (hors main d'œuvre et eau) des cultures maraîchères associées ou de plein champ sont calculées proportionnellement à la superficie occupée par la culture sur la parcelle a .
- Les charges de chaque culture diffèrent aussi entre cultures irriguées et cultures en sec. En effet, les applications d'engrais et de pesticides sont plus importantes lorsque l'espérance de rendement est plus élevée (avec irrigation).

Le revenu moyen est donné par cette équation :

$$\sum_{e,s} (PE(e) * PS(s) * REV(e, s)) = REV_MOY \quad \text{Eq. 19}$$

Avec :

- $PE(e) = \frac{1}{CARD(e)}$: probabilité des états de la nature climatiques e ,
- $PS(s) = \frac{1}{CARD(s)}$: probabilité des états de la nature économiques s ,
- $REV(e, s)$: revenu de l'exploitation selon l'année climatique e et économique s .

²³ Cette formulation avait été choisie dans l'éventualité d'introduire des contraintes de trésorerie dans le modèle, ce qui n'a pas été fait au final. Elles pourront par contre être prises en compte dans une version ultérieure.

L'écart entre le revenu de l'état de nature combiné (e,s) et le revenu moyen est calculé comme suit :

$$REV(e, s) - REV_MOY - DEVP_{REV(e,s)} + DEVM_{REV(e,s)} = 0 \quad \text{Eq. 20}$$

Avec :

- $DEVP_{REV(e,s)}$: déviation positive du revenu de l'année (e,s) par rapport au revenu moyen (espéré),
- $DEVM_{REV(e,s)}$: déviation négative du revenu de l'année (e,s) par rapport au revenu moyen (espéré).

La déviation absolue moyenne du revenu MAD_REV est calculée comme suit :

$$\sum_{e,s} PE(e) * PS(s) * (DEVP_{REV(e,s)} + DEVM_{REV(e,s)}) - MAD_REV = 0 \quad \text{Eq. 21}$$

Et enfin l'approximation linéaire de l'écart-type du revenu $STD_{REV_{EQ}}$ est calculée ainsi :

$$TRAN * MAD_REV - APPROXSTDE_{REV} = 0 \quad \text{Eq. 22}$$

$$TRAN = ((3.141593 * NE * NS)/(2 * (NE * NS - 1)))^{0.5} \quad \text{Eq. 23}$$

Avec :

- $NE = CARD(e)$: nombre d'états de la nature climatiques e,
- $NS = CARD(s)$: nombre d'états de la nature économiques s.

3. CALIBRAGE ET VALIDATION DU MODELE

Pour s'assurer que le modèle reproduise bien la réalité et garantir sa capacité explicative, il doit être calibré. Le calibrage consiste à s'assurer de la cohérence interne des modèles : les relations algébriques qui constituent le modèle doivent être en harmonie avec ce qu'on connaît du terrain (Louhichi, Fertil, et Alary 2002). Les différentes équations et coefficients représentés dans le modèle sont en concordance avec ce qui a été observé dans les exploitations enquêtées. La validation du modèle consiste à comparer les résultats émanant du modèle à ceux réellement obtenus (Louhichi, Fertil, et Alary 2002). Pour valider notre modèle, nous avons simulé les différents coefficients d'aversion au risque (de 0,2 à 1,8), en comparant à chaque fois la solution de base résultante (assolement) à la réalité (assolement moyen de l'exploitation observé de l'hiver 2014 à l'été 2016). Nous avons ainsi calculé la somme des valeurs absolues des écarts puis sélectionné le coefficient d'aversion au risque qui correspond au plus faible écart. Nous avons retenu un coefficient de 0,8. L'agriculteur est donc peu averse au risque : il préfère des cultures risquées, susceptibles d'augmenter ses gains.

4. LES SCENARIOS SIMULES

Notre modèle, comme nous l'avons mentionné dans les parties précédentes, est un modèle positif (permettant de décrire une réalité de terrain) mais aussi prospectif (il est possible de simuler des scénarios).

Le choix des scénarios à simuler n'est pas arbitraire. Nous nous sommes basés dans nos simulations sur les instruments de gestion de la ressource envisageables actuellement en Tunisie. Nous n'avons pas voulu tester des scénarios théoriques inadaptés à la réalité du terrain.

C'est pourquoi nous avons choisi de simuler différents scénarios agissant sur le prix de l'eau délivrée par le GDA, et sur le coût du pompage ou, ce qui est lié, sur le prix de l'énergie. La gestion des prélèvements en eau souterraine par le biais de la politique énergétique est en effet envisagée par les gestionnaires de la ressource en eau à l'échelle nationale, les liens entre ces deux politiques étant de plus en plus en effet mis en évidence dans différents cas, comme en Inde (Shah et al. 2008 ; Kumar 2005)

Les scénarios construits ont été adaptés au type d'exploitation modélisé.

Pour l'exploitation qui irrigue seulement à partir du GDA, nous avons simulé la variation du prix de l'eau dans le GDA, en effectuant 200 simulations allant d'un accès gratuit à la ressource (prix nul) à un prix de 3,98 DNT/m³, prix auquel la demande en eau devient nulle. Nous avons testé aussi 5 niveaux d'efficacité du GDA (de 0,2 à 1) (dans le modèle de base).

Pour l'exploitation qui irrigue à partir d'un forage privé : le nombre de simulations effectuées est de l'ordre de 100, les prix de l'eau testés varient de 0 à 4,95 DNT/m³.

Pour l'exploitation qui utilise à la fois l'eau d'un forage et du GDA, nous avons testé des scénarios croisés de prix de l'eau du GDA et du forage, en fixant le prix d'une des sources d'eau et en modifiant l'autre.

- Nous avons testé la situation où le prix de l'eau dans le GDA est faible (0,160 DNT/m³) et un coût de pompage variable ;
- Nous avons simulé aussi un prix de l'eau de GDA élevé (3,98 DNT/m³) et un coût de pompage variable ;
- Nous avons testé le cas d'un coût de pompage faible (0,500 DNT/m³) et un prix de l'eau du GDA variable ;
- Nous avons après simulé un coût de pompage élevé (3 DNT/m³) et un prix de GDA variable ;
- Nous avons aussi testé (dans le modèle de base) l'efficacité de GDA (5 scénarios de 0,2 à 1).

Après la description des différents processus de modélisation mobilisés pour représenter le comportement des irrigants et après l'exposition des scénarios simulés, nous allons dans la partie suivante présenter les principaux résultats dégagés.

5. ANALYSE DES RESULTATS

5.1. Analyse des résultats du modèle dans la situation de référence

Dans la plaine de Kairouan, les GDA et les forages constituent les principales sources d'approvisionnement en eau des agriculteurs. Nous allons dans cette partie analyser le comportement de l'exploitation-type (type 4) dans différentes situations d'accès à l'eau. Le modèle permet de calculer des indicateurs économiques (utilité), sociaux (embauche de main d'œuvre) et environnementaux (consommation en eau) qui résultent des choix d'assolement. Ces éléments sont utiles à la compréhension des différences entre les trois situations d'accès à l'eau et de l'expansion des forages privés dans la plaine de Kairouan, décrit dans les parties précédentes (Chapitre 3 et Chapitre 4). Nous donnons ici quelques-uns des résultats les plus marquants :

Tableau 5-1 : Comparaison des indicateurs économique, environnemental et social pour trois situations d'accès à l'eau pour une exploitation du groupe 4

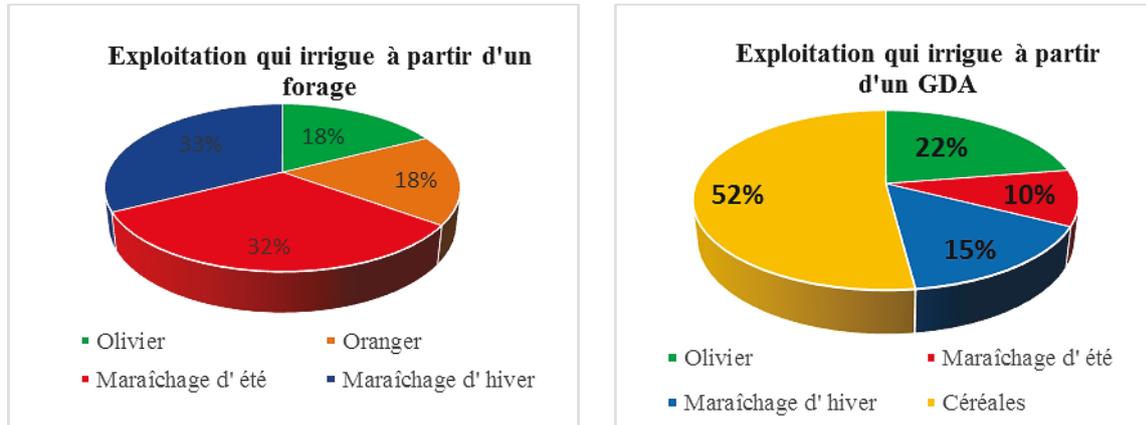
Mode d'accès à l'eau	Economique	Environnementale		Sociale
	Revenu	Consommation totale en eau	Eau du GDA	Main d'œuvre occasionnelle
	<i>DNT</i>	<i>m³</i>	<i>%</i>	<i>jours</i>
GDA et forage privé (E1)	85346	52835	26%	2163
Forage privé (E2)	82800	51699	0%	2157
GDA (E3)	32348	9346	100%	514

Le Tableau 5-1 montre l'écart important entre les revenus des agriculteurs qui irriguent seulement à partir du GDA et ceux qui possèdent un forage : le revenu dans les situations E1 et E2 est multiplié respectivement par 2.5 et 2.6 par rapport au revenu de la situation E3. Ceci illustre bien l'incitation économique à l'installation d'un forage privé. Les revenus enregistrés dans le cas des exploitations qui irriguent à partir d'un forage leur permettent de couvrir le coût de son investissement, qui varie selon les agriculteurs de 30,000 à 60,000 DNT. Le coût du forage est donc amorti en une à deux années. Une légère différence est observée entre la situation avec forage seul et avec forage et GDA, cette dernière apportant un peu plus de souplesse et donc un revenu légèrement meilleur.

La présence d'une source d'eau d'irrigation pérenne et sécurisée sur l'exploitation a une grande influence sur les choix d'assolements : elle procure à l'agriculteur une grande souplesse pour installer des cultures plus rentables et intensifier leur exploitation. Le taux d'intensification atteint 170% pour les exploitations possédant un forage et la superficie en maraîchage d'été est multiplié par 4 par rapport à une exploitation qui se limite à l'eau du GDA. Cette dernière enregistre quant à elle un taux d'intensification de 110% (Tableau 5-2) et le maraîchage d'été ne représente que 10% de la superficie cultivée.

La composition de l'assolement diffère selon les modalités d'accès à l'eau (Figure 5-3). La disponibilité d'une ressource suffisante (garantie par un forage privé) dans les situations (E1 et E2) permet d'installer de l'arboriculture fruitière (oranger) et du maraîchage (65% de la superficie). Ces cultures sont consommatrices en eau mais ont une marge brute élevée.

Figure 5-3 : Comparaison de l'assolement d'une exploitation possédant un forage et d'une autre qui irrigue seulement à partir du GDA



La quantité d'eau fournie par le GDA seul ne permet pas à l'agriculteur d'irriguer la parcelle d'oranger observée dans la situation avec forage. En effet en raison des différentes difficultés rencontrées par les GDA (voir Chapitre 3), la quantité d'eau qu'ils fournissent est insuffisante pour irriguer les arbres fruitiers dans les conditions climatiques de la plaine. On peut d'ailleurs observer que parmi les 12 exploitations de notre échantillon qui irriguent seulement à partir d'un GDA, une seule exploitation a installé des figuiers en intercalaire avec l'olivier, les autres ne possèdent pas d'arbres fruitiers.

Dans les trois situations d'accès à la ressource, l'olivier est cultivé en association avec d'autres cultures (maraîchage ou céréales). Cette pratique est très répandue dans la plaine de Kairouan (Chapitre 4), car elle permet d'assurer une meilleure valorisation des terres. De plus, l'eau d'irrigation non utilisée par les cultures intercalaires permet d'assurer une partie des besoins de l'olivier.

Ces différents systèmes de culture se traduisent par des niveaux de consommation en eau également différents. La demande en eau pour les deux exploitations possédant un forage privé est presque la même, aux alentours de 52 000 m³/an.

En cas d'accès simultané à l'eau du GDA et à l'eau d'un forage, seulement 26 % des besoins sont assurés par le GDA, le forage restant la principale source pour ce type d'irrigant.

L'agriculteur préfère toujours irriguer en priorité à partir de l'eau du GDA : le prix au m³ dans le GDA est inférieur au coût de pompage du forage. Si le GDA ne satisfait pas ses besoins, il a recours à son forage. La contrainte en eau du GDA atteint la limite de disponibilité pour toute l'année (sauf de décembre à février), la valeur marginale de l'eau fournie par le GDA est égale à 0,194 DNT (coût de pompage de l'eau). Pour les mois de décembre à février la contrainte d'eau du GDA est saturée, cette période correspond dans la plaine à des niveaux importants de précipitation.

La contrainte de disponibilité en eau du forage n'est pas saturée toute l'année sauf au mois de juin, où l'agriculteur consomme toute la quantité disponible (10 294 m³). La valeur marginale de l'eau est alors très élevée (1,6 DNT par m³ supplémentaire consommé). En effet, le mois de juin correspond à un pic de besoin en eau pour les différentes cultures installées.

L'exploitation qui irrigue seulement à partir d'un forage connaît les mêmes périodes de pointe sauf qu'en absence d'une autre source d'eau les quantités mensuelles prélevées par forage sont plus intéressantes que la situation de présence de deux source d'irrigation (GDA et forage).

La demande en eau de l'exploitation dans la situation E3 (GDA seulement) est de loin la plus faible. Dans ce cas, la consommation en eau atteint les quantités disponibles, pour les mois de mai, juin et août (période estivale). Cette période correspond à l'irrigation des cultures d'été (melon et tomate d'été). Le reste de l'année, la contrainte en eau n'est pas saturée, les quantités d'eau disponibles étant supérieures aux besoins : en effet cette période de l'année correspond à l'installation de la culture de blé dur d'où des niveaux de consommation en eau faibles.

Tableau 5-2 : Superficies cultivées et stratégies d'irrigation appliquées pour chaque situation d'accès à l'eau

Mode d'accès à l'eau	Superficie cultivée développée (ha)	Stratégie i1 (à l'ETM)	Stratégie i2 (70% de l'ETM)	Stratégie i3 (non irrigué)
GDA et forage privé (E1)	13.71	6.43 (47 %)	5 (36 %)	2.28 (17 %)
Forage privé (E2)	13.71	5.87 (43 %)	5.55 (40 %)	2.28 (17 %)
GDA (E3)	9.37	2 (21 %)	2.27 (24 %)	5.1 (55 %)

En plus de l'écart de taux d'intensification (superficie développée / superficie officielle) et de niveaux de consommation en eau, il y a une grande différence entre les stratégies d'irrigation adoptées dans les trois situations d'accès à l'eau (Tableau 5-2) : les exploitations qui irriguent à la fois à partir d'un GDA et d'un forage ont une disponibilité en eau suffisante qui leur permet d'apporter les besoins des cultures à l'ETM (stratégie i1). Dans le cas où le forage est la seule source d'eau, on observe une légère diminution des superficies irriguées à l'ETM (stratégie i1) au profit de la stratégie i2 (70 % de l'ETM). Dans l'exploitation qui irrigue seulement à partir d'un GDA, plus de la moitié de la superficie est cultivée en blé dur, associé ou seul, et menée en sec (stratégie i3).

L'activité agricole et la réalisation des différentes pratiques culturales nécessitent l'intervention de la main d'œuvre. L'exploitation irriguée seulement à partir d'un GDA utilise principalement la main d'œuvre familiale, les cultures installées n'exigent pas un niveau important de main d'œuvre occasionnelle. Cependant dans les situations avec forage, le besoin en main d'œuvre dépasse la disponibilité en main d'œuvre familiale (40 jours par mois), le recrutement de main d'œuvre occasionnelle est donc nécessaire. La valeur marginale des contraintes de travail est égale au coût de la main d'œuvre occasionnelle (12 DNT).

L'investissement dans un forage privé engendre ainsi une demande importante en eau mais permet d'améliorer les revenus des agriculteurs et d'assurer leur transition économique : des exploitations vivrières qui se limitent à irriguer les oliviers ou à cultiver des céréales peuvent ainsi diversifier leur assolement et s'orienter vers des cultures de rente. Le changement de systèmes de cultures s'accompagne d'une augmentation de la demande en main d'œuvre, constituant une source de revenu pour la population rurale assurant ainsi le développement local de la région et empêchant l'exode rural.

Les gestionnaires des ressources en eau sont donc confrontés aux conséquences contradictoires de l'installation des forages privés en termes de développement économique, d'emploi et de surexploitation des ressources en eau. La mise en place d'instruments de gestion permettant de concilier ces trois objectifs serait souhaitable.

Comme nous l'avons expliqué dans la section 4 de ce chapitre nous avons simulé des scénarios de changement de prix de l'eau, de prix de l'électricité et de l'efficience du GDA. Les principaux résultats sont présentés dans la section suivante.

5.2. Analyse des résultats des simulations

Nous allons simuler des scénarios adaptés à chacune des situations d'accès à l'eau étudiées.

5.2.1 Simulation de la variation du prix de l'eau du GDA pour une exploitation qui irrigue seulement à partir du GDA

Pour cette exploitation, nous avons fait varier le prix de l'eau du GDA dans une fourchette de prix allant de 0 (permettant d'évaluer la consommation en eau maximale dans le cas où la ressource est gratuite) jusqu'au prix à partir duquel la demande devient nulle. Les résultats de cette simulation sont représentés dans la Figure 5-4.

La demande en eau du GDA reste stable ($9\,312\text{ m}^3$) pour un prix allant jusqu'à $2,68\text{ DNT/m}^3$. Cela révèle la grande rigidité de la demande dans le cas où l'eau du GDA est la seule source d'irrigation disponible. L'eau du GDA est bien valorisée par les irrigants. La contrainte en eau est non saturée la plus grande partie de l'année à l'exception des mois de mai, juin et août où la valeur marginale varie entre 2 et 9 DNT par m^3 supplémentaire consommé. Le pic observé aux mois de mai et juin correspond à l'irrigation des cultures d'été (melon et tomate) et olivier alors que celui du mois d'août est dû à l'irrigation de la tomate d'arrière-saison (tomate d'hiver).

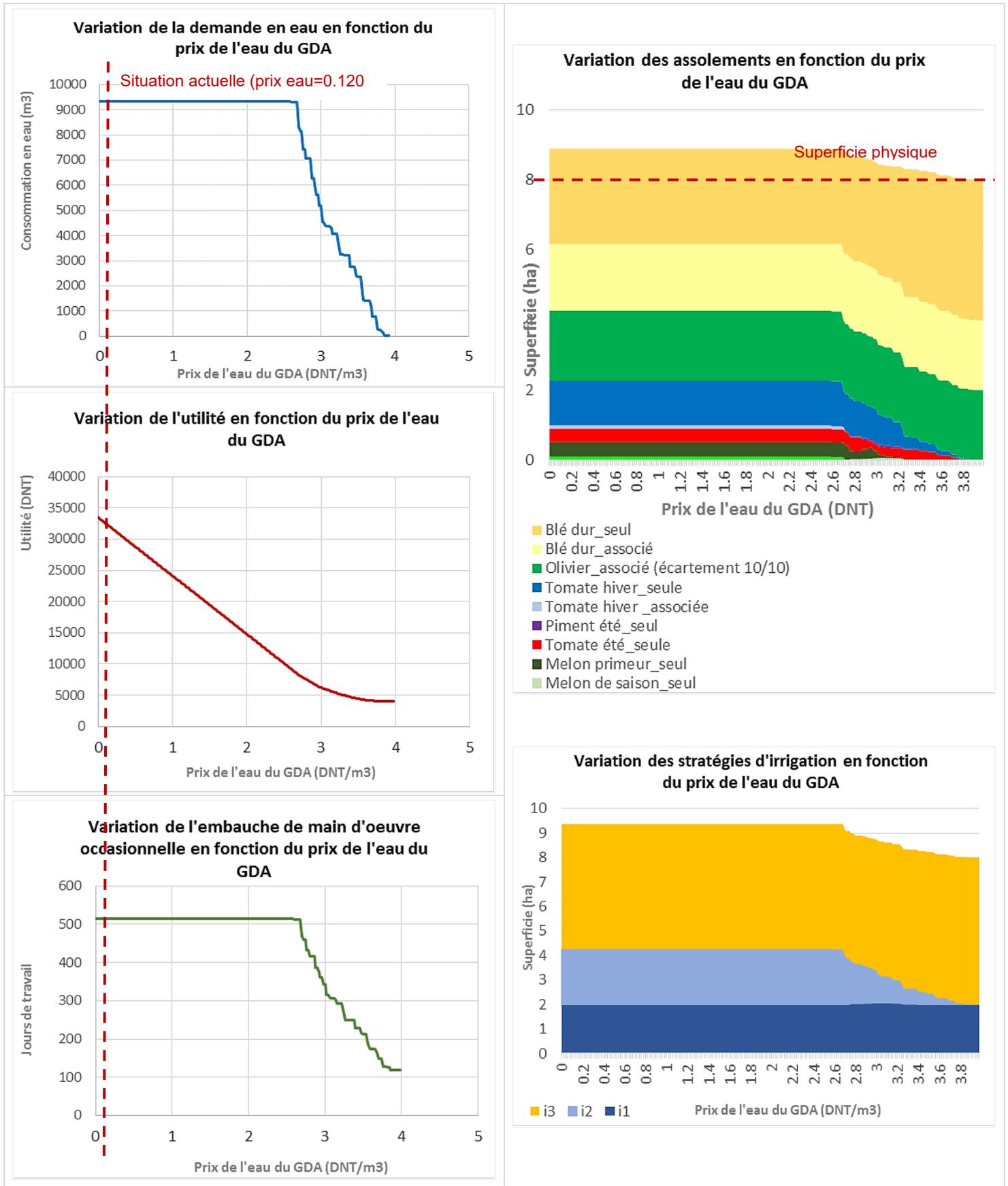
A partir d'un prix égal à $2,7\text{ DNT/m}^3$, la demande en eau commence à diminuer pour s'annuler à $3,94\text{ DNT/m}^3$. Le palier de $2,7\text{ DNT/m}^3$ correspond à un changement dans les assolements : l'agriculteur diminue la superficie cultivée en maraîchage, éliminant d'abord le maraîchage d'été puis le maraîchage d'hiver pour garder enfin le blé dur et l'olivier. La valeur marginale de l'eau dans cette partie de la courbe est décroissante. Le prix de l'eau devient supérieur à sa valeur marginale, d'où le délaissement progressif des cultures les plus consommatrices en eau en commençant par celles qui sont les moins valorisantes. Cela se traduit également par un changement des stratégies d'irrigation avec une augmentation progressive de la stratégie i3 (blé dur et olivier cultivés en sec).

Le changement des systèmes de cultures et avec la diminution de la demande en eau s'accompagnent d'une forte réduction des revenus des agriculteurs. Pour un prix de l'eau de 2,7 DNT/m³, le revenu est divisé par 4 par rapport à la situation actuelle qui correspond à un prix de l'eau de 0,120 DNT/m³ et un revenu de 32 348 DNT.

Le recrutement de main d'œuvre occasionnelle suit l'évolution de la demande eau : la réduction de la superficie cultivée en maraîchage (qui représente les cultures les plus exigeantes en main d'œuvre) conduit à diminuer la main d'œuvre occasionnelle. Le prix de l'eau de 3,94 DNT/m³ correspond au niveau minimum d'embauche de la main d'œuvre dans cette exploitation, soit 118 jours de travail.

La gestion de la demande en eau par la simple variation de prix de l'eau du GDA n'est donc pas réaliste : la demande décroît seulement pour des niveaux de prix très élevés, ayant des répercussions trop importantes sur les revenus des agriculteurs et la demande en main d'œuvre occasionnelle. Dans ces conditions, il est difficile de définir un prix de l'eau du GDA qui permette à la fois la préservation de la ressource et le maintien d'un développement agricole régional.

Figure 5-4 : Simulation 1 : effets d'une variation du prix de l'eau du GDA pour une exploitation qui irrigue uniquement à partir du GDA



5.2.2 Simulation de la variation du coût de pompage pour une exploitation qui irrigue seulement à partir d'un forage

Pour l'exploitation qui possède un forage comme unique source d'irrigation, le coût d'irrigation correspond aux frais d'électricité. Nous avons donc choisi de simuler une variation du coût de pompage d'un m³ d'eau de 0 (valeur qui correspond à une extraction gratuite de l'eau souterraine) à 3,95 DNT (le coût de pompage qui annule la demande en eau). La courbe de demande en eau de forage est moins rigide que celle du GDA (Figure 5-5). Elle présente 3 paliers :

1. De 0 à 1 DNT/m³, la demande connaît une chute importante de l'ordre de 55 %. Cette décroissance est expliquée dans un premier temps par la disparition rapide de l'oranger entre 0,15 et 0,3 DNT/m³²⁴ et le passage de la stratégie d'irrigation 1 à la stratégie 2 pour une partie des cultures maraîchères. Les volumes d'eau libérés par l'oranger permettent de substituer une partie du melon primeur associé par de la tomate d'été associée, plus consommatrice en eau (5 773 m³ en i1, et 4 042 m³ en i2, contre 3 748 m³ en i1 et 2 623 m³ en i2 pour le melon) mais aussi à la marge brute plus élevée (20 233 DNT hors eau et main d'œuvre contre 13 958 DNT pour le melon) et moins variable (taux de variation moyen de 29 % contre 66 % pour le melon primeur associé).

En effet la contrainte d'eau est insaturée sur toute l'année (valeurs marginales nulles) sauf pour le mois de juin au cours duquel la consommation en eau atteint le volume disponible, la valeur marginale de l'eau est alors de 1,9 DNT/m³, ce qui reste supérieur au coût de pompage. Cette période correspond à un pic de besoins en eau pour l'olivier et les cultures maraîchères d'été.

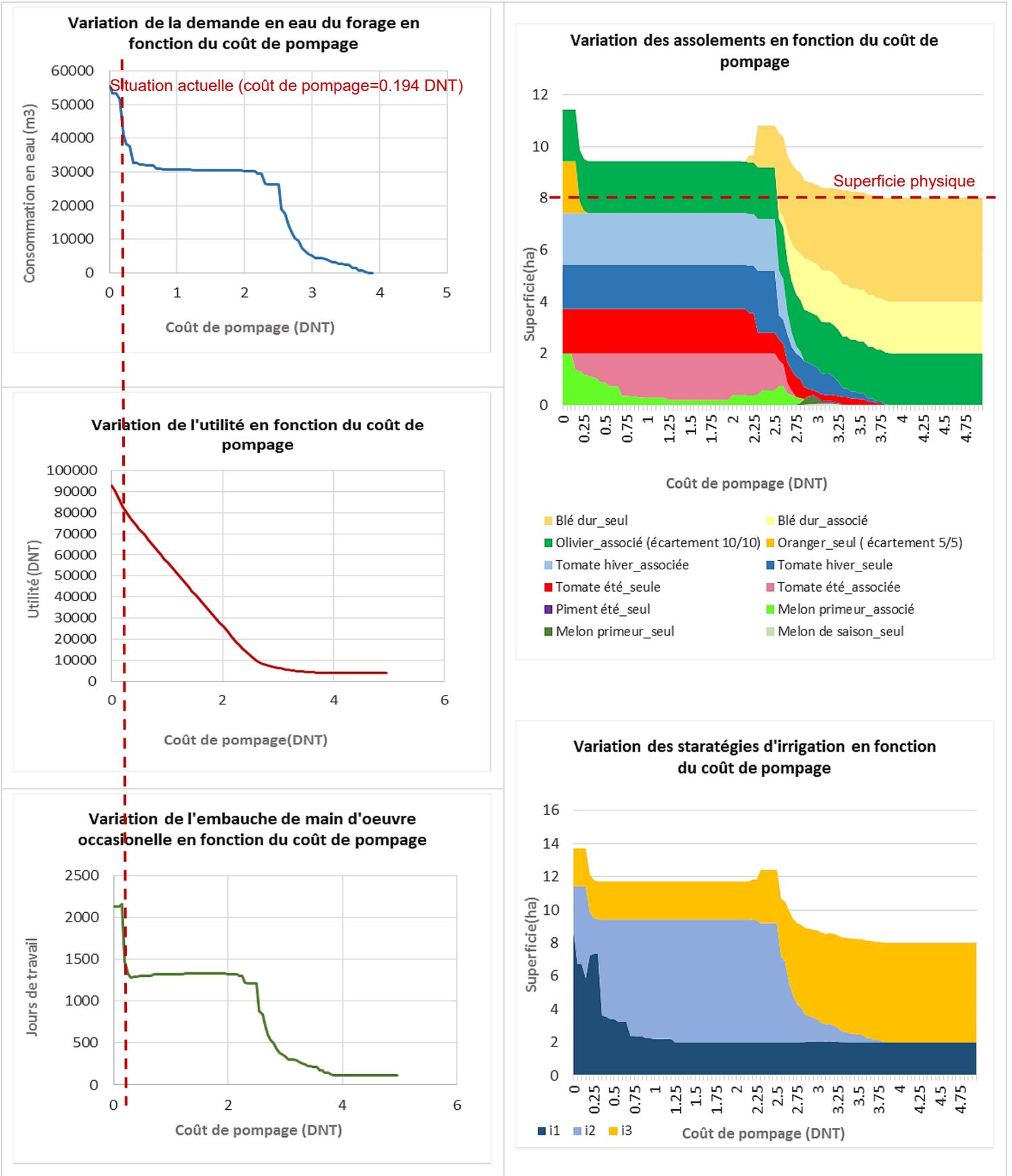
2. Pour un coût de pompage de 1 à 2,15 DNT/m³, les prélèvements et l'assolement sont à peu près stables.
3. Le troisième palier de décroissance de la demande en eau correspond à des coûts de pompage compris entre 2,15 et 3,95 DNT/m³. Cette diminution résulte au début d'une augmentation de la superficie en melon primeur associé au dépend de la tomate d'été associée, jusqu'à un prix de l'eau de 2,65 DNT/m³, et d'une augmentation de la tomate d'hiver seule aux dépends de la tomate d'été seule. A partir de 2,65 DNT/m³, les cultures maraîchères sont progressivement délaissées en commençant par le maraîchage d'été puis le maraîchage d'hiver pour finir avec un assolement olivier et blé dur. Cette évolution d'assolement s'accompagne d'une diminution globale de la superficie cultivée à partir de 2,55 DNT/m³ (diminution du taux d'intensification) et un basculement de la stratégie i2 vers la stratégie i3.

L'impact de la variation du coût de pompage sur le revenu de l'agriculteur et sur le recrutement de main d'œuvre occasionnelle est sensible mais reste acceptable pour le premier palier d'évolution (de 0 à 1 DNT), alors que les prélèvements en eau baissent de façon importante. Ce

²⁴ Dans les différentes simulations réalisées et pour des prix de l'eau ou coût de pompage élevés, si on fixe dans le modèle la superficie de l'oranger, le modèle choisit d'irriguer l'oranger puisqu'il ne peut pas être mené en sec. Mais il affiche des utilités négatives. C'est la raison pour laquelle nous avons donné au modèle la liberté de cultiver ou non de l'oranger (en remplaçant l'égalité dans l'Eq. 5 par une inégalité) dans ces simulations.

résultat est intéressant du point de vue de la gestion de la ressource car une faible augmentation du prix de l'électricité par rapport à la situation actuelle (0,194 DNT) pourrait permettre de réduire sensiblement la consommation d'eau sans trop affecter les revenus des agriculteurs ou le recrutement de main d'œuvre.

Figure 5-5 : Simulation 2 : effets d'une variation du coût de pompage pour une exploitation qui irrigue seulement à partir d'un forage



5.2.3 Simulation de la variation du coût de pompage et du prix de l'eau du GDA pour une exploitation qui irrigue à la fois à partir d'un forage et d'un GDA

Pour cette simulation, nous avons fait varier simultanément le prix de l'eau du GDA de 0 à 5,98 DNT/m³ et le coût de pompage de l'eau du forage de 0 à 9,95 DNT/m³. Cependant, pour faciliter la lecture des résultats, nous ne présentons ici que l'impact d'une variation du coût de pompage pour deux situations de prix de l'eau du GDA (prix bas : 0,160 DNT/m³ et prix élevé : 3 DNT/m³) puis l'impact d'une variation du prix de l'eau du GDA dans deux situations de coût de pompage (prix bas : 0,500 DNT/m³ et prix élevé : 3 DNT/m³). Dans cette partie, nous concentrons notre analyse sur les phénomènes de substitution entre l'eau fournie par le GDA et l'eau prélevée par le forage, ainsi que sur les changements d'assolement et de stratégies d'irrigation associés.

5.2.3.1 Effet de la variation du coût de pompage dans le cas d'un prix faible (0,160 DNT) de l'eau du GDA

Les résultats de cette simulation sont résumés dans la Figure 5-6.

Pour un coût de pompage inférieur au prix de l'eau du GDA, l'agriculteur irrigue principalement à partir du forage. Lorsque le coût de pompage augmente au-delà du prix de l'eau du GDA, l'agriculteur substitue l'eau du forage par l'eau du GDA. Pour un coût de pompage de 1,6 DNT/m³, la consommation en eau du GDA excède celle venant du forage. La demande en eau du forage continue à diminuer jusqu'à s'annuler pour un coût de pompage de 9,35 DNT/m³. L'agriculteur continue cependant de s'approvisionner à partir du GDA : la demande globale en eau coïncide alors avec la demande en eau du GDA.

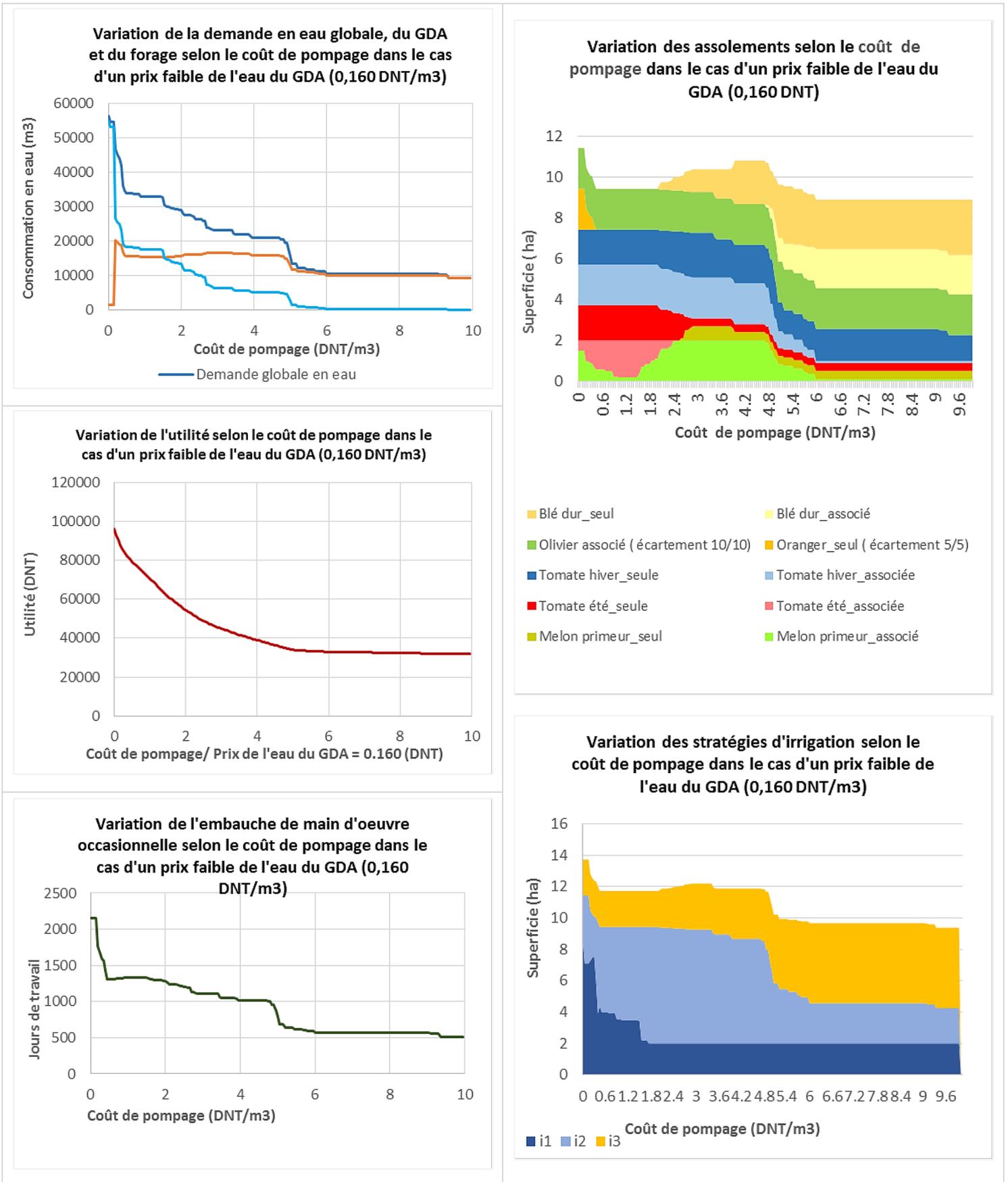
L'évolution des assolements est comparable à celle observée dans la simulation 2 (cas d'une exploitation qui irrigue seulement à partir d'un forage). Lorsque le coût de pompage augmente, l'agriculteur commence à substituer le melon primeur associé par la tomate d'été associée, le différentiel de marge brute entre la tomate et le melon permettant de supporter les charges d'eau supplémentaires de tomate jusqu'à un coût de 1,5 DNT/m³. Par la suite, lorsque le coût de pompage devient supérieur à la valorisation de l'eau permise par la tomate d'été associée, la substitution est en sens inverse et s'accompagne de l'apparition du melon primeur seul (marge brute moyenne=18 608 DNT/ha, besoin en eau moyen=4 247m³/ha) au dépend de la tomate d'été seule (marge brute moyenne=33 720 DNT/ha, besoin en eau moyen=8 184m³/ha), plus exigeante en eau. Entre 2 et 4,85 DNT/m³, on observe une lente diminution de la stratégie i2 au profit de la stratégie i3, puis une chute brutale de la superficie irriguée selon la stratégie i2 à 4,85 DNT/m³.

Pour des coûts de pompage très élevés et une irrigation presque totalement alimentée par le GDA, l'assolement se stabilise avec une dominance de l'olivier et de la céréaliculture. Les stratégies d'irrigation i1 et i2 se stabilisent autour de 2 ha et 2,27 ha respectivement et la stratégie i3 (sans irrigation) devient majoritaire.

La présence d'une deuxième source d'irrigation (GDA) augmente légèrement les superficies cultivées, les revenus et l'embauche de la main d'œuvre occasionnelle par rapport à la situation

avec forage seul, mais les tendances d'évolution restent les mêmes. L'intervalle de coût de pompage de 0 à 1 DNT/m³ reste intéressant du point de vue du gestionnaire de la ressource, car il correspond à une baisse importante de la demande en eau tout en gardant des marges de manœuvre économiques et sociales.

Figure 5-6 : Simulation 3 : effets d'une variation du coût de pompage dans le cas d'un prix faible de l'eau du GDA (0,160 DNT/m³)



5.2.3.2 Effet de la variation du coût de pompage avec un prix de l'eau du GDA élevé (3 DNT/m³)

Lorsque le prix de l'eau du GDA est élevé, la substitution de l'eau de forage par de l'eau du GDA intervient plus tardivement : uniquement lorsque le coût de pompage dépasse le prix de l'eau du GDA, soit ici 3 DNT.

De 0 à 3 DNT/m³, l'assolement varie de la même façon que pour l'exploitation qui irrigue seulement à partir d'un forage et se caractérise par une dominance de la stratégie i2. Le ressaut observé de la stratégie i1 pour un coût de pompage entre 0 et 0,250 DNT/m³ correspond à la présence de l'oranger et du melon primeur associé. Leur disparition de l'assolement diminue les superficies irriguées en i1.

Au-delà de 3 DNT/m³, l'assolement est proche de celui d'une exploitation qui irrigue seulement à partir du GDA. Il se caractérise par la disparition de la stratégie i2 au profit de la stratégie i3.

5.2.3.3 Effet de la variation du prix de l'eau du GDA avec un coût de pompage faible (0,500 DNT/m³)

Pour un prix de l'eau du GDA inférieur au coût de pompage de 0,500 DNT/m³, l'agriculteur utilise les deux sources d'eau. Lorsque le prix de l'eau du GDA dépasse le coût de pompage fixé, la demande en eau du GDA diminue jusqu'à s'annuler pour un prix de 1,82 DNT/m³, l'agriculteur se limite alors à utiliser l'eau de son forage.

La variation du prix de l'eau du GDA en présence d'une autre source d'irrigation accessible à un prix faible est sans effet sur l'assolement et les stratégies d'irrigation, en dehors d'une légère diminution de la stratégie i1 au profit de la stratégie i2 due au remplacement de la tomate d'été associée par le melon primeur associé, au moment de l'arrêt de l'irrigation à partir du GDA.

5.2.3.4 Effet de la variation du prix de l'eau du GDA avec un coût de pompage élevé (3 DNT/m³)

En comparaison de la situation précédente où le coût de pompage était faible, la variation du prix de l'eau du GDA lorsque le coût de pompage est élevé entraîne plusieurs changements.

Lorsque le prix de l'eau du GDA est inférieur au coût de pompage, l'agriculteur irrigue en priorité avec l'eau du GDA et ne recourt à l'eau du forage que lorsque la contrainte en eau du GDA est saturée. La demande en eau du GDA décroît ensuite en fonction du prix de l'eau, l'agriculteur diminuant progressivement les superficies en maraîchage irrigué, notamment celle en melon primeur associé et, à partir de 1,45 DNT/m³, réduit les superficies irriguées selon la stratégie i2 au profit des superficies en sec.

La demande en eau du forage privé diminue également parallèlement à celle du GDA, jusqu'à s'annuler pour un prix de l'eau du GDA de 2,68 DNT/m³. En effet la hausse du prix de l'eau du GDA combinée à un coût de pompage élevé amène l'agriculteur à réduire les superficies cultivées en maraîchage, ce qui diminue la demande globale en eau, l'eau du forage n'intervenant que comme appoint lors des pics de besoins en eau. A partir d'un prix de l'eau de GDA supérieur au coût de pompage, l'agriculteur abandonne l'eau du GDA pour n'irriguer

qu'à partir du forage en gardant comme spéculation l'olivier, la céréaliculture et la tomate d'hiver seule avec une faible proportion de maraîchage d'été.

Figure 5-7 : Simulation 4 : effets d'une variation du coût de pompage dans le cas d'un prix élevé de l'eau du GDA (3 DNT/m³)

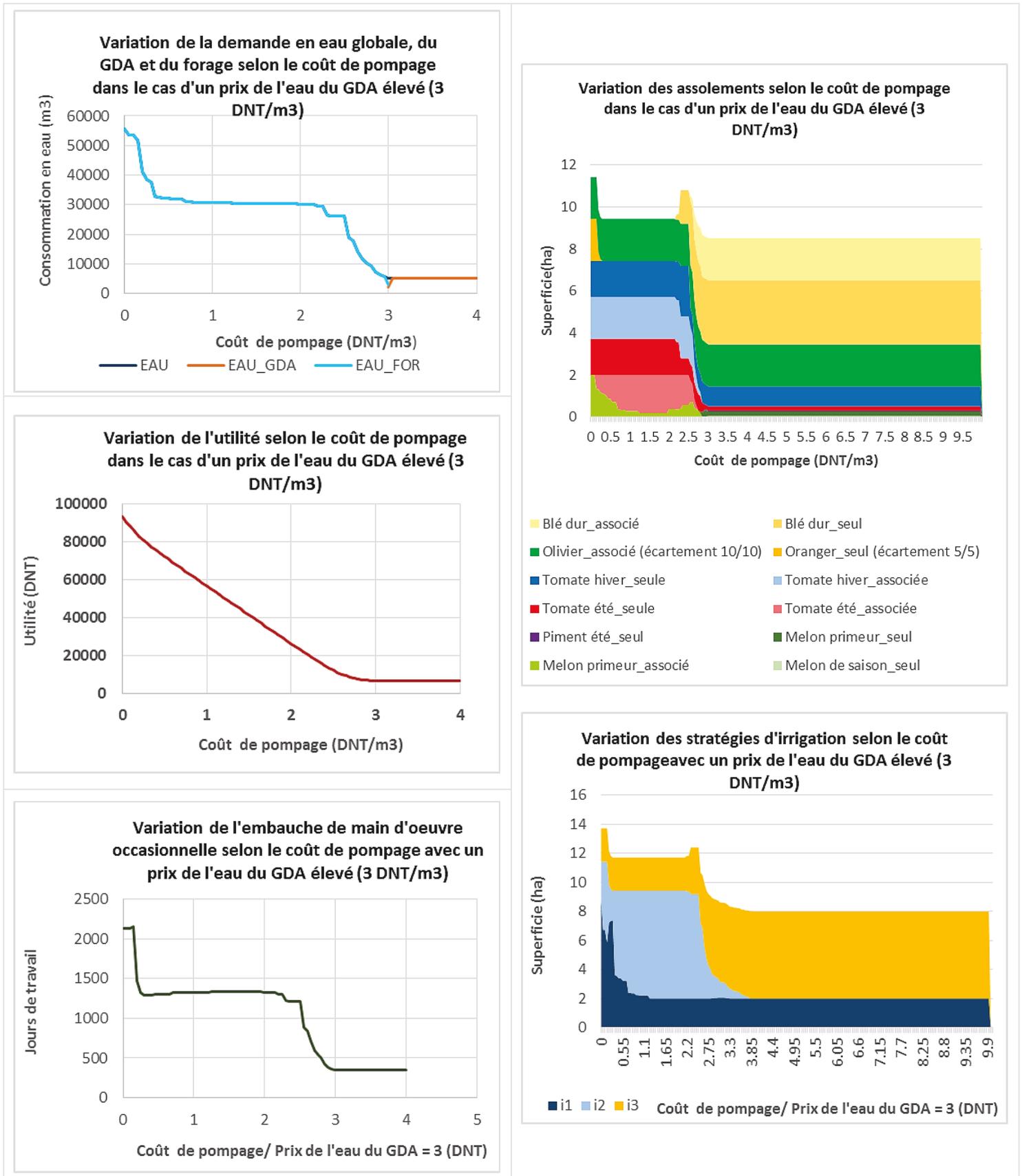


Figure 5-8 : Simulation 5 : effets d'une variation du prix de l'eau du GDA dans le cas d'un coût de pompage faible (0,500 DNT/m³)

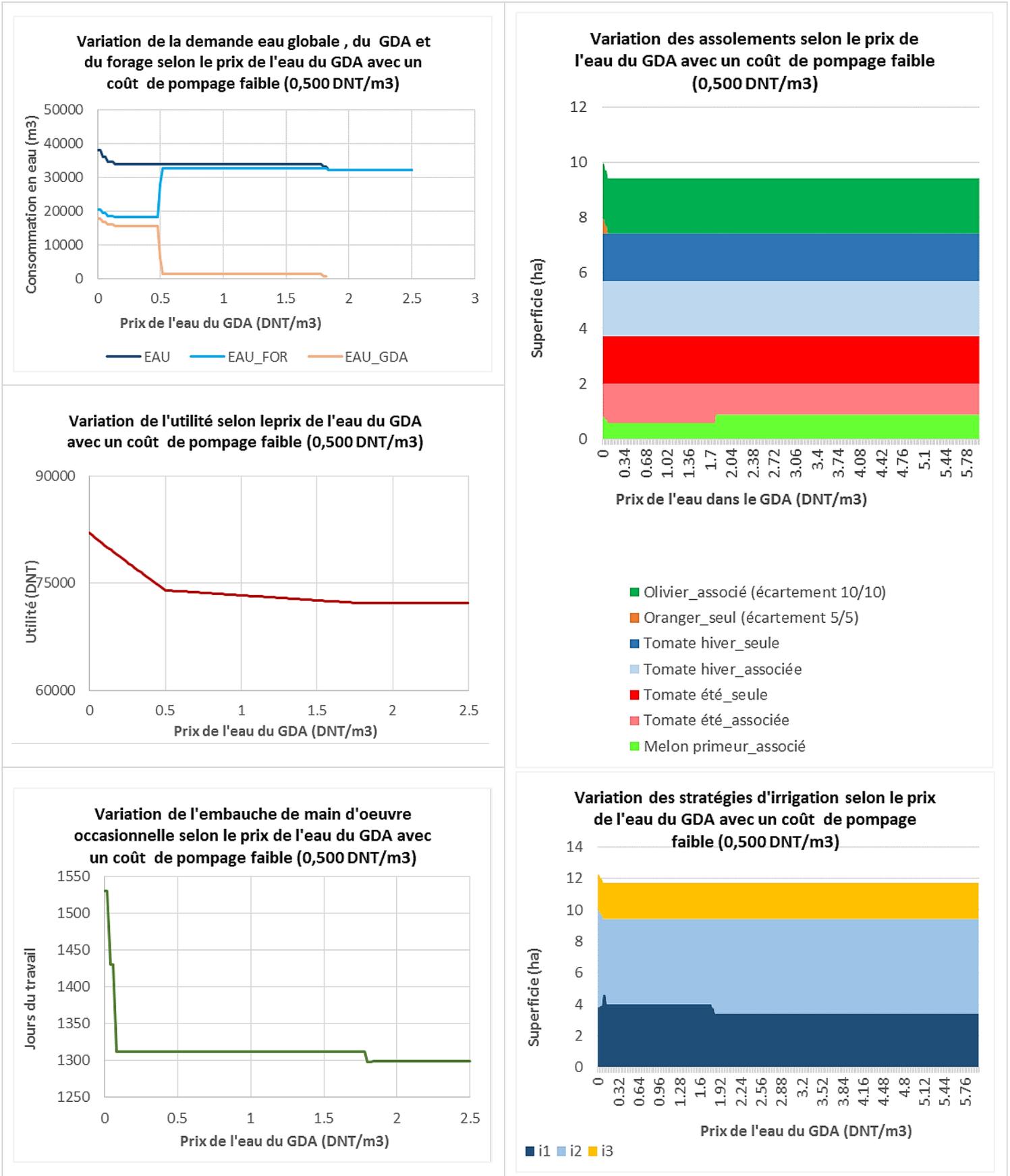
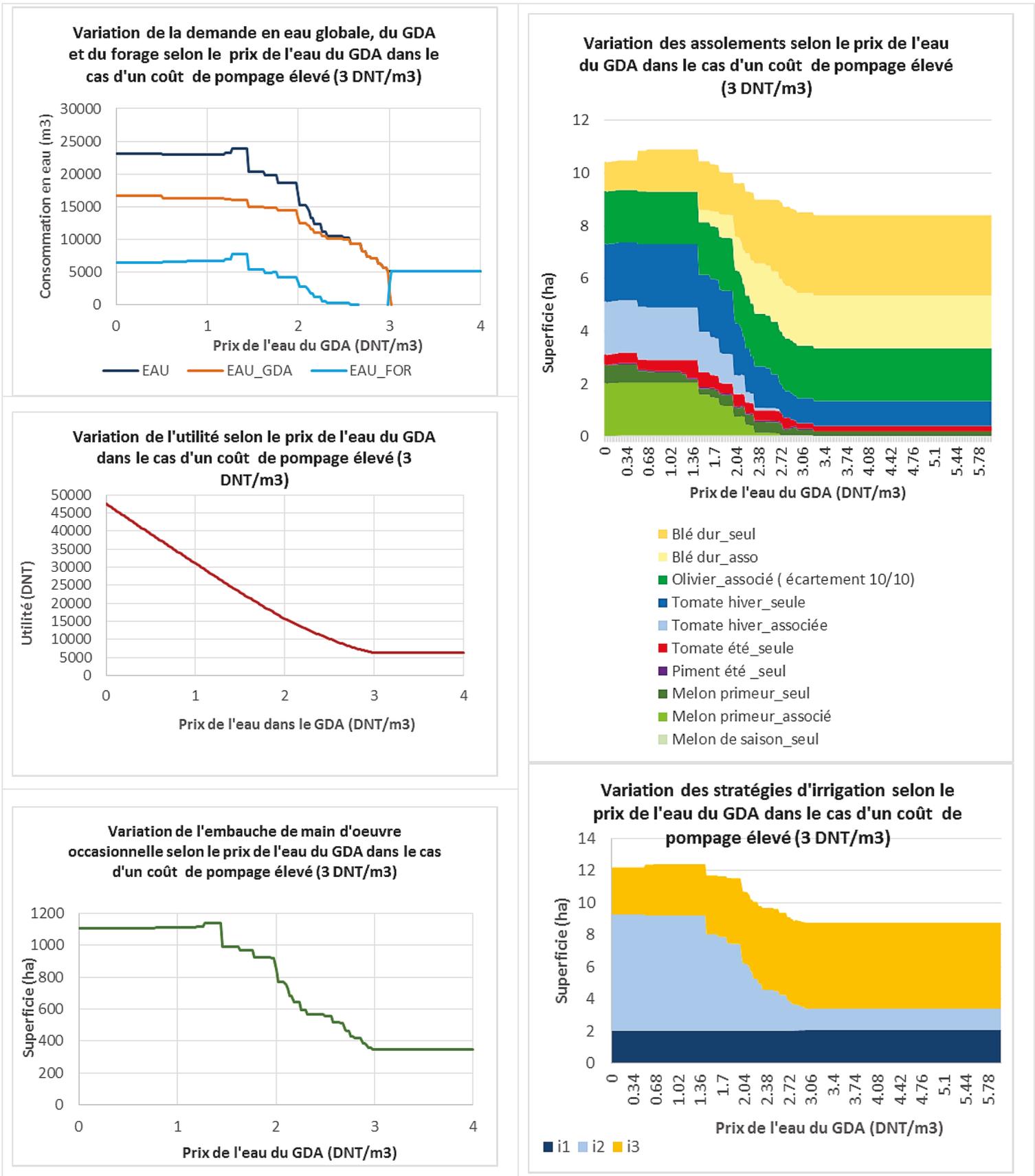


Figure 5-9 : Simulation 6 : effets d'une variation du prix de l'eau du GDA dans le cas d'un coût de pompage élevé (3 DNT/m³)



5.2.4 Simulation de la variation de l'efficacité du GDA

L'efficacité du GDA est un coefficient qui traduit l'état de fonctionnement (équipements, état du réseau...) et le service de distribution du GDA (tours d'eau, débit...). Il varie dans nos simulations de 0,1 à 0,8, permettant ainsi de moduler le niveau de disponibilité en eau du GDA en fonction de son état de fonctionnement. Deux types d'exploitations sont concernées : celles qui irriguent seulement à partir du GDA et celles ayant un accès à deux sources d'irrigation (GDA et forage).

5.2.4.1 Simulation de la variation de l'efficacité du GDA pour une exploitation qui irrigue seulement à partir d'un GDA

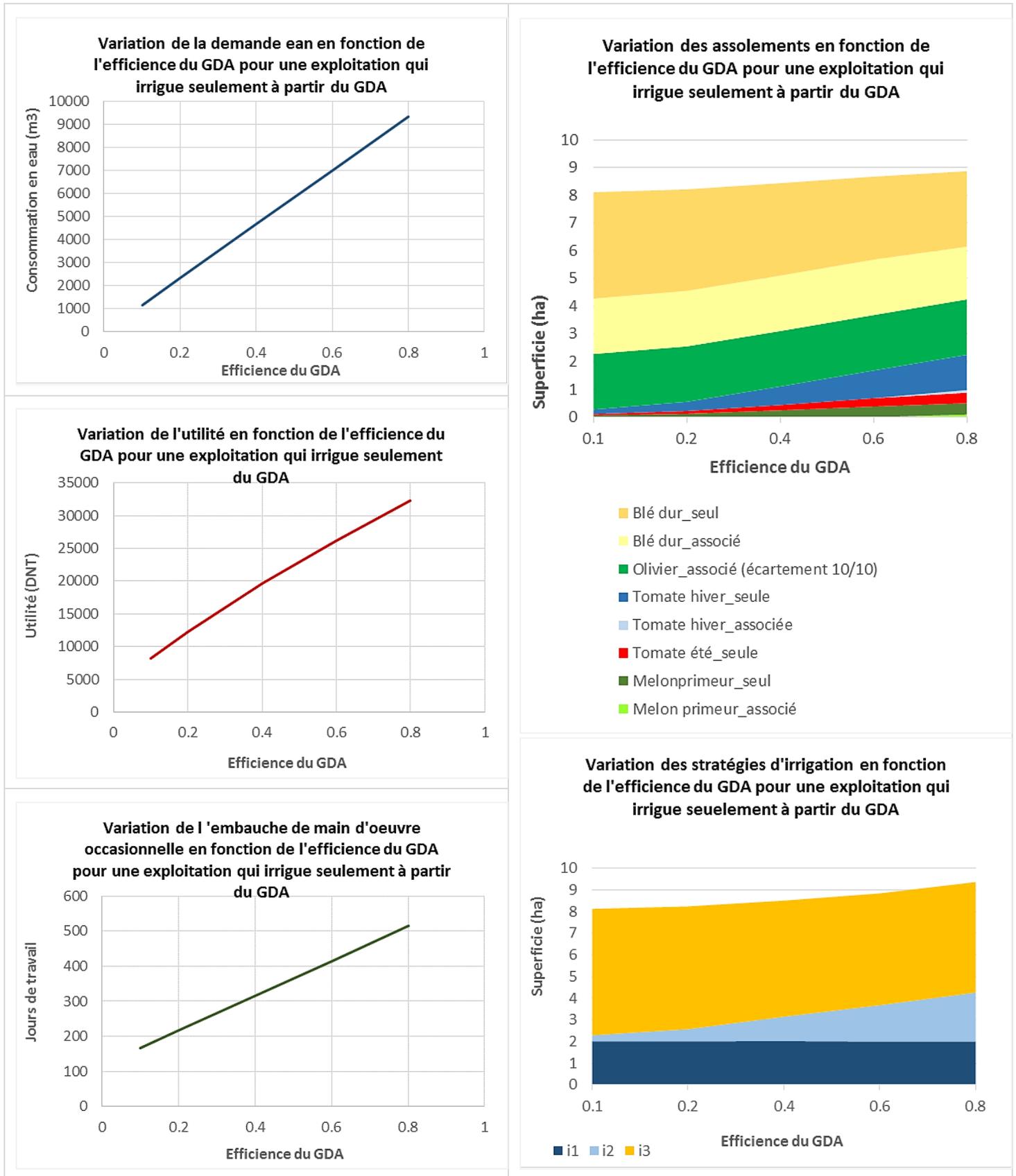
La demande en eau du GDA, l'utilité et l'embauche de la main d'œuvre occasionnelle sont des fonctions linéaires décroissantes de l'efficacité du GDA, si l'on se réfère à la Figure 5-10.

En effet lorsque les performances du GDA sont bonnes, le volume distribué est confortable et l'agriculteur cultive du maraîchage d'été (tomate seule, melon primeur seul) et d'hiver (tomate seule) en plus de l'olivier et du blé dur.

Lorsque l'efficacité du GDA diminue, l'agriculteur ajuste sa consommation en eau aux disponibilités en appliquant la stratégie i2 puis il réduit progressivement les cultures maraîchères et bascule vers les cultures en sec. Cela se traduit par une baisse de revenu et de recrutement de main d'œuvre.

Ces constatations confirment l'impact de la performance des GDA sur le fonctionnement des exploitations agricoles (Chapitre 3) et rend l'investissement dans des forages privés légitime aux yeux des agriculteurs. L'investissement dans la réhabilitation des périmètres publics irrigués pourrait ainsi freiner en partie cette dynamique observée dans la plaine de Kairouan.

Figure 5-10 : Simulation 7 : effets d'une variation de l'efficience du GDA pour une exploitation qui irrigue seulement à partir du GDA

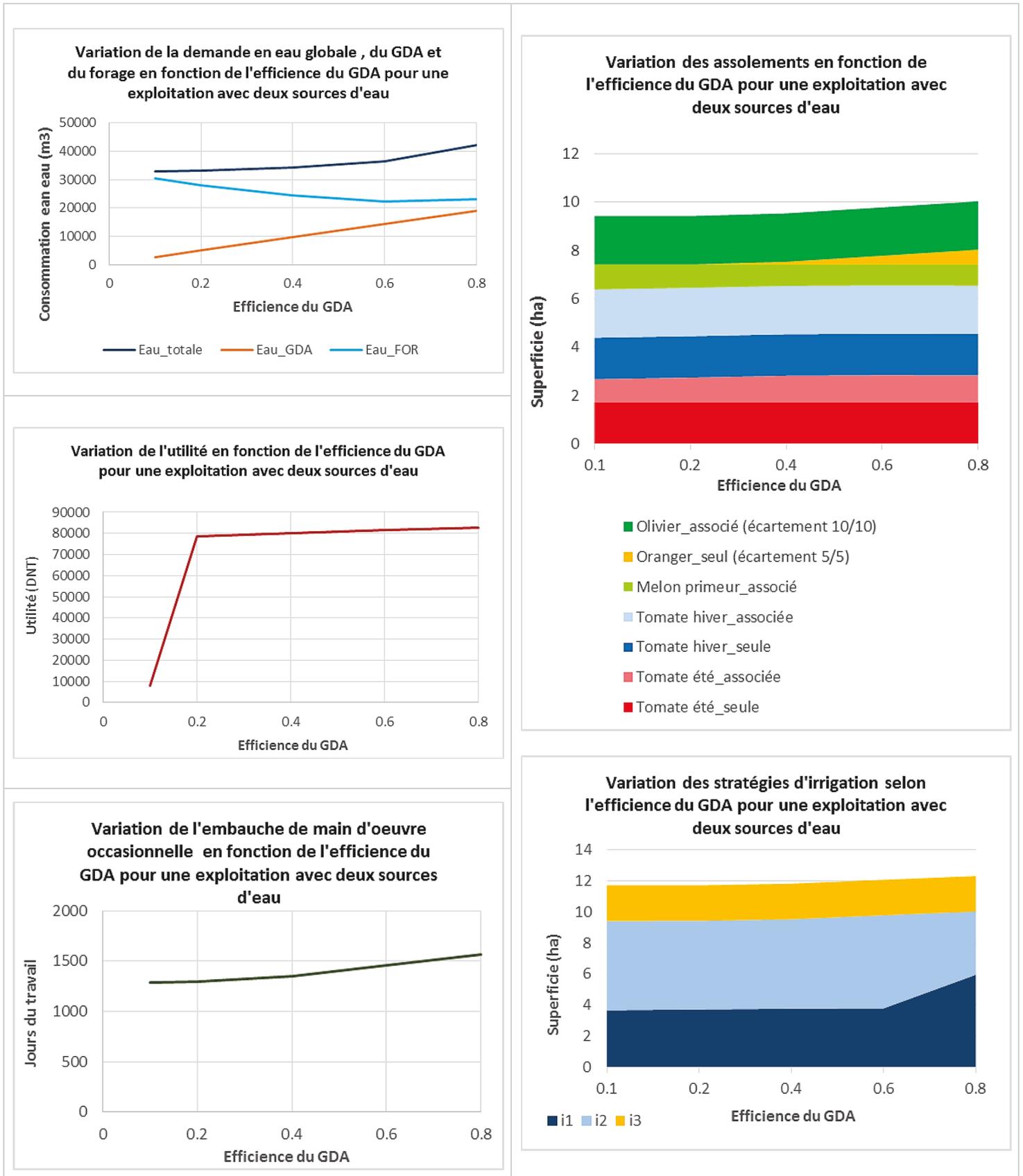


5.2.4.2 Simulation de la variation de l'efficacité du GDA pour une exploitation qui irrigue à partir d'un GDA et d'un forage

Le niveau d'efficacité du GDA a un impact très faible sur la demande en eau globale lorsque l'exploitation dispose des deux sources d'eau (Figure 5-11). La consommation en eau du GDA augmente linéairement avec la hausse du niveau d'efficacité, se substituant progressivement à l'eau de forage. L'assolement reste identique pour les différents niveaux d'efficacité en dehors de la disparition de l'oranger pour un coefficient inférieur à 0,4. Le forage constitue en effet une ressource sécurisée pour l'exploitation, permettant de combler le manque d'eau de GDA.

Lorsque l'efficacité passe de 0,1 à 0,2 le revenu connaît une augmentation importante puis il se stabilise aux alentours de 80 000 DNT.

Figure 5-11 : Simulation 8 : effets d'une variation de l'efficacité du GDA pour une exploitation qui irrigue à partir du GDA et du forage



6. CONCLUSION

Le présent chapitre a cherché à modéliser le comportement de consommation en eau des agriculteurs ayant différents modes d'accès à l'eau. Son objectif était, pour les trois situations type d'accès à l'eau observées sur le terrain, de représenter les impacts de différentes politiques de gestion, en termes d'assolement, de consommation en eau, de revenu pour l'agriculteur et d'emploi de main d'œuvre occasionnelle.

Dans un premier temps, l'analyse nous a confirmé les constatations de terrain décrites dans le Chapitre 4 : un forage privé apporte beaucoup de souplesse aux décisions des agriculteurs de choix de cultures. Il permet de plus aux exploitations d'opérer une transition économique vers des cultures de rente (maraîchage, arboriculture) qui sont en contrepartie plus consommatrices d'eau.

La comparaison révèle aussi que l'exploitation qui a seulement accès à l'eau distribuée par le GDA a un assolement basé essentiellement sur les oliviers et les céréales avec une faible proportion de maraîchage (généralement maraîchage d'hiver moins consommateur d'eau). Le revenu dégagé par cette exploitation est beaucoup plus faible que celui des exploitations possédant un forage. La quantité d'eau délivrée par le GDA ne lui permet pas d'irriguer des arbres fruitiers. L'arboriculture fruitière est ainsi toujours accompagnée de l'installation d'un forage privé.

Dans un deuxième temps, des scénarios de changement de prix de l'eau du GDA, de niveau de coût de pompage du forage et de niveau d'efficacité du GDA ont été simulés pour estimer l'évolution de la demande eau sous l'effet de différentes mesures de gestion.

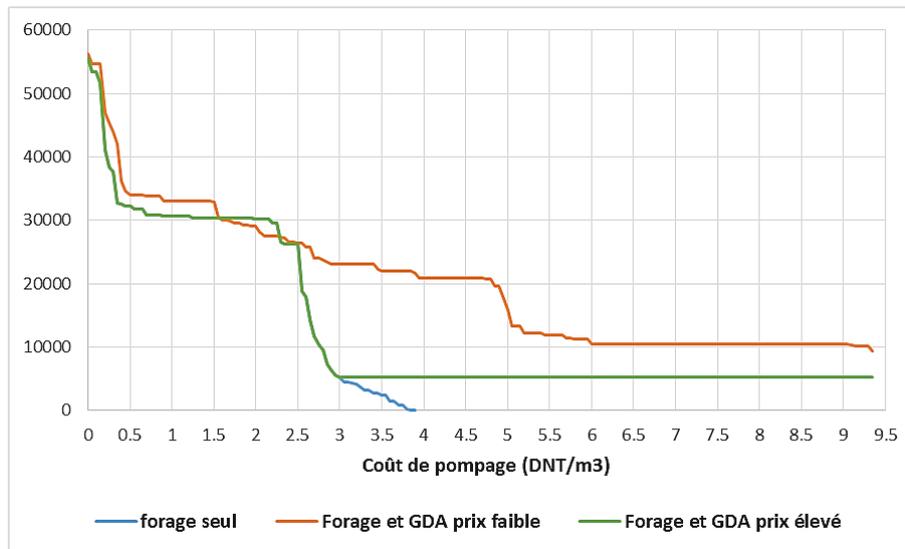
Les résultats montrent que :

- Pour une exploitation qui irrigue seulement à partir du GDA, la demande eau est rigide, l'agriculteur valorise l'eau jusqu'à un prix de 2,7 DNT/m³. A ce niveau la demande baisse et le revenu de l'agriculteur est divisé par 4 par rapport à la situation actuelle. Ainsi la gestion de la demande en eau du GDA via le prix de l'eau ne permet pas de concilier les objectifs de développement économique et de préservation de la ressource.
- Pour une exploitation qui irrigue seulement à partir d'un forage, la demande est moins rigide et évolue selon 3 grandes phases :
 1. Coût de pompage passe de 0 à 1 DNT/m³, la demande en eau est réduite de moitié alors que le revenu demeure à un niveau acceptable. En effet, selon le modèle, l'agriculteur a intérêt à appliquer une stratégie d'irrigation déficitaire qui permet de ne pas trop affecter les rendements. Ceci donne une grande souplesse dans le choix des cultures à installer. La diminution légère des doses d'eau est une mesure adaptative qui peut avoir des bons résultats en termes de réduction de la consommation en eau tout en satisfaisant les objectifs de développement économique et social (effet sur les revenus et l'embauche de main d'œuvre). Cette mesure mérite d'être étudiée d'un point de vue

agronomique et économique. La gestion de la demande en eau via une politique énergétique paraît donc intéressante et réalisable notamment pour des niveaux de prix légèrement plus élevés que ceux observés actuellement.

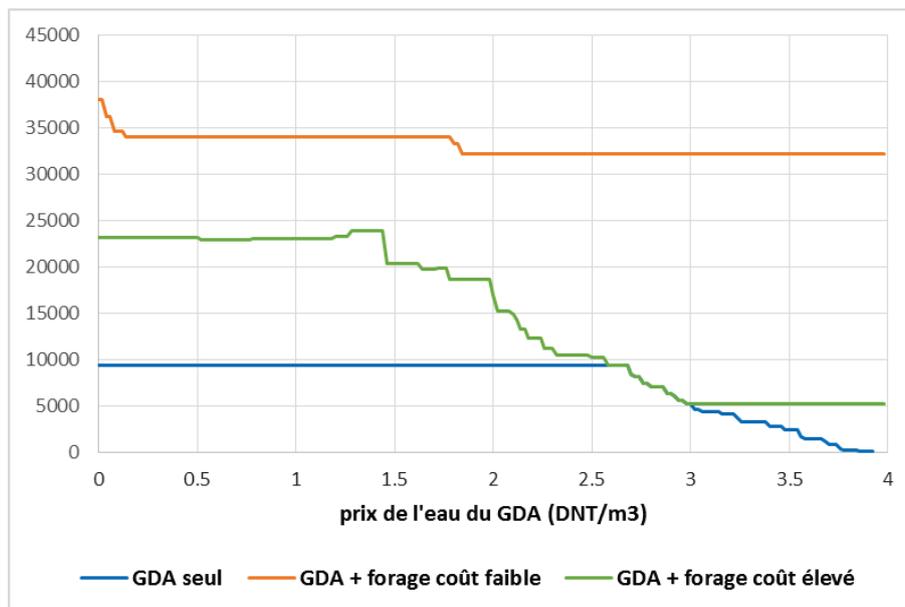
2. Pour des coûts de pompage compris entre 1 et 2,15 DNT/m³, la demande en eau reste stable alors que le revenu continue de diminuer de façon importante.
 3. A partir de 2,15 DNT/m³, la demande en eau décroît de nouveau engendrant cette fois-ci une diminution de la superficie cultivée, un changement important dans les assolements conduisant à un abandon progressif de l'irrigation.
- Pour une exploitation ayant accès à deux sources d'eau, les conclusions dépendent des niveaux respectifs des prix de l'eau de GDA et de coûts de l'eau de forage :
- Lorsque l'on fait varier le coût de pompage du forage privé, la présence d'une autre source d'eau (GDA) à faible prix augmente légèrement les superficies cultivées, les revenus et l'embauche de main d'œuvre occasionnelle par rapport à la situation avec forage seul. Dans un premier temps, la demande en eau totale évolue de façon similaire à la situation avec forage seul, mais la deuxième diminution importante intervient pour des coûts de pompage plus élevés (entre 4 et 4,5 DNT/m³). En effet, la substitution de l'eau du GDA à l'eau de forage permet de maintenir une consommation en eau relativement importante pour des coûts de pompage très élevés (Figure 5-12). L'agriculteur utilise en priorité l'eau du GDA et comble les besoins restants par l'eau du forage cela en appliquant toujours une stratégie d'irrigation déficitaire.
 - Lorsque le prix de l'eau du GDA est élevé, la demande en eau totale évolue de la même façon que dans le cas avec forage seul, jusqu'à ce que le coût de pompage atteigne le prix de l'eau du GDA et que la substitution entre les deux sources s'opère. Cependant à ce niveau de prix la demande en eau du GDA est très faible.

Figure 5-12 : Comparaison de l'évolution de la demande en eau globale selon le coût de pompage du forage pour différentes situations d'accès à l'eau



- En présence de deux sources d'eau, la demande en eau globale reste rigide par rapport à la variation du prix de l'eau du GDA. Le niveau global atteint est d'autant plus élevé que le coût de pompage du forage est faible (Figure 5-13). Dans le cas d'un coût de pompage faible, la variation du prix du GDA n'a quasiment aucune influence sur la demande l'agriculteur irrigant à partir du forage. Lorsque le coût de pompage est élevé, la demande est plus sensible aux variations du prix de l'eau du GDA et la substitution entre les deux sources d'eau intervient pour des prix plus élevés.

Figure 5-13 : Comparaison de l'évolution de la demande en eau globale selon le prix de l'eau du GDA pour différentes situations d'accès à l'eau



- Enfin, nous avons testé l'effet d'une variation de l'efficacité du GDA sur la demande en eau des exploitations concernées. Les résultats montrent que dans le cas où l'exploitation irrigue seulement à partir du GDA, la variation de l'efficacité a un effet remarquable sur les assolements et les stratégies d'irrigation. Ce résultat est cohérent avec les observations du Chapitre 3 sur les performances des GDA. Cependant la variation de l'efficacité du GDA n'a d'effet sur la demande en eau que pour des niveaux importants d'efficacité (diminution de la demande en eau de forage) lorsque l'exploitation dispose d'un forage privé. Ces deux résultats confirment que l'investissement dans la réhabilitation des périmètres publics irrigués et l'amélioration du service des GDA peuvent être une solution pour limiter le recours à l'installation des forages privés.

L'ensemble des simulations montrent que la demande en eau globale ne peut être gérée avec un seul instrument et que le niveau de prix de l'énergie ou de l'eau doivent être réfléchis en fonction de l'ensemble des ressources en eau existantes localement et de leur coût respectif.

L'application de la méthode de programmation mathématique est exigeante en données sur les pratiques culturales, les rendements des cultures, les prix, etc. Or, le contexte de la plaine de Kairouan, comme de nombreuses autres régions du Maghreb, se caractérise par une absence de données fiables sur les pratiques des agriculteurs et leurs résultats économiques. Nous avons donc dû opérer certaines simplifications par manque de données. Des améliorations du modèle seraient possibles sur les points suivants :

- Les cultures maraîchères introduites dans le modèle ne sont pas nombreuses. Afin d'analyser plus finement les effets de substitution entre les cultures, il serait intéressant d'introduire dans le modèle un éventail plus large de cultures présentant des niveaux de besoins en eau variés.
- Il serait intéressant de différencier deux contraintes de rotation, l'une pour la période d'été et l'autre pour la période d'hiver, au lieu d'une seule contrainte annuelle.
- Les données utilisées concernant les pratiques culturales et d'irrigation sont issues pour une grande part des CTV et de quelques données issues d'enquêtes en exploitation. Il serait intéressant de réaliser des enquêtes plus détaillées auprès des agriculteurs, voire même des suivis, afin d'affiner la prise en compte de leurs pratiques réelles dans le modèle.
- Le modèle retenu ne prend pas en compte le risque lié à la disponibilité de la ressource en eau. En tenir compte permettrait de mieux représenter la situation des exploitations qui ont accès seulement à l'eau du GDA, soumise à des risques de coupure.

Malgré ces limites, le modèle construit a permis de simuler différents scénarios apportant un éclairage sur les instruments de gestion de l'eau envisageables dans le contexte tunisien. D'autres simulations seraient également possibles à partir du modèle existant :

- Représenter d'autres types d'exploitations pour étudier notamment l'effet de la taille de l'exploitation ou de la part de l'olivier sur la réponse de la demande en eau face aux variations de son coût ;

- Analyser les échanges combinés d'eau et de foncier entre les différents types d'exploitations ;
- Etudier le mouvement observé d'investissement dans l'arboriculture (olivier et arbres fruitiers) ;
- Construire un modèle agrégé régional pour estimer l'évolution globale de la demande eau à l'échelle de la plaine de Kairouan. Ce modèle exigerait de formuler certaines hypothèses de pondération des types d'exploitations identifiés et mobiliserait les données de l'inventaire que nous avons effectué.

CONCLUSION GENERALE ET DISCUSSION

Cette partie de discussion et conclusion vise à donner une synthèse des différentes étapes de la thèse, des méthodes et approches utilisées et des différents résultats de recherche.

Comme de nombreuses autres régions du Maghreb, la plaine de Kairouan connaît depuis plusieurs décennies un développement agricole rapide basé sur la surexploitation des eaux souterraines, dont on questionne aujourd'hui la durabilité. Cette surexploitation est reconnue par les autorités tunisiennes qui cherchent à limiter l'expansion des prélèvements individuels et donc à réguler la demande en eau agricole.

Dans ce contexte de « groundwater economy », la question centrale de cette thèse était la suivante : *« face à une surexploitation de la nappe, quelles sont les évolutions observées des structures et des systèmes de production et les facteurs explicatifs de cette révolution silencieuse ? Ce travail visait aussi à comprendre le comportement des irrigants, la façon dont ils prennent leurs décisions, leurs pratiques d'irrigation, leurs choix d'investissement et les contraintes qui pèsent sur le fonctionnement de leurs exploitations, mais aussi leurs stratégies d'adaptation à la pénurie d'eau sur l'exploitation ».*

L'ambition affichée était ainsi de contribuer à aider les gestionnaires à identifier les leviers d'action possibles pour freiner la surexploitation de la ressource et fixer des objectifs opérationnels à court et moyen termes et d'autres à plus long terme pour la planification.

Avant de discuter des limites de l'approche adoptée et des pistes de recherche qui pourraient être envisagées pour approfondir ce travail, nous revenons sur la démarche adoptée et les principaux résultats obtenus.

La démarche et les principaux résultats

Notre démarche de recherche a comporté quatre étapes : (1) acquisition des données sur le terrain, (2) analyse de la situation des GDA - groupement de développement agricole - en tant que gestionnaires de distribution de l'eau dans les périmètres publics irrigués, (3) analyse des dynamiques globales de la zone qui accompagnent la surexploitation de la ressource tout en cernant la diversité et les trajectoires des exploitations qui en résultent, enfin (4) la construction d'un modèle micro-économique et son utilisation pour simuler différents scénarios d'évolution.

➤ Les GDA entre fragilité de gestion et exigences de développement : quels (dés)accords ?

En Tunisie, les performances de la gestion collective des périmètres irrigués par des associations d'usagers (GDA) sont considérées comme globalement médiocres. Cependant les évaluations disponibles actuellement n'expliquent pas tous les facteurs à l'origine de cette situation et n'abordent pas les conséquences qui en résultent sur la demande en eau agricole et le développement de l'irrigation individuelle. C'est pourquoi nous avons effectué une analyse des problèmes des GDA et des causes de l'échec de cette gestion collective basée sur l'exploitation d'une ressource souterraine. A cette fin nous avons pris comme cas d'étude les

22 périmètres publics irrigués (PPI) situés sur l'aquifère de Kairouan, dans la zone d'infiltration de l'Oued Merguellil en aval du barrage d'El Houwareb.

L'analyse s'est appuyée sur des entretiens individuels avec les membres des GDA mais également des représentants de l'administration en charge de l'agriculture locale (CRDA) et du conseil agricole (CTV). A partir des données recueillies, une grille d'analyse des performances des GDA a été construite. Cette grille a permis d'identifier trois types de GDA. L'analyse détaillée de la situation de GDA choisis comme représentatifs de la diversité existante a alors permis d'expliquer les écarts de performance observés entre GDA, de révéler les facteurs qui ont amené à la situation actuelle et ainsi de mieux décrire la dynamique d'expansion des forages privés et l'arbitrage entre les deux sources d'irrigation que sont l'eau des GDA et l'eau des forages privés.

Globalement cette partie de la thèse se conclut par le constat d'une dégradation du service des GDA, seuls 18% étant en bon état, le reste étant soit en difficulté (46%) (approvisionnement discontinu en eau, dettes importantes), soit non fonctionnels (36%) à cause des pannes non réparées ou de la coupure d'électricité suite au non-paiement des factures.

Les écarts des performances observés sont le résultat des difficultés de gouvernance, d'un historique marqué par la corruption de certains membres du conseil d'administration et l'utilisation des recettes ou de l'eau du GDA à des fins personnelles, d'un manque de technicité des directeurs techniques, mais aussi d'une vétusté des réseaux. En l'absence d'une véritable volonté des irrigants à contribuer à l'amélioration du service d'approvisionnement, ces derniers ont alors basculé vers l'irrigation privée en investissant dans des forages illicites généralement non électrifiés. Mais la défaillance des systèmes collectifs n'est pas l'unique cause du développement des forages privés : l'augmentation continue du prix des intrants a réduit le revenu des agriculteurs, incitant ceux qui disposaient d'un capital suffisant pour investir dans un forage à s'orienter vers des cultures à haute valeur ajoutée rentabilisant ainsi leurs petits lots de terre et conduisant de fait à l'accroissement des iniquités sociales dans la zone.

En plus de son impact sur la durabilité de la ressource, l'irrigation par des forages individuels affaiblit la situation financière des GDA, amenuisant leurs recettes ce qui peut les conduire à des niveaux de performance médiocres voire à un dysfonctionnement total comme pour les GDA de Chebika Est et Ouest. Un cercle vicieux démarre alors, confirmant que la dégradation de la gestion collective dans la plaine est à la fois une cause et une conséquence de l'expansion dramatique des forages illicites.

Les difficultés rencontrées par ces structures collectives dépassent le seul cas de la plaine de Kairouan et posent la question de la pertinence de leur maintien. Faut-il abandonner ces modes d'accès collectif à l'eau ? Faut-il les réformer en transférant leur gestion à l'administration ? Faut-il leur redonner une chance en les accompagnant dans la révision des formules tarifaires et dans la réhabilitation des réseaux ? La réponse à ces questions est loin d'être simple, dans un contexte où les autorités tunisiennes poursuivent des objectifs qui, au moins à court terme, sont contradictoires : développement agricole, préservation de la ressource et équité sociale. Un abandon de l'irrigation collective par les GDA, ou une augmentation importante des tarifs sans

doute affecterait surtout les petits agriculteurs qui n'ont pas d'autres moyens pour irriguer leurs parcelles et assurer la viabilité de leurs exploitations.

➤ **Des dynamiques agricoles marquées par un morcellement aigu, une généralisation de l'irrigation, une régression du potentiel agricole compensée par une forte intensification**

Après avoir apporté quelques éléments d'éclairage sur le phénomène d'expansion des forages et sur les niveaux de performance de la gestion collective au niveau des PPI, nous avons étudié les dynamiques et les évolutions globales de la région en termes de structure, d'assolement et de niveau de consommation en eau.

Nous nous posons les questions suivantes : le développement de l'irrigation privée s'accompagne-t-il d'une évolution des systèmes de production ? Quel est son effet sur la demande en eau dans la zone ? Cela a-t-il modifié la diversité des exploitations et leurs trajectoires ?

Pour y répondre, nous avons mené en 2016 une longue période de travail de terrain durant laquelle nous avons réalisé un inventaire des exploitations agricoles de la zone (4188) et conduit une enquête auprès de 126 exploitations irrigantes de 7 secteurs de la plaine de Kairouan, dont 69 avaient déjà été enquêtées en 2005 par l'IRD (Poussin et al., 2008). Cette précédente enquête portant sur 150 exploitations agricoles de la même zone d'étude nous a permis d'adopter une approche diachronique permettant de comparer la diversité des exploitations entre les deux dates.

La comparaison entre les deux inventaires (de 2005 et 2015) illustre la classique « tragédie des communs » avec une course à l'utilisation d'une nappe en libre accès difficilement gérable. On assiste à un doublement du nombre d'exploitations, conséquence pour une grande partie de la pratique traditionnelle de partage les exploitations entre les héritiers. En parallèle, mais dans une bien moindre mesure, on observe l'acquisition de terres par de nouveaux investisseurs extérieurs à la plaine, attirés par la présence de sols de bonne qualité et d'un accès relativement facile à l'eau.

Ce mouvement de morcellement des terres s'est accompagné d'un un recours plus important à l'irrigation qui concerne 59% des exploitations en 2015 contre 44% en 2005. On peut penser que la taille réduite des exploitations qui résulte du processus de succession constitue une incitation forte à l'intensification des cultures permise par l'irrigation. Cette tendance au développement des cultures irriguées est observée à la fois dans les exploitations initialement en sec, , mais aussi dans les exploitations initialement irriguées. Ainsi, globalement, les cultures pluviales passent de 25% de la superficie totale en 2005 à 7% en 2015.

Les systèmes de culture évoluent également : si la culture traditionnelle de la région –l'olivier– domine encore (elle est présente chez 90% des exploitations agricoles), les superficies cultivées en sec diminuent au profit d'une association avec des cultures irriguées conduites en intercalaire (maraîchage, grandes cultures). Une autre tendance très remarquable est le développement de l'arboriculture fruitière en intercalaire avec les anciens oliviers, sa part dans l'assolement global de l'échantillon est multipliée à peu près par 3 en 10 ans. Cette tendance est expliquée par la

sécurité qu'offre l'arboriculture en termes de revenu, sa capacité de résistance au manque d'eau, et ses moindres exigences en intrants comparée aux cultures maraichères. On l'observe plus particulièrement dans les secteurs de Chebika et Abida, caractérisés par un accès facile à la nappe, des sols bien adaptés et une proximité des débouchés commerciaux.

Les enquêtes montrent aussi une réticence des agriculteurs à cultiver le maraîchage pur, ce qui se traduit par une augmentation de la part des cultures maraichères en intercalaire qui passent de 5% en 2005 avec une superficie moyenne de 2,4 ha à 9% en 2015 avec une superficie moyenne de plus de 4 ha par exploitation qui les pratique. La pratique des cultures intercalaires est donc devenue une spécificité du paysage agricole de la plaine. En adoptant cette technique, les agriculteurs valorisent ainsi mieux l'eau et la terre.

On constate par ailleurs une déprise sur une partie des terres agricoles, dans les secteurs de Houffia et Ouled Khalfalah, les grandes cultures en sec étant délaissées et les anciens oliviers cultivés auparavant en sec arrachés. Le potentiel agricole de la zone régresse ainsi, ce que nous pouvons mettre en parallèle avec le rabattement de la nappe (donc avec un accès à l'eau de plus en plus coûteux) et avec le dysfonctionnement des GDA. Mais il est compensé dans d'autres secteurs de la plaine par l'intensification des systèmes de cultures (développement des cultures intercalaires).

➤ Une hausse globale de la demande en eau

La demande en eau agrégée à l'échelle de la zone a été estimée en adoptant deux méthodes de calcul aux résultats comparables. La consommation en eau augmente de près de 40% par rapport à l'estimation de 2005 : en 2015, elle est ainsi estimée à 52 Mm³ (en se basant sur l'agrégation des besoins des systèmes de cultures identifiés pour les exploitations recensées en 2015) ou 55 Mm³ (selon la méthode d'estimation des prélèvements des forages).

Mais cette estimation globale est insuffisante pour comprendre le ressort des dynamiques agricoles observées : malgré les problèmes d'abaissement de la nappe et l'augmentation du coût d'exhaure, la majorité des agriculteurs déclare avoir un accès facile à l'eau. Nous avons donc cherché à comprendre, en analysant les comportements individuels, les conditions de mobilisation de cette ressource, les modalités d'accès et les réorientations productives qui ont eu lieu pour s'adapter.

➤ Une diversité discriminée par des variables liées à l'accès à l'eau

Une analyse multivariée des informations recueillies (analyse en composantes principales, classification ascendante hiérarchique et analyse de co-inertie entre les variables de structure et d'assolement) a été conduite et a permis de construire une typologie d'exploitations qui différencie 8 types en 2015 contre 7 types en 2005, sur la base des données de structure.

Les principales variables discriminantes en 2015 comme en 2005 sont la superficie totale, la part de superficie irriguée à partir de forages privés, le niveau d'équipement global et la part de superficie irriguée en goutte-à-goutte. L'analyse de co-inertie montre une certaine relation entre variables de structure et variables d'assolement mais l'influence des structures d'exploitations sur les choix d'assolement semble diminuer entre les deux dates du fait d'une diversité accrue

des systèmes de cultures. La taille du cheptel apparaît également beaucoup moins structurante en 2015.

L'analyse des types a montré une grande diversité dans les modalités d'accès à la ressource avec des conséquences sur les orientations culturelles et un investissement important dans des forages privés .

➤ **Des trajectoires diversifiées en harmonie avec les dynamiques globales ... mais qui révèlent d'autres moyens d'accès à la ressource**

La présence de 69 exploitations enquêtées aux deux dates (2005 et 2015) nous a offert l'occasion d'analyser leurs trajectoires et les mécanismes responsables des transitions observées.

Six trajectoires d'évolution ont été identifiées : 1) d'importants changements de structure et d'orientation de production permis par l'accès à l'eau pour les exploitations initialement en sec ; 2) l'intensification du système de production via les cultures maraîchères pour valoriser l'investissement dans un forage privé ; 3) inversement la réduction des cultures maraîchères au profit de l'arboriculture irriguée (oliviers ou fruitiers) dans les exploitations les plus grandes ; 4) des échanges d'eau avec des agriculteurs voisins en cas d'impossibilité d'investir dans l'approfondissement d'un puits tari ou dans un forage ; 5) un agrandissement par location de terres ou plus rarement par achat sans modification de l'orientation de production ; et enfin 6) le maintien du système de production existant en 2005 sans intensification ni investissement pour les exploitations les plus petites ne bénéficiant pas de capitaux extérieurs. Il faudrait y ajouter sans doute une dernière trajectoire de sortie de l'agriculture que les modalités d'enquête n'ont pas permis de capturer.

La principale constatation est la grande diversité des modalités d'accès à la ressource, avec l'identification notamment d'échanges d'eau informels. Ces derniers sont parfois liés aux échanges de foncier et de capital : les agriculteurs sans accès à l'eau donnent leur terre en location ou en métayage, parfois sans contrepartie monétaire, à des propriétaires de forages pour garantir l'irrigation de leurs oliviers, le propriétaire du forage valorisant alors la terre en cultivant du maraîchage en intercalaire. Des échanges d'eau entre voisins contre un paiement du coût de l'énergie ou d'un montant fixe à l'heure ont également été observés. Enfin, une nouvelle modalité d'accès à la ressource, l'achat d'eau par citerne, s'est développée dans la plaine : des personnes disposant de moyens de pompage et de transport vont chercher des citernes d'eau à l'amont du bassin (lacs collinaires) ou dans l'émergence du barrage et les revendent à un prix élevé aux agriculteurs qui ne disposent pas de forage et qui veulent garantir la survie de leurs oliviers.

Ces échanges d'eau redynamisent fortement les arrangements contractuels formels. Ils mériteraient d'être étudiés de façon plus approfondie même s'ils ne concernent, en tous les cas dans notre échantillon, que peu d'agriculteurs.

➤ **Une rigidité de la demande en eau du GDA et une possibilité de gestion de l'irrigation individuelle par une politique énergétique bien adaptée**

Les différentes dynamiques observées dans la plaine de Kairouan, la typologie des exploitations et l'analyse des trajectoires d'évolution ont donné une image sur les stratégies des agriculteurs face à une ressource surexploitée et un accès à l'eau de plus en plus coûteux et parfois rare. Nous avons alors souhaité modéliser le comportement des agriculteurs pour estimer leur demande en eau face à une diversité de modes d'accès à l'eau et quantifier ce qui a été observé dans les parties précédentes. Cela devrait aider les gestionnaires à identifier les leviers d'action possibles pour freiner la surexploitation de la ressource.

Un modèle de programmation mathématique linéaire, statique et mono-périodique qui tient compte du risque de variabilité des rendements et des prix des produits agricoles a ainsi été construit. Nous avons tenu compte dans la modélisation du processus décisionnel de plusieurs stratégies d'irrigation, l'agriculteur pouvant ainsi choisir entre différents niveaux d'irrigation en fonction de ses objectifs de production et de ses disponibilités en eau.

Le modèle a ainsi permis d'identifier les grands mécanismes du système. Nous avons en effet quantifié la valeur ajoutée apportée par un forage à l'exploitation agricole et les effets produits sur les systèmes de culture, la consommation en eau et le recrutement de main d'œuvre occasionnelle. L'investissement dans un forage privé engendre ainsi une demande importante en eau mais permet d'améliorer les revenus des agriculteurs et d'assurer leur transition économique, d'exploitations cultivant l'olivier et la céréaliculture à des exploitations diversifiées caractérisées par des cultures de rente. Ceci permet évidemment de fixer la population et d'assurer le développement local de la zone.

La comparaison du comportement d'un agriculteur qui a uniquement accès à l'eau du GDA à celui d'un agriculteur ayant un forage a permis de vérifier les contraintes qui pèsent sur le premier. Les résultats de notre modèle sont en harmonie avec les observations de terrain.

Ces résultats mettent en lumière le dilemme auquel sont confrontés les gestionnaires de la ressource en eau : limiter l'installation des forages privés pour préserver les ressources en eau au détriment du développement économique et de l'emploi. La mise en place d'instruments de gestion permettant de concilier ces trois objectifs serait souhaitable mais pas toujours réalisable.

Notre modèle nous a permis de simuler différents scénarios et ainsi de produire quelques éléments d'éclairage à destination des gestionnaires de la ressource qui actuellement discutent en Tunisie pour trouver des solutions quant aux moyens d'action sur la demande en eau et de réduction de la pression sur les nappes.

Nos résultats montrent que la demande en eau de GDA est rigide, du fait d'une très forte valorisation de l'eau (l'agriculteur valorise l'eau jusqu'à un prix de 2,7 DNT/m³). La gestion de la demande en eau du GDA en jouant sur le niveau du prix de l'eau n'est donc pas efficace car ne conduisant qu'à une dégradation importante des revenus des agriculteurs.

L'augmentation du coût de pompage des forages individuels par contre, lorsque ce dernier reste inférieur à 1 DNT/m³ réduit la demande en eau sans impacter fortement le revenu ou

l'embauche de main d'œuvre occasionnelle. La politique énergétique paraît donc très intéressante comme instrument pour des coûts de pompages restant inférieurs 1 DTN/m³. Ainsi, une augmentation de prix de l'électricité (qui renchérirait donc le coût de pompage) pourrait assurer une baisse importante de la demande globale sans trop pénaliser financièrement les irrigants et l'emploi saisonnier.

Quand l'agriculteur a accès aux deux sources d'eau, la demande en eau globale reste rigide par rapport à la variation du prix de l'eau du GDA. Le niveau global atteint est d'autant plus élevé que le coût de pompage du forage est faible. Lorsque le coût de pompage est faible, la variation du prix du GDA n'a quasiment aucune influence sur la demande de l'agriculteur irrigant à partir du forage ; quand il est élevé, la demande est plus sensible aux variations du prix de l'eau du GDA et la substitution entre les deux sources d'eau intervient pour des prix plus élevés. Nous pouvons ainsi noter l'importance des niveaux respectifs du prix de l'eau du GDA et du coût de pompage dans le choix des ressources et le volume d'eau consommé. Notre attention a été également attirée par les mécanismes d'adaptation alors à l'œuvre, qui se traduisent essentiellement par une modification des stratégies d'irrigation : dans le cas d'un manque d'eau au niveau de l'exploitation ou quand le coût de pompage est très élevé, l'agriculteur adopte une stratégie moins exigeante en eau sans trop modifier son assolement. Cette stratégie d'irrigation dite « déficitaire » est actuellement appliquée en Tunisie au Cap Bon pour faire face au manque d'eau et semble donner de bons résultats pour la culture d'agrume. Cette mesure adaptative pourrait ainsi être étudiée sur la plaine de Kairouan pour estimer l'impact qu'elle aurait sur la quantité d'eau prélevée et la stabilité des rendements et des revenus.

Nos simulations ont enfin montré que, dans le cas où l'exploitation irrigue seulement à partir du GDA, l'augmentation du niveau d'efficacité de ce dernier a comme conséquence de réduire significativement la consommation en eau. Ce n'est par contre pas le cas quand il existe aussi un forage privé. Ainsi l'amélioration du service du GDA et l'investissement dans la réhabilitation des périmètres irrigués peuvent être des moyens capables de limiter les prélèvements privés.

Des lacunes de connaissances et des perspectives de recherche

Cette thèse produit des connaissances intéressantes sur les causes et les mécanismes de la surexploitation des eaux souterraines et de l'expansion des forages privés, par une compréhension des dynamiques récentes et une représentation de la diversité existante et de son évolution dans le temps. Cependant, plusieurs pistes mériteraient davantage d'approfondissement pour permettre une compréhension plus fine et une modélisation plus robuste.

La connaissance du terrain devrait être tout d'abord affinée. Il aurait ainsi été intéressant dans l'inventaire de collecter l'information sur les superficies des cultures et le mode de faire-valoir, pour affiner la comparaison des situations en 2015 et 2005 et mieux comprendre les dynamiques. En effet l'inventaire ne permet pas de distinguer la part des locataires dans la population des exploitations et donc de vérifier si l'évolution du nombre et de la taille moyenne des exploitations observés ne sont dus qu'aux évolutions générationnelles. Un autre facteur peut

aussi expliquer l'augmentation importante du nombre d'exploitations : ne connaissant pas les limites exactes de la zone, les OMDA ont pu prendre en compte quelques douars qui n'appartiennent pas à la zone d'étude définie en 2005.

Il serait par ailleurs nécessaire de collecter des informations plus détaillées sur les pratiques culturales et d'irrigation de quelques cultures types, nous permettant ainsi de limiter le nombre d'hypothèses émises dans ce travail (stratégie d'irrigation, rendement des cultures en intercalaires, ...).

Ce travail de recherche pourrait aussi être approfondi en intégrant dans le modèle de nouvelles contraintes (comme celles de trésorerie permettant de représenter le comportement d'investissement dans des forages ou dans des vergers d'arboriculture) ou en affinant celles présentes (comme la représentation des contraintes de rotation culturale par saison). Il pourrait opportunément aussi conduire à la construction d'un modèle régional permettant d'estimer une fonction de demande agrégée en eau à partir de la modélisation des différentes exploitations-types. Faute de données statistiques officielles sur les exploitations de la zone, nous n'avons en effet pas pu calculer la pondération de chaque type dans la plaine, les données de l'inventaire des exploitations réalisé n'ayant pas non plus permis de les calculer par manque d'information sur les superficies des cultures. Cette limite pourrait être dépassée, soit en reprenant les calculs de ces pondérations, soit en s'appuyant sur les données du futur recensement agricole, soit en simulant différentes pondérations et en estimant l'impact en termes de variation de la demande en eau. Ce modèle agrégé permettrait de tester des scénarios sur une plus grande étendue géographique et pour une plus grande diversité d'exploitations, et surtout de représenter l'échange de foncier et d'eau en distinguant différents arrangements d'échanges entre preneur et donneur.

Enfin, il reste à présenter les résultats aux parties prenantes. L'organisation d'ateliers participatifs permettrait de discuter avec elles, en vue de valider nos résultats et aussi de recueillir leurs perceptions sur les scénarios testés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alary, V., S. Messad, C. Taché, et E. Tillard. 2002. « Approche de la diversité des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion ». *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux* 55 (4): 285–297. <https://doi.org/10.19182/remvt.9816>.
- Albouchi, L. 2005. « Gestion de l'eau en Tunisie : d'une politique de mobilisation à une politique de réallocation de la ressource selon sa valorisation économique Cas du bassin versant du Merguellil, Tunisie Centrale ». Thèse en sciences économiques, Montpellier: Université Montpellier I.
- Allain, S., et M. Sébillotte. 1991. « Equipements et fonctionnement des exploitations agricoles : contribution pour une meilleure aide à la décision ». *Économie rurale* 206 (1): 81–87. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1991.4245>.
- Allen, R-G., L-S. Pereira, D. Raes, L. Belgium, et M. Smith. 1998. « FAO Irrigation and Drainage Paper, Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements) », n° 56: 333.
- Allen, R-G., L-S. Pereira, D. Raes, et M. Smith. 1998. « Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56 », 15.
- Ameur, F. 2017. « Construction de la surexploitation et reproduction des inégalités d'accès et d'usage des eaux souterraines ». Thèse de doctorat en sciences de l'eau, Maroc: L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech).
- Amichi, H., J-Y. Jamin, S. Morardet, I. Gharbi, A. Azizi, F. Faidani, M. Ghileb, S. Marlet, et M. Elloumi. 2016. « Le rôle du faire-valoir indirect dans le renouvellement générationnel des agriculteurs irrigants en Tunisie ». *Cahiers Agricultures* 25 (3): 35004. <https://doi.org/10.1051/cagri/2016022>.
- Anderson, T-L. 1983. *Water crisis : ending the policy drought*. Baltimore, Md. : Johns Hopkins University.
- Ashley, C., et D. Carney. 1999. *Sustainable Livelihoods: Lessons from Early Experience*. London: Department for International Development.
- Atiri, R. 2007. « Evolution institutionnelle et réglementaire de la gestion de l'eau en Tunisie. Vers une participation accrue des usagers de l'eau ». In *Actes du séminaire Wa-demed*, 14. Cirad, Montpellier, France: Sami Bouarfa, Marcel Kuper, Abdelhafid Debbarh (éditeurs scientifiques).
- Aubriot, O. 2002. *Histoires d'une eau partagée : Provence, Alpes, Pyrénées*. Publications de l'Université de Provence. Aubriot Olivia, Jolly Geneviève.
- Azizi, A. 2014. « Impact des structures foncières sur le fonctionnement des exploitations agricoles irriguées en Tunisie. Le cas du périmètre Brahmi dans la vallée de la Medjerda ». Master 2 Agriculture, Alimentation et Développement Durable, Montpellier: Montpellier SupAgro, Cirad UMR G-eau.
- Azizi, A., S. Morardet, M. Montginoul, et J-L. Fusillier. 2016. « Performances de la gestion collective de l'irrigation et dynamique d'expansion des forages privés dans la plaine de Kairouan ». In Paris - La Défense: Société Française d'Economie Rurale.
- Baccar, M., A. Bouaziz, P. Dugué, et P-Y. Le Gal. 2017. « Shared Environment, Diversity of Pathways: Dynamics of Family Farming in the Saïs Plain (Morocco) ». *Regional Environmental Change* 17 (3): 739–51. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1066-4>.
- Bachta, M-S., A. Ben Mimoum, L. Zaibet, et L. Albouchi. 2004. « Simulation of a Water Market in Tunisia : A Case Study of GIC Melalsa – Kairouan », 15.
- Bachta, M-S., P. Le Goulven, P. Le Grusse, et J-P. Luc. 2000. « Environnement institutionnel

- et réalités physiques pour une gestion intégrée de l'eau dans le milieu semi-aride méditerranéen : le cas tunisien ». In *Hydrologie des régions méditerranéennes*, 5:177-86. Paris, Unesco, PHI-V/Documents techniques en hydrologie. Montpellier.
- Bahir, M., et A. Mennani. 2002. « Problématique de la gestion des eaux souterraines au Maroc ». *Estudios Geológicos*, 58 : 103-108.
- Barraqué, B. 1998. *Les services publics d'eau et d'assainissement face au développement durabl*. Annales des Ponts et Chaussées.
- Bartolini, F., G-M. Bazzani, V. Gallerani, M. Raggi, et D. Viaggi. 2007. « The Impact of Water and Agriculture Policy Scenarios on Irrigated Farming Systems in Italy: An Analysis Based on Farm Level Multi-Attribute Linear Programming Models ». *Agricultural Systems* 93 (1-3): 90-114. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.04.006>.
- Bekhti, B. 2014. « Trajectoires d'évolution des nouvelles exploitations agricoles oasiennes de la zone de hassi ben abdellah (ouargla) ».
- Bekkar, Y., M. Kuper, A. Hammani, M. Dionnet, et A. Eliamani. 2007. « reconversion vers des systèmes d'irrigation localisée au Maroc quels enseignements pour l'agriculture familiale ? », 15.
- Ben Mihoub, A. 2005. « Analyse – diagnostic du système agraire dans la plaine de Kairouan (partie aval du bassin versant de Mergullil) ». Mémoire Pour l'obtention du diplôme d'agronomie approfondie. Institut National Agronomique Paris-Grignon, IRD.
- Ben Mustapha, A., N. Faysse, S. Marlet, et J-Y. Jamin. 2015. « Une action collective analysée par ses acteurs : une association d'irrigants en Tunisie ». *Natures Sciences Sociétés* 23 (4): 356-66. <https://doi.org/10.1051/nss/2015055>.
- Bergez, J-E., J-M. Deumier, B. Lacroix, P. Leroy, et D. Wallach. 2002. « Improving Irrigation Schedules by Using a Biophysical and a Decisional Model ». *European Journal of Agronomy* 16 (2): 123-35. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(01\)00124-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00124-1).
- Billib, H. 1971. « Recherches sur l'économie de l'eau souterraine de la plaine de Kairouan avec un réseau R.C ». Tunis: DRE.
- Blanvillain, J-M., J-P. Hopquin, F. Lauer, C. Goscianski, C. Fèvre, et C. Montgobert. 2011. « Projet « Typologie des systèmes d'exploitation agricole » ». Document pour la réunion de lancement du projet « Typologie des systèmes d'exploitation ». CRA Centre, CRA Picardie, CRA Lorraine, CRA Pays de Loire, APCA, CRA Midi- Pyrénées.
- Blomquist, W-A., E. Schlager, et T. Heikkila. 2004. *Common Waters, Diverging Streams: Linking Institutions to Water Management in Arizona, California, and Colorado*. Washington, D.C: Resources for the Future.
- Bonin, M., P. Thinon, P. Caron, J-P. Cheylan, et Y. Clouet. 2001. « Territoire, zonage et modélisation graphique : recherche-action et apprentissage / Territory, zoning and graph modelling : concerted applied research and training ». *Géocarrefour* 76 (3): 241-52. <https://doi.org/10.3406/geoca.2001.2562>.
- Bontemps, C., et S. Couture. 2000. « Une Méthode d'Evaluation de la Fonction de Demande en Eau d'Irrigation ».
- Bouammar, B., et B. Bekhti. 2010. « Trajectoires d'évolution des nouvelles exploitations agricoles oasiennes de la zone de Hassi ben abdellah (Ouargla) ». 8 (8): 59-64.
- Bouazizi, N. 2016. « Durabilité économique des exploitations agricoles dans la Plaine de Kairouan ». Mémoire de Mastère, Spécialité: Gestion des Ecosystèmes Naturels et Valorisation de leurs Ressources. Tunis: Institut National Agronomique de Tunisie.
- Boudjadja, A., M. Messahel, et H. Pauc. 2003. « Ressources hydriques en Algérie du Nord ». *Revue des sciences de l'eau* 16 (3): 285. <https://doi.org/10.7202/705508ar>.
- Bousquet, F., O. Barreteau, C. Mullon, et J. Weber. 1996. « Modélisation d'accompagnement : systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables ». In, 8-11. Abbaye de

- Fontevraud: Editions Quæ. <https://doi.org/10.3917/quae.bouam.2013.01.0147>.
- Boussard, J-M., et J-J. Daudin. 1988. *La Programmation linéaire dans les modèles de production*. Actualités scientifiques et agronomiques de l'Institut national de la recherche agronomique, ISSN 0181-0979 ; 14. France: Paris ; Milan ; Barcelone : Masson.
- Braiki, H. 2013. « La groundwater economy sur la plaine de Kairouan : trajectoires d'exploitations et inégalités territoriales ». Mémoire de master. INAT/CIRAD.
- Brossier, J. 1980. « De la recherche sur les décisions des agriculteurs à la formation économique des agriculteurs ». *Économie rurale* 136 (1): 39-46. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1980.2697>.
- Brossier, J., et M. Petit. 1977. « Pour une typologie des exploitations agricoles fondée sur les projets et les situations des agriculteurs ». *Économie rurale* 122 (1): 31-40. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1977.2520>.
- Bzioui, M. 2004. « Rapport national 2004 sur les ressources en eau au Maroc ». *UN WATER- AFRICA*, 94.
- Calatrava, J., et A. Garrido. 2005. « Modelling water markets under uncertain water supply ». *European Review of Agricultural Economics* 32 (2): 119-142.
- Capillon, A. 1993. « Typologie des exploitations agricoles. Contribution à l'étude régionale des problèmes techniques ». Thèse de doctorat, Paris: INA-PG.
- Capillon, A., et H. Manichon. 1978. « La typologie des exploitations agricoles : un outil pour le conseil technique ». In *Exigences nouvelles pour l'agriculture : les systèmes de culture pourront-ils s'adapter ?*, édité par J. Boiffin, P. Huet, M. Sébillotte, et France Paris, 449-65. INRA.
- Capillon, A., M. Sebillotte, et J. Thierry. 1975. « Évolution des exploitations d'une petite région : élaboration d'une méthode d'étude ». Paris, France: CNASEA, GEARA, INA P-G,.
- Carey, J-M., et D. Zilberman. 2002. « A Model of Investment under Uncertainty: Modern Irrigation Technology and Emerging Markets in Water ». *American Journal of Agricultural Economics* 84 (1): 171-83. <https://doi.org/10.1111/1467-8276.00251>.
- Caron, P., et J-P. Cheylan. 2005. « Donner sens à l'information géographique pour accompagner les projets de territoire : cartes et représentations spatiales comme supports d'itinéraires croisés ». *Géocarrefour* 80 (2): 111-22. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.1031>.
- Changming, L., Y. Jingjie, et E. Kendy. 2001. « Groundwater Exploitation and Its Impact on the Environment in the North China Plain ». *Water International* 26 (2): 265-72. <https://doi.org/10.1080/02508060108686913>.
- Cheyroux, B., et J-C. Poussin. s. d. « Pour l'obtention du DIPLÔME D'AGRONOMIE APPROFONDIE », 123.
- Chopin, P., J-M. Blazy, et T. Doré. 2015. « A New Method to Assess Farming System Evolution at the Landscape Scale ». *Agronomy for Sustainable Development* 35 (1): 325-37. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0250-5>.
- Chopin, P., J-M. Blazy, L. Guindé, J. Wery, et T. Doré. 2017. « A Framework for Designing Multi-Functional Agricultural Landscapes: Application to Guadeloupe Island ». *Agricultural Systems* 157 (octobre): 316-29. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.003>.
- Chopin, P., T. Doré, L. Guindé, et J-M. Blazy. 2015. « MOSAICA: A Multi-Scale Bioeconomic Model for the Design and Ex Ante Assessment of Cropping System Mosaics ». *Agricultural Systems* 140 (novembre): 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.08.006>.

- CNEA, et DGR. 1997. « Etude de la gestion et de la tarification de l'eau d'irrigation au niveau des périmètres irrigués. Seconde phase : Analyse et propositions tarifaires ». Groupement CNEA/BRL Ingénierie / Direction générale du génie rural.
- Codes des eaux. 2015. « Les ressources en eau en Tunisie (Codes des eaux) ».
- Coquillard, P., et D-R-C. Hill. 1997. *Modélisation et simulation d'écosystèmes : Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Masson.
- CRDA. 2014. « Rapport annuel de l'arrondissement EPI ». CRDA (arrondissement exploitations des périmètres publics irrigués).
- CRDA de Kairouan. 2015. « bilan de la nappe de Kairouan en 2015 ». CRDA (arrondissement ressource en eau).
- Cudennec, C., R. Beji, et M-S. Bachta. 2003. « Analyse des interactions entre ressources en eau et usages agricoles dans le bassin versant de l'oued Merguellil, Tunisie centrale ». In *Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur la Gestion Intégrée de l'Eau au Sein d'un Bassin Versant*, 5–p.
- Day, R-H. 1961. « Recursive Programming and Supply Prediction ». In *Agricultural Supply Functions*, 108-25. Iowa State University Press.
- De Facci, D. 2014. « La révolution tunisienne et l'impact social sur l'économie .html ». *Le carnet de l'IRMC* (blog). 22 septembre 2014.
- Deybe, D. 1993. *Vers une agriculture durable : un modèle bio-économique*. Paris : CIRAD-URPA.
- DFID. 1999. *Sustainable Livelihoods Guidance Sheets*. London: Department for International Development.
- Dono, G., R. Cortignani, L. Doro, L. Giraldo, L. Ledda, M. Pasqui, et P-P. Roggero. 2013. « Adapting to uncertainty associated with short-term climate variability changes in irrigated Mediterranean farming systems ». *Agricultural Systems*, 2013, Elsevier édition.
- Dono, G., L. Giraldo, et S. Severini. 2010. « Pricing of Irrigation Water under Alternative Charging Methods: Possible Shortcomings of a Volumetric Approach ». *Agricultural Water Management* 97 (11): 1795-1805. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.013>.
- Doorenbos, J., A-H. Kassam, C. Bentvelsen, et G. Uittenbogaard. 1980. « Yield Response to Water ». In *Irrigation and Agricultural Development*, 257-80. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-025675-7.50021-2>.
- Douaoui, A., T. Hartani, et M. Lakehal. 2006. « La salinisation dans la plaine du Bas-Chelif: acquis et perspectives ». In *Economies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb*, 10. Marrakech, Maroc.
- Dufumier, M. 2006. « Diversité des exploitations agricoles et pluriactivité des agriculteurs dans le Tiers Monde ». *Cahiers agricultures* 15 (6): 584–588.
- El Aamami, S. 1987. « Mutation des systèmes de culture en Tunisie Centrale - Etude de cas de deux familles de la basse steppe », *Revue Tunisienne de Géographie*, 127-37.
- EL Amami, H., M-S. Bachta, J. Ben Nasr, et B. Ben Nouna. 2014. « Le « Quota » comme instrument de régulation de l'exploitation des eaux souterraines : Application à la plaine de Kairouan ». In *Actes des 17èmes Journées Scientifiques de l'INRGREF*, 20. Hammamet, Tunisie.
- Elloumi, M. 2011. « Pour une gestion durable des ressources naturelles, les limites du cadre institutionnel tunisien ». In *Pouvoirs, sociétés et nature au sud de la Méditerranée*, par T. Dahou, M. Elloumi, F. Molle, M. Gassab, et B. Romagny. Hommes et sociétés. Editions Karthala.
- Faidani, F. 2014. « Le marché du faire-valoir indirect et formes de régulations foncières dans un contexte de groundwater economy en Tunisie ». Mémoire de Master 2, Master mention Eau, spécialité Eau et Société. Montpellier: Montpellier SupAgro.

- FAO, éd. 2003. *Groundwater Management: The Search for Practical Approaches*. Water Reports 25. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Faux, J., et G-M. Perry. 1999. « Estimating Irrigation Water Value Using Hedonic Price Analysis: A Case Study in Malheur County, Oregon ». *Land Economics* 75 (3): 440. <https://doi.org/10.2307/3147189>.
- Faysse, N., T. Hartani, A. Frija, S. Marlet, I. Tazekrit, C. Zaïri, et A. Challouf. 2011. « Usage agricole des eaux souterraines et initiatives de gestion au Maghreb : Défis et opportunités pour un usage durable des aquifères ». Note Economique. Tunis: Banque Africaine de Développement (AfDB). <http://hal-sde.archives-ouvertes.fr/docs/00/72/88/90/PDF/GestionEauSoutMaghreb.pdf>.
- Feuillette, S. 2001. « Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressource usages par les systèmes multi-agents : application à la nappe de Kairouan, Tunisie centrale ». Th. Doct., Université Montpellier II, discipline : Sciences de l'Eau. *France*, 350.
- Feuillette, S., F. Bousquet, et P. Le Goulven. 2003. « SINUSE: A Multi-Agent Model to Negotiate Water Demand Management on a Free Access Water Table ». *Environmental Modelling & Software* 18 (5): 413-27. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00006-9).
- Figureau, A-G. 2015. « Conception et évaluation d'instruments de gestion de l'eau combinant incitations économiques et préférences sociales - Cas des prélèvements agricoles en eau souterraine ». Thèse en sciences économique, Montpellier: Ecole doctorale Economie Gestion, unité de recherche G-EAU et du BRGM.
- Figureau, A-G., M. Montginoul, et J-D. Rinaudo. 2014. « Scénarios de régulation décentralisée des prélèvements agricoles en eau souterraine. Évaluation participative dans le bassin du Clain ». *Économie rurale*, n° 342: 27-44. <https://doi.org/10.4000/economierurale.4386>.
- Foster, S., J. Chilton, M. Moeng, F. Cardy, et M. Schiffler. 2000. *Groundwater in Rural Development: Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainability*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/0-8213-4703-9>.
- Frija, A., B. Dhehibi, A. Chebil, et K-G. Villholth. 2015. « Performance Evaluation of Groundwater Management Instruments: The Case of Irrigation Sector in Tunisia ». *Groundwater for Sustainable Development* 1 (1): 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2015.12.001>.
- Frija, A., A. Wossink, J. Buysse, S. Speelman, et G. Van Huylenbroeck. 2011. « Irrigation Pricing Policies and Its Impact on Agricultural Inputs Demand in Tunisia: A DEA-Based Methodology ». *Journal of Environmental Management* 92 (9): 2109-18. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.013>.
- Gafsi, M., P. Dugué, J-Y. Jamin, et J. Brossier. 2007. *Exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre*. Quae.
- Gardner, R-L., et R-A. Young. 1988. « Assessing Strategies for Control of Irrigation-Induced Salinity in the Upper Colorado River Basin ». *American Journal of Agricultural Economics* 70 (1): 37. <https://doi.org/10.2307/1241974>.
- Garrido, A., P. Martínez-Santos, et M-R. Llamas. 2005. « Groundwater Irrigation and Its Implications for Water Policy in Semiarid Countries: The Spanish Experience ». *Hydrogeology Journal* 14 (3): 340-49. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0006-z>.
- Géroudet, C. 2004. « Démographie et histoire agraire du bassin versant du Merguellil, Tunisie centrale ». Institut National Agronomique Paris-Grignon, Institut de Recherche pour le Développement, International Water Management Institute.
- Ghana, A. 2011. « Agriculteurs et paysans, nouveaux acteurs de la société civile et de la transition démocratique en Tunisie ». *Observatoire Tunisien de la Transition*

- Démocratique, Tunis*, 2011, Diwan édition.
- Ghileb, M. 2014. « Stratégies d'adaptation des irrigants aux changements globaux et impact sur la demande en eau: application à la plaine de Kairouan ». Mémoire de stage de master mention Eau, spécialité Eau et Société. Département des sciences de la terre et de l'eau et de l'environnement de Montpellier, IRSTEA-UMR-G-EAU.
- Giraldi, M. 2012. « La gestion collective de l'eau en Tunisie centrale : le territoire irrigué de kerma (plaine de Kairouan) ». Mémoire de fin de cycle d'ingénieur agronome, Spécialité: Gestion Sociale de l'Eau.
- Gohin, A., et F. Chantreuil. 1999. « La programmation mathématique positive dans les modèles d'exploitation agricole ». *Cahiers d'économie et de sociologie rurales*, 1999.
- Graveline, N. 2016. « Economic Calibrated Models for Water Allocation in Agricultural Production: A Review ». *Environmental Modelling & Software* 81 (juillet): 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.03.004>.
- Graveline, N., S. Loubier, G. Gleyses, et J-D. Rinaudo. 2012. « Impact of Farming on Water Resources: Assessing Uncertainty with Monte Carlo Simulations in a Global Change Context ». *Agricultural Systems* 108 (avril): 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2012.01.002>.
- Grawitz, M. 1990. *Méthodes des sciences sociales*. 8^e éd. Dalloz.
- Hammani, A., T. Hartani, M. Kuper, et A. Imache. 2009. « Paving the Way for Groundwater Management: Transforming Information for Crafting Management Rules ». *Irrigation and Drainage* 58 (S3): S240-51. <https://doi.org/10.1002/ird.521>.
- Hardaker, J-B., R-B-M. Huirne, J-R. Anderson, et G. Lien. 2004. *Coping with Risk in Agriculture*. Wallingford: UK: CABI Publishing.
- Hazell, P-B-R., et R-D. Norton. 1986. *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*. Macmillan, New York. MacMillan Publishing Company. New York.
- Hearnea, R-R., et G. Donoso. 2005. « Water Institutional Reforms in Chile ». *Water Policy* 7 (1): 53-69. <https://doi.org/10.2166/wp.2005.0004>.
- Heckelei, T. 1997. « Positive Mathematical Programming: Review of the Standard Approach ». *Common Agricultural Policy Regional Impact Analys*, 13.
- Hendricks, N-P., et J-M. Peterson. 2012. « Fixed Effects Estimation of the Intensive and Extensive Margins of Irrigation Water Demand ». *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 19.
- Hibou, B. 2006. *La force de l'obéissance (Économie politique de la répression en Tunisie)*. TAP/Hors-Série. La Découverte. <https://www.cairn.info/la-force-de-l-obeissance--9782707149244.htm>.
- Howitt, R-E. 1995b. « A Calibration Method for Agricultural Economic Production Models ». *Journal of Agricultural Economics*, 1995b.
- Iglesias, E., A. Garrido, et A. Gómez-Ramos. 2003. « Evaluation of drought management in irrigated areas ». *Agricultural Economics*, 2003, sect. 29 (2).
- Iglesias, E., A. Garrido, J. Sumpsi, et C. Varela-Ortega. 1998. « Water Demand Elasticity: Implications for Water Management and Water Pricing Policies », 17.
- Imache, A. 2008. « Construction de la demande en eau agricole au niveau régional en intégrant le comportement des agriculteurs. Application aux exploitations agricoles collectives de la Mitidja-Ouest (Algérie) ». Thèse en sciences de l'eau, Montpellier: Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech).
- INS. 2005. « Annuaire Statistique de la Tunisie, 2005 ». Institut nationale de la statistique.
- Jacquet, F., K. Louhichi, G. Flichman, et M-B. Fonseca. 2009. « Chapitre 3: Le risque ». In *Manuel A2D2*. Montpellier.
- Jamin, J-Y., E. Mbéti-Bessane, P. Djamén, A. Djonnewa, K. Djondang, et J. Leroy. 2007. « Modélisation de la diversité des exploitations ». In *Gafsi, M., Dugué, P., Jamin, J.-Y.*,

- Brossier, J. (Ed.), *Exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre. Enjeux, caractéristiques et éléments de gestion*, QUAE, 123-53. CTA.
- Jensen, J-D., M. Andersen, et K. Kristensen. 2002. « A Regional Econometric Sector Model for Danish Agriculture », 136.
- J. De Frutos Cachorro, K. Erdlenbruch, M. Tidball. 2014. « Optimal adaptation strategies to face shocks on groundwater resources. *Journal of Economic Dynamics and Control* ». Elsevier, 40, p. 134 -153.
- Jouve, P. 1986. « Quelques principes de construction de typologies d'exploitations agricoles suivant différentes situations agraires ». *Les Cahiers de la Recherche-Développement* 11: 48-56.
- Jouve, P., et M. Tallec. 1994. « Une méthode d'étude des systèmes agraires par l'analyse de la diversité et de la dynamique des agrosystèmes villageois », 17.
- Just, R-E. 1993. « Discovering Production and Supply Relationships: Present Status and Future Opportunities », Australian Agricultural and Resource Economics Society, 0 (01): 1-30.
- Kadi, A., S. Feuillette, P. Le Goulven, et P. Le Grusse. 2003. « Modèles d'exploration des dynamiques entre ressources et usages de l'eau pour une gestion intégrée des nappes souterraines. Application à la nappe de Kairouan en Tunisie ». In *Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur la Gestion Intégrée de l'Eau au Sein d'un Bassin Versant*, 12-p. Cirad-IRD-Cemagref.
- Kallali. 1989. « Zone surexploitée de la plaine de Kairouan ». Tunis: DGRE.
- Kallali et Gharbi. 1986. « Proposition d'un périmètre de sauvegarde à Abida ». Tunis: DRE.
- Kaplan, A. 1964. *The conduct of inquiry: methodology for behavioral science*. Israel: Chandler Pub.
- Kefi, M., N. Faysse, P. Le Goulven, et M-S. Bachtta. 2003. « Comportement des irrigants face à des changements d'accès à l'eau dans les périmètres irrigués de la plaine de Kairouan ». In *Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur la Gestion Intégrée de l'Eau au Sein d'un Bassin Versant*, 12-p. Cirad-IRD-Cemagref.
- 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.
- Kingumbi, A., M. Besbes, J. Bourges, et P. Garetta. 2004. « Évaluation des transferts entre barrage et aquifères par la méthode de bilan d'une retenue en zone semi-aride. Cas d'El Haouareb en Tunisie centrale ». *Revue des sciences de l'eau* 17 (2): 213. <https://doi.org/10.7202/705531ar>.
- Kumar, M-D. 2005. « 05/01051 Impact of Electricity Prices and Volumetric Water Allocation on Energy and Groundwater Demand Management: Analysis from Western India ». *Fuel and Energy Abstracts* 46 (3): 160. [https://doi.org/10.1016/S0140-6701\(05\)81056-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6701(05)81056-2).
- Kuper, M., N. Faysse, A. Hammani, T. Hartani, S. Marlet, M. Hamamouche, et F. Ameer. 2016. « Liberation or Anarchy? The Janus Nature of Groundwater Use on North Africa's New Irrigation Frontiers ». In *Integrated Groundwater Management*, édité par A-J. Jakeman, O. Barreteau, R-J. Hunt, J-D. Rinaudo, et A. Ross, 583-615. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_23.
- Kuper, M., et A. Zaïri. 2007. « Usages agricoles de l'eau et valorisation dans la plaine de Kairouan, Tunisie centrale », 13.
- Labbe, F., P. Ruelle, P. Garin, et P. Leroy. 2000. « Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages ». *European Journal of Agronomy*, 2000.
- Landais, E. 1996. « Typologies d'exploitations agricoles. Nouvelles questions, nouvelles

- méthodes ». *Économie rurale* 236 (1): 3-15. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1996.4819>.
- Laurent, C., F. Maxime, A. Mazé, et M. Tichit. 2003. « Multifonctionnalité de l'agriculture et modèles de l'exploitation agricole ». *Économie rurale* 273 (1): 134-52. <https://doi.org/10.3406/ecoru.2003.5395>.
- Le Goulven, P., C. Leduc, M. Bachta, et J-C. Poussin. 2009. « Sharing scarce resources in a Mediterranean river basin: Wadi Merguellil in Central Tunisia ». In *River basin trajectories: Societies, environments and development*, 147-70.
- Lebart, L., A. Morineau, et M. Piron. 2000. *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. 3eme éd. Paris: Dunod.
- Leduc, C. 2016. « Analyse du statut actuel des ressources en eau, de leur gouvernance et des réformes de politiques publiques. Partie II : Bassin du Merguellil. » Projet ANR Améthyst.
- Leduc, C., R. Beji, et R. Calvez. 2003. « Les ressources en eau du barrage d'el Haouareb et des nappes adjacentes, vallée du Mergellil, Tunisie centrale ». In *Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur la Gestion Intégrée de l'Eau au Sein d'un Bassin Versant*, 7-p. Cirad-IRD-Cemagref.
- Li, M., et R-S. Yost. 2000. « Management-Oriented Modeling: Optimizing Nitrogen Management with Arti@cial Intelligence\$ ». *Agricultural Systems*, 27.
- Llamas, M-R., et P. Martínez-Santos. 2005. « Intensive Groundwater Use: Silent Revolution and Potential Source of Social Conflicts ». *Journal of Water Resources Planning and Management* 131 (5): 337-41. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:5\(337\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:5(337)).
- Loubier, S., N. Aubry, F. Christin, E. Giry, P. Garin, et P-O. Malaterre. 2005. « How to deal with irrigation demand in a context of water scarcity and water uncertainty: an example of combining tools in the Charente river basin in France ». In, 10. Montpellier, France: UMR G-EAU, Cemagref.
- Louhichi, K., G. Fertil, et V. Alary. 2002. « Apport de la modélisation économique à l'analyse prospective et l'aide au pilotage des systèmes d'élevage laitiers à la Réunion ». *CIRAD-EMVT, Pôle Elevage*, 4.
- Margat, J. 1996. « Les ressources en eau. Manuel et Méthodes ». BRGM.
- MARH. 2007. « Stratégie Nationale D'adaptation de L'agriculture Tunisienne et Des Écosystèmes Aux Changements Climatiques ». Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques.
- Marlet, S. 2013. « Analyse de La Situation Des GDA, Objectifs et Approche Du PAP-AGIR ». Présenté à Atelier Programme d'Actions-Pilotes en Appui au GDA d'Irrigation (PAP-AGIR).
- Massuel, S., F. Amichi, F. Ameer, R. Calvez, Z. Jenhaoui, S. Bouarfa, M. Kuper, H. Habaieb, T. Hartani, et A. Hammani. 2017. « Considering Groundwater Use to Improve the Assessment of Groundwater Pumping for Irrigation in North Africa ». *Hydrogeology Journal* 25 (6): 1565-77. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1573-5>.
- Maton, L. 2006. « Représentation et simulation des pratiques culturales des agriculteurs à l'échelle régionale pour estimer la demande en eau d'irrigation : application à un bassin versant maïsicole du sud-ouest de la France... ». École doctorale : SEVAB, Spécialité : Fonctionnement des écosystèmes et agrosystèmes, Toulouse: Institut national polytechnique de Toulouse.
- Maton, L., D. Leenhardt, M. Goulard, et J-E. Bergez. 2005. « Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems ». *Agricultural Systems* 86 (3): 293-311.
- Mauline, M. 2012. « Utilisation d'une approche d'agriculture comparée pour l'évaluation d'un

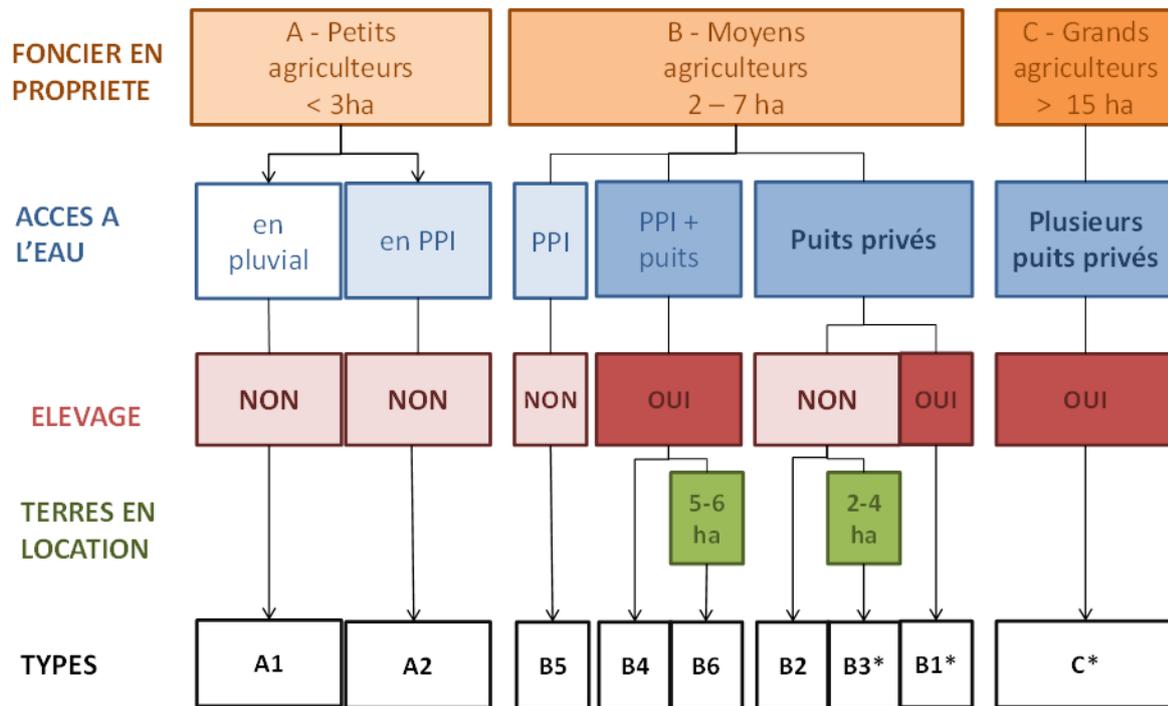
- territoire par Analyse de Cycle de Vie Application dans la plaine de Kairouan, Tunisie centrale ». Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme Ingénieur Spécialité : Agronomie.
- McCarl, B-A. 1982. « Cropping Activities in Agricultural Sector Models: A Methodological Proposal ». *American Journal of Agricultural Economics* 64 (4): 768. <https://doi.org/10.2307/1240588>.
- McCarl, B-A., et T-H. Spreen. 1997. *Applied mathematical programming using algebraic systems*. Texas Agricultural Experiment Station. College Station, Texas: Texas A&M University.
- Meyer-Aurich, A., et L. Trüggelmann. 2002. « Finding the Optimal Balance between Economical and Ecological Demands on Agriculture – Research Results and Model Calculations for a Bavarian Experimental Farm ». In. Australia.
- Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. 2007. « Rapport national sur l'état de l'environnement 2007 ».
- Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, Agence Nationale de Protection de l'Environnement, Observatoire Tunisien de l'Environnement et du Développement Durable, and Coopération Technique Allemande. 2008. « Gestion Durable Des Ressources En Eau ».
- Montginoul, M., et T. Rieu. 1996. « Instruments économiques et gestion de l'eau d'irrigation en France ». *La Houille Blanche*, n° 8 (décembre): 47-54. <https://doi.org/10.1051/lhb/1996087>.
- Montginoul, M., et J-D. Rinaudo. 2009. « Quels instruments pour gérer les prélèvements individuels en eau souterraine ? Le cas du Roussillon ». *Économie rurale* 310: 40-56. <https://doi.org/10.4000/economierurale.2149>.
- Morardet, S., G. Gleyses, et T. Rieu. 2001. « Instrument de régulation de la demande en eau des agriculteurs et politique agricole commune ». In, 01-01. Nice (FRA): CEMAGREF Working paper IRMO.
- Morardet, S., et M. Montginoul. s. d. « Mémoire de stage de Master 2ème Année », 67.
- Morardet, S., M. Montginoul, J. Burte, M. Favre, et A. Azizi. 2017. « Analyse des pratiques et stratégies des usagers de l'eau dans le bassin du Merguellil ». Rapport pour le projet AMETHYST. IRSTEA, CIRAD (UMR G-eau).
- Morardet, S., M. Montginoul, J. Burte, F. Molle, M. Favre, A. Azizi, et O. Tanouti. 2017. « Analyse des pratiques et stratégies des usagers de l'eau dans les bassins du Merguellil et du Tensift ». Projet ANR Amethyst, Livrable 2.6. Montpellier: UMR G-eau (Cirad, IRD, Irstea). Livrable26_AMETHYST.docx.
- Mouri, H., et S. Marlet. 2007. « De l'association d'intérêt collectif au groupement de développement agricole: le changement institutionnel et son impact sur le fonctionnement des périmètres publics irrigués tunisiens ». In, édité par S. Bouarfa, M. Kuper, et A. Debbarh, 1-8. Montpellier: Cirad. <http://hal.cirad.fr/cirad-00191058> http://hal.cirad.fr/docs/00/19/10/58/PDF/I-Mourri_et_Marlet.pdf.
- Mukherji, A. 2006. « Political ecology of groundwater: the contrasting case of water-abundant West Bengal and water-scarce Gujara ». *Hydrogeology Journal*, 2006.
- Mukherji, A., et T. Shah. 2006. « Groundwater Socio-Ecology and Governance: A Review of Institutions and Policies in Selected Countries ». *Hydrogeology Journal* 13 (1): 328-45. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0434-9>.
- OCDE. 2006. *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Recent Developments*. 4 vol. Environment & Sustainable Development.
- Osty, P-L. 1978. *L'exploitation agricole vue comme un système. Diffusion de l'innovation et contribution au développement*. Vol. 326.
- Ounalli, N., et M. Sghaier. 2009. « Contribution à l'optimisation de l'allocation des ressources

- en eau et en sol dans les systèmes de production du bassin versant de l'Oued Oum Zessar (Sud-est de la Tunisie) », n° 1: 31.
- Palacio, V., G. Guy, et S. Morardet. 1995. « Typologie d'exploitations et demande en eau d'irrigation ». In, 39-45. Ingénieries - EAT.
- Pantu, I. 1973. « Projet principal du programme tuniso-canadien de Kairouan ». In *Etude hydrogéologique de la plaine de Kairouan*. Kairouan.
- Paris, Q., et R-E. Howitt. 1998. « An Analysis of Ill-Posed Production Problems Using Maximum Entropy ». *American Journal of Agricultural Economics* 80 (1): 124-38. <https://doi.org/10.2307/3180275>.
- Perrot, C. 1990. « Typologie d'exploitations construite par agrégation autour de pôles définis à dire d'experts: Proposition méthodologique et premiers résultats obtenus en Haute-Marne ». *INRA Productions animales* 3 (1): 51-66.
- Perrot, C., et E. Landais. 1993. « Exploitations agricoles : pourquoi poursuivre la recherche sur les méthodes typologiques ? » *Cahiers de la Recherche Développement* 33: 13-23. http://cahiers-recherche-developpement.cirad.fr/revue/notice_fr.php?dk=396253
- Perrot, C., E. Landais, et P. Pierret. 1995. « L'analyse des trajectoires des exploitations agricoles. Une méthode pour actualiser les modèles typologiques et étudier l'évolution de l'agriculture locale ». *Économie rurale* 228 (1): 35-47. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1995.4744>.
- PNUE. 2007. « Soudan: Évaluation environnementale post-conflit ». Rapport de synthèse. Nairobi, Kenya: PNUE Editons.
- Postel, S. 1999. « Pillar of sand: Can the irrigation miracle last? », 1999.
- Poussin, J-C., A. Ben Mihoub, et R. Beji. 2007. « Usages agricoles de l'eau et valorisation dans la plaine de Kairouan, Tunisie centrale ». In *Troisième atelier régional du projet Sirma*, 12-p. Cirad. <https://hal.inria.fr/cirad-00260720/>.
- Poussin, J-C., A. Imache, R. Beji, P. Le Grusse, et A. Ben Mihoub. 2008. « Exploring regional irrigation water demand using typologies of farms and production units: An example from Tunisia ». *Agricultural Water Management* 95: 973-83.
- Poussin, J-C., J-C. Pouget, et R-L. D'hont. 2010. « ZonAgri: A Modeling Environment to Explore Agricultural Activities and Water Demands on a Regional Scale ». *Land Use Policy* 27 (2): 600-611. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.001>.
- Riaux, J. 2014. « Petites paysanneries hydrauliques en Tunisie Centrale. Héritages et perspectives autour des eaux du Merguellil ». <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01213346>.
- Rica, M., E. Lopez-Gunn, et R. Llamas. 2011. « Emergence and persistence of Groundwater User Collectives in Spain. Reflexions on the role of users on groundwater management ». Presentation at the Groundwater management conference, ICID, Orléans.
- Rinaudo, J-D., S. Bento, M. Varanda, L. Coreira, et M. Montginoul. 2011. « Envisioning Innovative Groundwater Management Policies through Scenario Workshops in France and Portugal ». In, 5. Orléans.
- Ross, A., et P. Martinez-Santos. 2010. « The Challenge of Groundwater Governance: Case Studies from Spain and Australia ». *Regional Environmental Change* 10 (4): 299-310. <https://doi.org/10.1007/s10113-009-0086-8>.
- SCET. 2014. « Gestion Des Ressources en Eau Souterraines Comme Bien Communs Cas Tunisien ». Tunisie: Agence Française de Développement.
- Schaible, G-D. 1997. « Water Conservation Policy Analysis: An Interregional, Multi-Output, Primal-Dual Optimization Approach ». *American Journal of Agricultural Economics* 79 (1): 163-77. <https://doi.org/10.2307/1243951>.

- Schlager, E. 2006. « Challenges of Governing Groundwater in U.S. Western States ». *Hydrogeology Journal* 14 (3): 350-60. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0012-1>.
- Sébastien, L. 2004. « Modélisation du comportement des agriculteurs: revue de littérature ». Rapport final BRGM/RP. France: INTEREG et BRGM.
- Shah, T. 2008. *Taming the Anarchy: Groundwater Governance in South Asia*. Routledge.
- Shah, T., S. Bhatt, R-K. Shah, et J. Talati. 2008. « Groundwater Governance through Electricity Supply Management: Assessing an Innovative Intervention in Gujarat, Western India ». *Agricultural Water Management* 95 (11): 1233-42. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.04.006>.
- Shah, T., A-D. Roy, A-S. Qureshi, et J. Wang. 2003. « Sustaining Asia's Groundwater Boom: An Overview of Issues and Evidence ». *Natural Resources Forum* 27 (2): 130-41. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.00048>.
- Smith, M. 1992. *A computer program for irrigation planning and management*. FAO Irrigation and Drainage Paper. Rome: FAO.
- Snoussi, M. 2013. « Evaluation des impacts environnementaux des principaux usages de l'eau au niveau d'un territoire de la GroundWater Economy (GWE) par la méthode de l'empreinte hydrique ». Msc Thesis. Institut National Agronomique de Tunisie.
- Souissi, I. 2014. « Resilience and adaptive capacity of mediterranean farming systems to climate change: application to the low valley of Medjerda-Tunisia ». Thèse de doctorat en sciences économiques, Montpellier: Université Montpellier I, Faculté des sciences économiques.
- Storm, H., T. Heckelei, et C. Heidecke. 2011. « Estimating Irrigation Water Demand in the Moroccan Drâa Valley Using Contingent Valuation ». *Journal of Environmental Management* 92 (10): 2803-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.027>.
- TICET (Tunis International Center for Environmental Technologies). 2009. « Institutional Framework and Decision Making Practices for Water Management in Tunisia ». Project Report of the CITET. Tunis.
- 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.
- Turner, B., et G-M. Perry. 1997. « Agriculture to Instream Water Transfers under Uncertain Water Availability: A Case Study of the Deschutes River, Oregon », 14.
- Varela-Ortega, C. 1998. « Water Pricing Policies, Public Decision Making and Farmers' Response: Implications for Water Policy ». *Agricultural Economics* 19 (1-2): 193-202. [https://doi.org/10.1016/S0169-5150\(98\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5150(98)00048-6).
- Von Neumann, J., et O. Morgenstern. 1944. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press. Princeton, USA.
- Weatherhead, E-K., et J-W. Knox. 2000. « Predicting and Mapping the Future Demand for Irrigation Water in England and Wales ». *Agricultural Water Management* 43 (2): 203-18. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00058-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00058-X).
- Wester, P., J. Hoogesteger, et L. Vincent. 2009. « Local IWRM organizations for groundwater regulation: The experiences of the Aquifer Management Councils (COTAS) in Guanajuato ». *Natural Resources Forum*, 2009.
- Zammouri, M., T. Siegfried, T. El-Fahem, S. Kriâa, et W. Kinzelbach. 2007. « Salinization of Groundwater in the Nefzawa Oases Region, Tunisia: Results of a Regional-Scale Hydrogeologic Approach ». *Hydrogeology Journal* 15 (7): 1357-75. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0185-x>.
- Zektser, I-S., et L-G. Everett. 2004. *Groundwater Resources of the World and Their Use*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris: UNESCO.

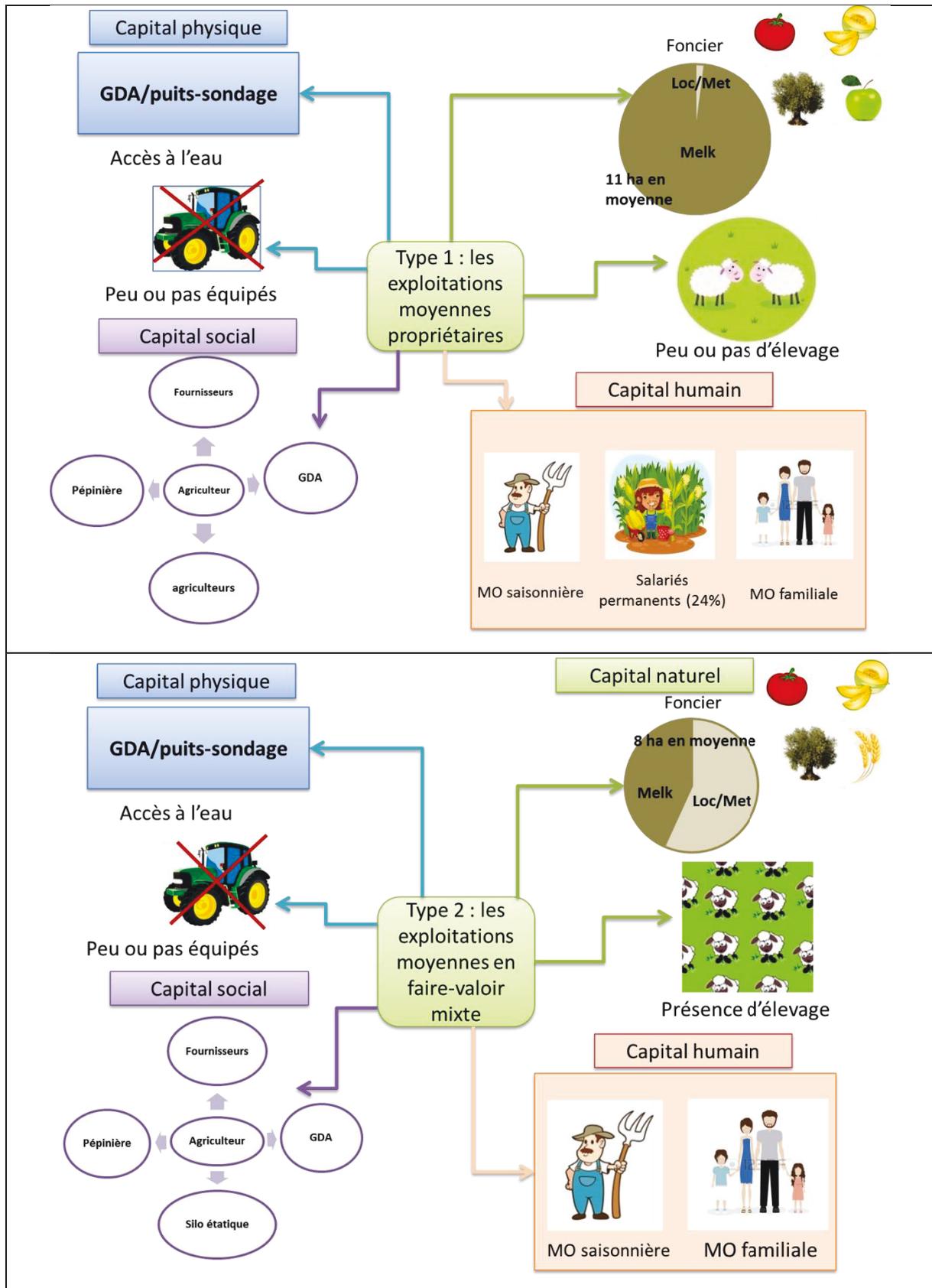
ANNEXES

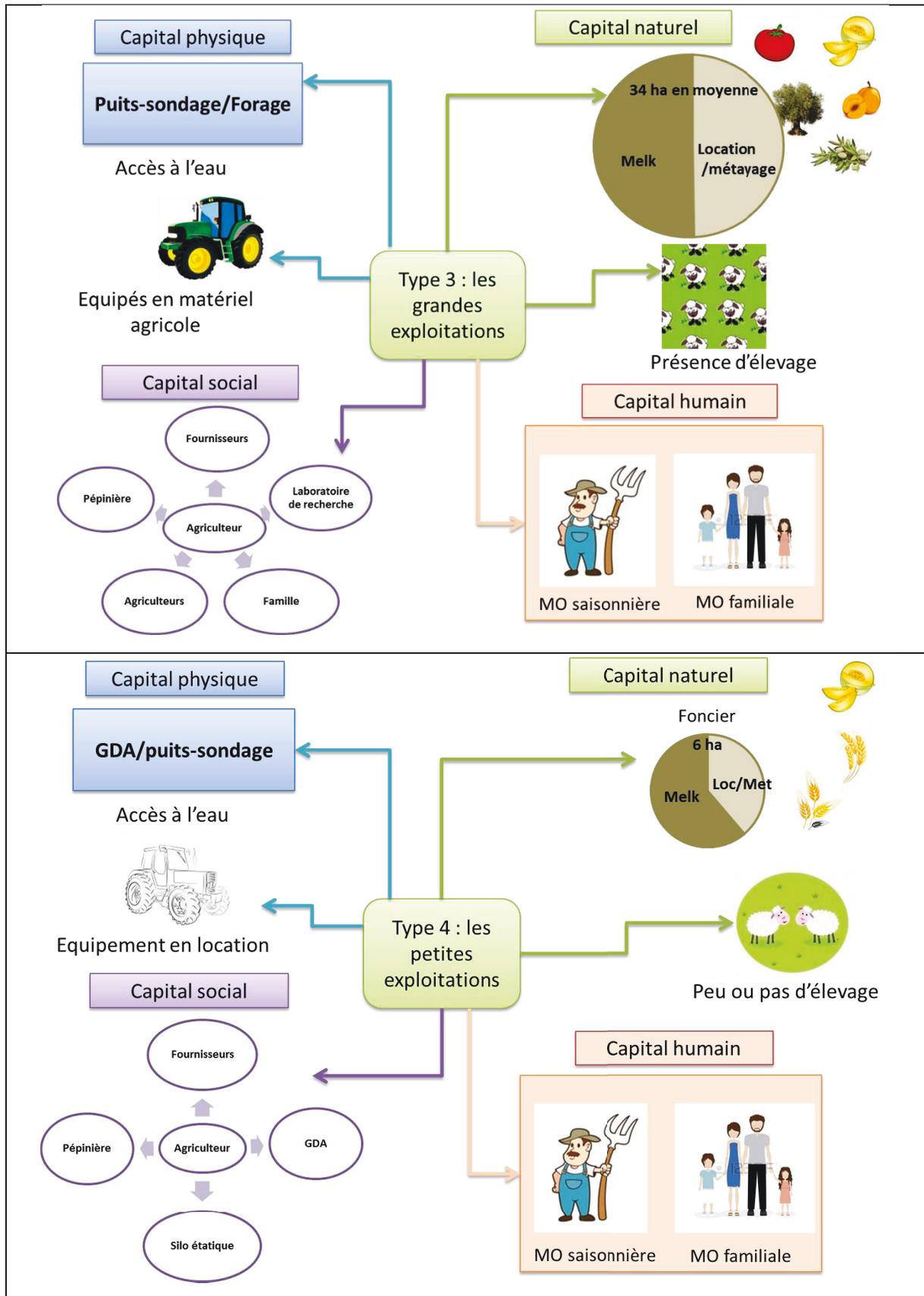
ANNEXE 1 : Typologie des exploitations à dire d'acteurs dans le secteur d'El Hammem (Braiki, 2013)



* Revenus non agricoles

ANNEXE 2 : Représentation schématique de la typologie des exploitations maraîchères sur les secteurs de Chebika et Ben Salem (Ghileb, 2014)





ANNEXE 3 : Grille d'analyse des cinq capitaux d'une exploitation agricole (Bouazizi, 2016)

Type du capital	Composantes	critères	Score			coefficient
			0	2	4	
Capital Naturel/20	Sol/10	Quantité (superficie)				1,2
		Qualité				
		Disponibilité				
	Eau/10	Quantité				1,2
		Qualité				
		Disponibilité				
Capital Physique/20	Fixe/10	Infrastructures (routes)				2
		Infrastructure énergétique -quantité				
		Qualité énergétique				
		Aménagements sol				
	Circulant/10	Cheptel				0,8
		Machines				
Capital Humain/20	Membres de l'exploitation/10	Niveau d'éducation				1,2
		Savoir-faire agricole				
		Transmission de l'exploitation				
	Main d'œuvre/10	Qualité				0,8
		Disponibilité				
Capital Financier/20	Fonds propres/10					0,4
	Sources de revenu/6					0,66
	Accès au crédit/4					1
Capital Socio-institutionnel/20	Engagement dans la vie associative (relation avec les autres agriculteurs)/10					0,4
	Relations avec les institutions privées et publiques)/10					0,4

ANNEXE 4 : Typologie des systèmes de production et systèmes techniques associés dans le secteur d'Abida (Mauline, 2012)

Système de production (SP)	SP1	SP2 :	SP3 :	SP4 :	SP5 :	SP6 :	SP7 :	SP8 :	SP9 :	SP10 :
	SMVDA	Capitaliste avec gérant	Capitaliste avec khames	Patron propriétaire foncier	Patron locataire	Propriétaire moyen « polyc.-élevage »	Petit propriétaire restreint (eau & foncier)	Locataire: fermier maraîcher	Petit propriétaire « Eleveur ovin »	« Eleveur ovin sans terre »
Nb EA enquêtées 30	0	4	1	3	1	7	9	2	2	1
Nb enquêtes complètes 13	0	3	1	1	0	3	3	0	1	1
% enq complètes		75	100	33	0	40	30	0	50	100
NB: le nombre élevé d'enquêtes en SP6 et 7 s'explique par les rencontres faites pendant les phases exploratoires du DA; ce sont les types les plus présents sur le terrain, et les plus représentés en effectif d'EA sur la zone (75% des EA au total)										
% de l'effectif des EA d'Abida	/	5		5	/	55	20	10		5
Gradient d'accès à l'eau"										
Systèmes de culture (SC)										
SC exclusivement arboricoles (avec maraîchage uniquement dans les premières années de la plantation)										
Olivier monoculture										
SC1 : Olivier monoculture; forte densité: 6*6; irrigué au goutte-à- goutte (i. gâg)	X	X								
SC1' : Olivier monoculture; forte densité : 3*6 ; sol sableux; i. gâg + fertilisation		X								
SC2 : Olivier monoculture; dens. moyenne Tous sols ; i. gâg			X	X		X				
SC2' : Olivier monoculture; dens. moyenne (i. gravitaire)			X			X			X	
Autres fruitiers monoculture	X									
SC3 : Agrumes monoculture; sol sableux; i. gâg		X		X						
SC4 : Pommiers monoculture; sol sableux; i. gâg				X						
SC5 : Pêcher monoculture; sol sableux i. gâg				X						
SC6 : Abricotier monoculture; sol sableux; i. gâg				X		X				
Association de fruitiers										
SC7: Olivier x Agrumes; sol sableux; i. gâg				X						
SC8: Olivier x Pommier; sol tous sols; i. gâg				X		X				

ANNEXES

SC9: Olivier x fruitiers;; i. gâg		X	X	X						
SC9: Olivier x fruitiers i. gravitaire						X				
SC cultures annuelles en sols argileux et argilo-limoneux										
<i>Rq: lorsque ces SC sont pratiqués dans des EA faisant de l'élevage, de la fève peut être cultivée après le piment de saison</i>										
<i>NB: cette année, c'est le melon qui était le plus présent dans la zone d'étude, mais il peut être remplacé par de la pastèque. Le piment et la tomate d'arrière saison (AS) sont interchangeables dans les successions. Variantes de ces SC: sans le piment de saison après cucurbitacée.</i>										
SC association céréales-maraîchage										
SC 10: Piment (Pi) //Blé//Pi//Orge						X				
SC 11: Melon (M) x Pi /BD/ Pi (AS)//Tomate (T)//jachère*						X				
SC 12: B//jachère// Pastèque(P) x Pi //Orge//jachère*// M x Pi				X		X				
SC 13: Orge//Orge/T (AS)// jachère//Orge//Orge/ Pi (AS)//jachère						X				
SC maraîchage	X									
SC 14: M x Pi // T ou M/Pi//T			X				X	X		
SC14':M//jachère//T ou T//jachère//T			X				X	X		
SC14'':MxPi//T saison/T arrière saison//jachère//			X							
SC15: MxPi/fève//jachère//P//T						X	X			
SC céréales/légumineuses										
SC 16 : BD//jachère*//Orge						X				
SC 17: BD//BT//Orge						X				
SC « agro-forestiers » en sols argileux et argilo-limoneux										
SC 18 : O x Pommier (Po) x Pi // O x Po						X				
SC 19 : O x SC 11, 14, 14', 15			X				X			
Systèmes d'élevage (SE)										
SE1: petit élevage ovin (5 à 50 mères)						X	(X)		X	X
SE2 : petit élevage bovin (1 à 3 mères)						X				
SE3: Grand élevage ovin en stabulation	X									
SE4: Elevage bovin en stabulation	X									

ANNEXE 5 : Identification et caractéristiques générales des PPI par secteur (CRDA Kairouan)

Délégation	Secteur	PPI	Type	Source	S_équipée	S_irriguée	bénéficiaires	% Exploitation	% Intensification	Arbo (ha)	Maraichage (ha)	Grande culture (ha)	Fourrage	Total	
Chebika	Chebika	Chebika Est	Irrigation	Forage profond	156	156	37	99	116	105	50	27	0	182	
		Chebika Ouest	Irrigation	Forage profond	195	195	59	100	108	175	20	17	0	212	
		Ajifre	Irrigation	Forage profond	38	38	13	92	110	23	12	7	0	42	
		Henchir Jefna	Irrigation	Forage profond	446	456	205	90	102	225	189	49	4	467	
	Ben Salem	Sidi Ali Ben Salem 2	Irrigation	Forage profond	202	202	18	79	103	80	80	45	5	210	
		Sidi Ali Ben Salem 3	Irrigation	Forage profond	165	175	23	97	133	100	70	54	10	234	
		El Wsif	Irrigation	Forage profond	32	35	6	80	94	4	5	22	2	33	
		El Mlalsa	Irrigation	Forage profond	100	100	62	99	154	35	64	45	10	154	
	Karma	El Houwereb 1	Irrigation	Barrage + Forage	792	792	180	26	30	120	35	85	3	243	
		El Houwereb 2	Irrigation	Barrage + Forage	747	747	180	41	42	225	12	77	7	321	
		El Houwereb 3	Irrigation	Barrage + Forage	706	706	180	64	68	308	25	145	3	481	
		El Karma1	Irrigation	Forage profond	80	87	40	100	134	52	35	20	10	117	
		El karma2	Irrigation	Forage profond	80	83	40	100	146	40	43	27	12	122	
		Hinchir el Borj	Irrigation	Forage profond	84	84	22	38	44	22	10	5	0	37	
		Chwarbia	Mixte	Forage profond	83	83	60	100	120	63	20	10	7	100	
		Al Moujahidin	Mixte	Forage profond	81	81	27	100	117	65	16	12	2	95	
	Hammad	Wled Nasr	Mixte	Forage profond	77	77	63	100	105	72	5	4	0	81	
		Thraa Afen	Irrigation	Forage profond	70	70	18	100	121	55	15	12	3	85	
		Al Mjabra	Irrigation	Forage profond	135	135	40	100	133	80	55	35	10	180	
		Sidi Ali Ben Salem 1	Irrigation	Forage profond	125	140	22	100	138	80	60	50	4	194	
	Abida	Hinchir Bouali	Irrigation	Forage profond	126	126	38	54	76	30	39	25	2	96	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Total					4520	4568	1333	61	80	1959	860	773	94	3686
	Haffouz	Houffia	Houffia Sud	Irrigation	Forage profond	53	53	32	84	88	2	43	2	0	47
		Ouled khalfalah	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Total					53	53	32	84.91	88.68	2	43	2	0

Source : Rapport annuel de la division de l'exploitation des périmètres irrigués, Campagne 2014-2015 (CRDA, 2015)

ANNEXE 6 : Entretien avec les agents du CRDA

Questions générales sur l'activité du CRDA

- Quelle sont les missions générales de l'arrondissement dont vous faites partie ?
- Quelle est la nature de vos interventions ?
- Possédez-vous les rapports annuels du CRDA les plus récents ?
- Combien d'exploitations en général dans la zone aval (Merguellil) ?
- Possédez-vous des données sur les exploitations concernant : Superficie totale ?
- Superficie agricole utile ? Superficie agricole cultivée ? Irriguée ? Sec ?

Questions sur les GDA irrigation

- Combien de PPI dans la zone ? Les ressources en eau ?
- Combien de GDA dans la zone (= ta zone de travail = Merguellil, 7 secteurs) ?
- Combien d'exploitations dans les PPI dans la zone aval (Merguellil) ?
- Possédez-vous des données sur ces exploitations concernant : Superficie totale ?
- Superficie agricole utile ? Superficie agricole cultivée ? Irriguée ? Sec ?
- Avez-vous une idée sur les superficies équipées avec les différents modes d'irrigation (gravitaire, aspersion, goutte à goutte) ?
- Répartition de ces exploitations par GDA (en précisant aussi le nombre d'adhérents)
- Pouvez-vous me décrire les relations entre le CRDA et les GDA concernant : la vente d'eau, la tarification et la facturation, la maintenance des équipements ?
- Prix de l'eau vendue aux GDA (variation selon les GDA)
- Volumes et montant des ventes d'eau du CRDA aux GDAs
- Prix de l'eau vendue par les GDA aux agriculteurs (variation selon le GDA)
- Qui fixe ce prix : le CRDA ou le GDA ?
- Sur quelle base facturez-vous la consommation des GDA (*sommation des consommations de chaque borne d'irrigation ou à l'entrée de chaque périmètre*) ?
- Sur quelle base sont facturés les agriculteurs ?
- Qui fait la facturation dans la pratique (CRDA ou GDA) ?
- Quel est le montant des dettes des GDA pour le compte du CRDA ?
- Quel est le taux moyen de recouvrement des dettes des GDA envers CRDA ?
- Est-ce que tous les GDA sont dans la même situation ou bien y a-t-il des différences entre eux ?
- Quels sont les grands types de GDA que vous distinguez ? Pour vous qu'est-ce qu'un GDA qui « fonctionne bien » ? Qu'est-ce qu'un GDA qui ne fonctionne pas bien ? Quels sont leurs problèmes ?
- Quelles sont les mesures que vous avez mis en place pour inciter les GDA à payer leurs dettes ?
- Avez-vous mis en place des mesures pour faciliter le fractionnement ou la diminution de ces dettes ?
- Est-ce que des mesures ont été mises en place pour inciter les agriculteurs à payer leurs factures ? si oui par qui (CRDA ou GDA) ?

- Est-ce que vous avez déjà coupé l'eau sur tout un périmètre? Si oui vous avez prévenu à l'avance les agriculteurs de cette coupure ?
- Pensez-vous que la situation des GDA qui ont des problèmes pourrait être améliorée? Comment ? Quelle serait votre contribution ?
- Quel degré d'autonomie pensez-vous que les GDA puissent avoir ?
- Quelles sont les organisations qui ont une influence sur les décisions d'irrigation des agriculteurs ? Et quelle est la manière d'influence ?
- Possédez-vous une base de données statistique sur les différents GDA : superficie, source d'eau, consommation d'eau, cultures, situation financière ... ?

Les actions du CRDA vis-à-vis des agriculteurs hors PPI

- Possédez-vous la liste des irrigants qui ne sont pas clients de GDA ?
- Quelle est la procédure normale d'installation d'un forage ou d'un puits ?
- Est-ce que vous avez fait un recensement des puits et des forages privés ? Si oui à quelle date ?
- Est-ce que vous pensez que les données du recensement sont fiables ?
- Que pensez-vous de leur évolution depuis ce recensement ?
- Quelles sont vos actions vis-à-vis des irrigants hors PPI ?
- Y a-t-il des campagnes de sensibilisation à la protection de la nappe ?
- Quels sont vos moyens pour contrôler les forages privés ?
- Autres actions ? (Conseil, etc.)

Relations entre eau potable et eau d'irrigation

- Est-ce que le CRDA intervient sur la gestion de l'eau potable ? comment ?
- Est-ce qu'il y a des GDA qui gère l'alimentation en potable ? des GDA mixtes ?
- Est-ce qu'il y a des endroits où il y a une interférence entre le pompage d'eau d'irrigation et l'eau potable ? Quelle est l'influence de ce dernier sur la disponibilité de l'eau d'irrigation ?

ANNEXE 7 : Entretien avec les agents du GDA

Données générales sur le GDA

- A quelle date a été créé le GDA ?
- Possédez-vous une carte de localisation du GDA ?
- Quelle est la superficie totale de ce GDA ? La superficie irriguée ? La superficie cultivée ?
- Quelles sont les cultures pratiquées en irrigué ? (Se servir éventuellement de la carte pour identifier différentes zones au sein du GDA)
- Combien y a-t-il d'agriculteurs bénéficiaires ? et adhérents ?
- De quelles informations disposez-vous sur ces exploitations ?
- Serait-il possible d'avoir la liste des bénéficiaires et des adhérents ? la base de données ?
- Quelle est la superficie minimale et maximale des exploitations dans ce GDA ?
- Quelle est la nature des équipements et du réseau d'irrigation ?
- Quel est le mode d'accès à l'eau d'irrigation (barrage, forage) ?
- Si forage, est-ce que qu'il est géré par le CRDA ou le GDA ?
- Quel est le volume d'eau acheté au CRDA ou le volume d'eau pompé (si forage géré par le GDA) ?
- Quel est le volume d'eau vendu aux agriculteurs ?
- Quel est le montant total des recettes et des dépenses annuelles du GDA ?
- Quels sont les principaux postes de dépenses et de recettes ?
- Est-ce que la situation financière est en équilibre ?

Fonctionnement interne du GDA

- Quelle est la composition du conseil d'administration du GDA ?
- Comment se fait la répartition des tâches au sein du CA ?
- Comment se fait, au quotidien, la relation entre le Directeur Technique et le CA ?

Relations GDA d'irrigation -CRDA

- Pouvez-vous me décrire vos relations avec le CRDA concernant : la vente d'eau, la tarification et la facturation, le suivi de la comptabilité, la maintenance des équipements ?
- Pour chaque aspect nommé : avec qui le GDA est en contact au niveau du CRDA ?
- Cette relation a-t-elle évolué ces dernières années ?
- Prix de l'eau vendue par le CRDA (si l'eau n'est pas vendue par le CRDA, prix de l'électricité ou montant des frais de pompage)
- Volumes et montant des ventes d'eau du CRDA au GDA (ou volume total pompé)
- Sur quelle base le CRDA facture-t-il la consommation du GDA (*sommation des consommations de chaque borne d'irrigation ou à l'entrée de chaque périmètre*) ?
- Est-ce que le prix de l'eau achetée au CRDA vous paraît adapté ?

- Avez-vous des dettes vis-à-vis du CRDA ? si oui quel en est le montant ? Quelle est l'évolution passée de cette dette ? Est-ce que le CRDA a mis en place des mesures pour vous inciter à payer votre dette ? Lesquelles ?
- Est-ce que le CRDA a mis en place des mesures pour faciliter le fractionnement ou la diminution de votre dette ?
- Est-ce que le CRDA a déjà coupé l'eau à l'ensemble du GDA ? Si oui quelles en ont été les conséquences ?
- Est-ce que vous avez d'autres difficultés de relations avec le CRDA ?
- Pensez-vous que la situation financière du GDA pourrait être améliorée ? Comment ?
- Quel degré d'autonomie par rapport au CRDA souhaiteriez-vous ?

Relations GDA d'irrigation - agriculteurs

- Comment est organisée la distribution de l'eau ? à la demande ou au tour d'eau ?
- Si tour d'eau, comment est organisé le tour d'eau ?
- Est-ce qu'il a toujours été organisé comme cela ? Sinon quand a-t-il été changé et pourquoi ?
- Est-ce que l'organisation du tour d'eau actuel est satisfaisante pour le GDA ? pour les agriculteurs ?
- Si la distribution est à la demande, quand est-ce que ce mode de distribution a été mis en place ? Pourquoi ?
- Est-ce ce mode de distribution est satisfaisant pour le GDA ? Pour les agriculteurs ?
- Prix de l'eau vendue par les GDA aux agriculteurs (variation selon le GDA)
- Qui fixe ce prix : le CRDA ou le GDA ?
- Quels sont les modes de tarification ?
- Qui a décidé de cette tarification ?
- Est-ce qu'elle vous paraît adaptée ?
- Les bornes d'irrigation sont-elles toutes équipées de compteur ? Sinon sur quelle base sont facturés les agriculteurs ?
- Qui fait la facturation dans la pratique (CRDA ou GDA) ?
- Comment vous estimez les quantités d'eau consommées en cas d'absence et /ou de panne de compteur ?
- Faites-vous un suivi des cultures installées pour chaque exploitation ?
- Quel est le rythme de facturation et de paiement ?
- Est-ce que les agriculteurs ont des dettes vis-à-vis du GDA ? Quel en est le montant ?
- Quel est le taux de recouvrement des dettes des agriculteurs envers le GDA ?
- Il y a-t-il une solution pour les échelonner ?
- Est-ce que des mesures ont été mises en place pour inciter les agriculteurs à payer leurs factures ? Si oui par qui (CRDA ou GDA) ?
- En cas de problème (panne dans le réseau, organisation des tours d'eau), est-ce que vous avez les moyens d'intervenir rapidement ? Sinon faites-vous appel au CRDA ?

- Est-ce qu'il arrive qu'il y ait un manque d'eau ? Si oui à quelle période ? Quelles sont les raisons du manque d'eau ?
- Comment gérez-vous cette pénurie ?

Lorsqu'il y a un conflit entre agriculteurs (vol d'eau, etc.), est-ce que le GDA intervient pour régler le problème ? Si oui comment ?

Relations GDA d'irrigation-autres acteurs

- Quels sont les autres acteurs ou organisations avec lesquels vous êtes en relation ?
- Pour chacun, quelle est la nature de ces relations ?
- Comment ces relations sont-elles évoluées ?
- Avez-vous des dettes auprès de ces organisations ?
- Si oui quel en est le montant ? Quelle est l'évolution passée de cette dette ?
- Si dette envers la STEG, est-ce que la STEG a déjà coupé l'électricité ? si oui quelles en ont été les conséquences ?
- Quels sont les principaux défis auxquels le GDA est confronté en ce moment ? Qui peut résoudre ces problèmes ? Si c'est le GDA, comment compte-t-il les résoudre ?
- Quel projet pour le futur pour le GDA ?
- Connaissez-vous les agriculteurs qui ne font pas partie des bénéficiaires du GDA ?

ANNEXE 8 : Entretien avec les agents de la CTV

Questions générales sur l'activité de la CTV

- Quelles sont les missions générales de la CTV? Quelle est la plus importante ?
- Quelle est la nature de vos interventions ?
- Quelle est l'échelle ou la limite géographique de votre intervention (CTV pour chaque secteur ou CTV qui englobe plusieurs secteurs) ?
- Possédez-vous une carte du territoire d'intervention de la CTV ?
- Combien d'exploitations dans votre territoire d'intervention ?
- Avec quelle part de ces exploitations êtes-vous en contact régulier ?
- De quelles informations disposez-vous sur ces exploitations ?
- Avez-vous une idée sur les superficies équipées avec les différents modes d'irrigation (gravitaire, aspersion, goutte à goutte) ?
- Quelles sont les cultures pratiquées en irrigué ? (Se servir éventuellement de la carte pour identifier différentes zones au sein de la CTV)

Relation CTV-CRDA d'irrigation

- Comment se fait la coordination avec le CRDA pour réaliser vos missions ?
- Comment se transmet l'information entre CTV et CRDA ? (Il y a-t-il des rapports mensuels ou périodiques) ? sur quels sujets porte cette communication ?
- Pour chaque type d'intervention nommé : avec qui la CTV est en contact au niveau du CRDA ?
- Cette relation a-t-elle évolué ces dernières années ?
- Quel degré d'autonomie avez-vous par rapport au CRDA pour organiser vos activités ?

Les actions de la CTV vis-à-vis des agriculteurs

- Sur quels thèmes portent les actions de vulgarisation que vous mettez en place ? en particulier faites-vous de la vulgarisation sur la conduite des irrigations ?
- Quelles formes prennent ces actions ?
- Est-ce qu'elles s'adressent à tous les agriculteurs ? sinon à quels types en particulier ?
- Faites-vous un suivi des assolements pour chaque exploitation ?
- Avez-vous une idée sur l'évolution des superficies en fonction des types de cultures pendant les 10 dernières années ?
- Est-ce que vous faites un suivi régulier de certaines exploitations sur d'autres aspects ? quel est le rythme de suivi ? quelles sont les exploitations concernées ?
- Avez-vous élaboré des fiches techniques pour les différentes cultures ? si oui, sur quelles bases les avez-vous élaborées ? (Enquêtes dans les exploitations, parcelles de démonstration, autres...) et en quelle année ? Serait-il possible d'avoir accès à ces fiches ?
- Pensez-vous que vous avez tous les moyens nécessaires pour faire la vulgarisation auprès des agriculteurs ?
- Est-ce que vous donnez aux agriculteurs des subventions ou des aides sous forme d'intrants (semences, produits phytosanitaires...) ? Si oui, quelle est la perception de

ces aides par les agriculteurs ? quelles ont été les conséquences concrètes pour les exploitations (superficie des cultures, rendements, etc.)?

- Selon vous quelles sont les organisations qui ont une influence sur les décisions d'irrigation des agriculteurs ? De quelle manière les influencent-elles ?

Relations CTV-GDA d'irrigation

- Quels sont les PPI du territoire ? Les ressources en eau ?
- Combien de GDA dans ce territoire ?
- Pouvez-vous me décrire les relations entre la CTV et les GDA concernant : la vente d'eau, la tarification et la facturation, la maintenance des équipements, la vulgarisation ?
- Qui fait la facturation dans la pratique (CRDA ou GDA ou CTV ou ensemble) ?
- Si vous intervenez dans la facturation, sur quelle base facturez-vous la consommation des agriculteurs (*somation des consommations des cultures installées ou sur la base des indications des compteurs s'ils existent*) ?
- Est-ce que des mesures ont été mises en place pour inciter les agriculteurs à payer leurs factures auprès des GDA ?
- Quelle serait votre contribution dans l'amélioration de la situation des GDA ?
- En cas de problème dans les GDA (panne dans le réseau, maintenance), est-ce que c'est votre rôle d'intervenir ? Est-ce que vous avez les moyens de le faire rapidement ?
- Lorsqu'il y a un conflit entre agriculteurs et GDA (coupure d'eau, refus de paiement.), est-ce que le CTV intervient pour régler le problème ? Si oui comment ?

Relations CTV – irrigants hors PPI

- Est-ce que vous avez fait un recensement des puits et des forages privés ? Si oui à quelle date ?
- Est-ce que vous pensez que les données du recensement sont fiables ?
- Que pensez-vous de leur évolution depuis ce recensement ?
- Quels sont vos moyens pour contrôler les forages privés ?
- Y a-t-il des campagnes de sensibilisation à la protection de la nappe ? pensez-vous qu'il y a une conscience collective des agriculteurs concernant le rabattement du niveau de la nappe et de la nécessité de préservation de cette ressource rare ?
- Possédez-vous une base de données statistiques sur les différents GDA appartenant à votre territoire d'action : superficie, source d'eau, consommation d'eau, cultures, situation financière ... ? Serait-il possible d'y avoir accès ?
- Possédez-vous une base de données sur les irrigants hors PPI (ou sur les puits et forages privés) ? serait-il possible d'y avoir accès ?

Défis et projets de la CTV

- Quels sont les principaux défis auxquels la CTV est confronté en ce moment ? Qui peut résoudre ces problèmes ? Si c'est la CTV, comment compte-t-elle les résoudre ?
- Quel projet futur pour la CTV ?

ANNEXE 9 : Entretien avec les agriculteurs

Ce guide d'entretien est destiné à être utilisé lors de la première prise de contact avec les agriculteurs qui feront l'objet de l'enquête détaillée

Présentation de l'exploitant :

- Nom/prénom ? âge ?
- Situation géographique (secteur, douar) ?
- Etes-vous propriétaire, locataire, métayer ou autre ?

Présentation de l'exploitation :

- Date d'installation sur cette exploitation ?
- Etiez-vous là avant l'aménagement du barrage ?
- Si oui que cultiviez-vous avant ?
- Avez-vous changé vos productions agricoles depuis cette date ? Si oui quel est le motif du changement de production ?
- Quelle est la superficie totale de l'exploitation ? Surface irriguée ?
- Production végétale principale ?
- Principaux changement des rotations depuis l'installation de l'exploitation ?
- Assolement pratiqué pour les campagnes 2014 et 2015 ?
- Quelle évolution future envisagez-vous pour les productions végétales ?
- Intégration de l'élevage ? Type d'élevage ? Effectif ?
- Depuis quand vous pratiquez cette activité d'élevage ? Quels sont les principaux changements intervenus dans l'élevage depuis (10 ans, votre installation, la construction du barrage)
- Quelle évolution de l'élevage envisagez-vous à l'avenir ? pensez Vous délaisser cette activité ou élargir le cheptel? Pourquoi ?
- Est-ce vous avez mis des terres en location ou métayage ? ou pris des terres en location ou métayage ?
- Pourquoi vous mettez votre terre en location ? Ou bien quelles sont les causes de sa prise en location ?
- Depuis quand vous le faites-vous ?
- Avez-vous signé un contrat de location ou est-ce un simple contrat oral ? sinon quelle procédure avez-vous utilisée ?
- Louez-vous au même propriétaire Chaque année? Si oui, pourquoi ?
- Comment vous choisissez les parcelles à louer ?
- Vous gardez les mêmes parcelles ou bien vous changez d'emplacement chaque année ?
- Employez-vous de la main d'œuvre familiale, temporaire ou permanente salariée ? Salaire ?
- Possédez-vous des matériels agricoles (tracteur, semoir, épandeur...) ? Sinon vous louez des voisins ou des sociétés de service agricole ?

- Comment vous vous approvisionnez en introns (pépinières, agro fournisseurs locaux ou dans d'autres régions, sociétés de service ou entreprises agricoles : agriculture contractuelle) ?
- Avez-vous signé un contrat de production avec des usines (exp : tomate piment...)?
- Y a-t-il une superficie minimale pour avoir un contrat avec ces usines ?
- Quelles sont les avances que vous avez pris de l'usine cette campagne ?
- Comment sont retenues les avances faites en nature et en espèce au moment du paiement
- Avez-vous des projets particuliers sur cette parcelle (autre point d'eau, plantations, vente, location) ?
- En cas de revenu exceptionnel, quel sera votre premier investissement (classer les réponses) :
- Achat de terres PPI autre motopompe cheptel camionnette ou tracteur

Accès à la ressource en eau

- Questions générales :

- Est-ce que vous êtes satisfait de ce projet d'aménagement ?
- Pourquoi vous êtes satisfait (non satisfait) ?
- Est-ce qu'il était meilleur / plus mauvais dans le passé ?
- Sinon avez-vous acheté ou loué à cause de l'aménagement ? Pourquoi ?
- Quels facteurs ont causés ce changement ?
- Quels sont les modes d'accès à l'eau dont vous disposez (aucun, puits, forage, PPI, émergence, retenu d'eau des oueds) ?
- Quelle est votre technique d'irrigation (aspersion, goutte à goutte...)?
- Cultivez-vous toute la surface dont vous disposez ? Pourquoi ?

- Les irrigants dans un PPI :

- Y a-t-il des problèmes d'accès à l'eau?
- Quel est le système de distribution ?
- Y a-t-il des problèmes de distribution ?
- Quel est le tarif de m³ d'eau ?
- Recevez-vous la quantité d'eau pour laquelle vous avez payé ?
- Avez-vous l'eau à la demande ? Les tours d'eau peuvent être une solution ? Sinon comment vous possédez ?
- Comment se sont organisés les tours d'eau ? Au moment de pointe comment ce fait les tours d'eau ?
- Comment vous répartissez l'eau sur la borne d'irrigation ?
- Chaque borne est-elle équipée par un compteur ?
- Est-ce qu'il y a des investissements spécifiques pour l'équipement d'irrigation ? Les locataires sont-ils les plus créateurs de ces investissements ?

- Vous arrivez à payer les redevances de l'eau de façon régulière ? sinon, comment vous possédez ?
- En cas d'un compteur en panne comment la facture de votre consommation d'eau est estimée ? La consommation estimée par GDA reflète toujours votre consommation réelle ?
- Vous arrivez à avoir les quantités nécessaires pour vos assolements ? Êtes-vous satisfait ? Sinon, pourquoi ? et comment vous avez fait pour garantir vos besoins ?
- Y a-t-il possibilité de s'arranger pour la distribution avec l'aigadier ou avec les voisins ?
- Avez-vous un puits privé sur le PPI ?
- Projetez-vous de faire un puits sur votre terre dans les 5 prochaines années ? pourquoi ?
- Commentaire libre sur le PPI (qualité de l'eau, type de sols, organisation, prix, etc.) ?
- Craignez-vous l'administration ?
- Irrigants possédant un puits ou un forage privé
 - Type de l'ouvrage (puits ou forage) ?
 - Profondeur (puits + sondages) ?
 - Date de construction ?
 - Energie : électricité ou gasoil ?
 - Partagez-vous ce puits ? Selon quelles modalités ?
 - Avez-vous du approfondir ? Quand et pourquoi ?
 - Prix de l'ouvrage (puits + sondage)
 - Origine des fonds (subvention, prêt, revenu agricole, crédit, revenu extra-agricole, aide familiale)?
 - 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) ?
 - Surface irriguée par le puits ou forage ?
 - Coût du pompage journalier (+ durée du pompage approximative) en été et en hiver ?
 - Avez-vous diminué les prélèvements en eau de ce puits ? Pourquoi ? Si oui, avez-vous : diminué la surface irriguée à partir du puits, changé de culture, changé de système d'irrigation ?
 - Avez-vous augmenté les prélèvements en eau de ce puits ? Pourquoi ?
 - Si oui, comment avez-vous fait (changement de pompe, autre sondage, changement de moteur, etc.) ?
- Perception des agriculteurs 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 ?

- 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).
- Qu'allez-vous faire si la ressource diminue encore (allez-vous continuer à approfondir ?)
- Comment peut-on empêcher l'eau de diminuer ?
- Connaissez-vous des gens dans la région qui ont dû abandonner leur puits ?
- Pourquoi ?
- Le prix des cultures a baissé avec l'ouverture des marchés. Dans cette situation, que faites-vous ? (J'intensifie l'irrigation, j'arrête l'irrigation, je loue mon puits, je passe au goutte à goutte, j'électrifie mon puits, etc.
- Irrigants possédant des motopompes de surface :
 - Lieu de l'installation ? Date de l'installation ?
 - Caractéristiques de la motopompe (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 ?
- Si l'agriculteur n'irrigue pas :
 - Pourquoi n'irriguez-vous pas ?
 - Avez-vous déjà irrigué ?
 - Si oui, date de l'arrêt et causes ?
 - Avez-vous déjà abandonné un puits ? Pourquoi ?

ANNEXE 10 : Enquête préliminaire auprès des agriculteurs de la plaine de Kairouan



cirad
LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT



APPENDIX B République Tunisienne	APPENDIX A « Typologie des agriculteurs »	Enquête préliminaire « Typologie des agriculteurs de la plaine de Kairouan »	CIRAD : centre International De Recherche Agronomique Pour Le Développement
APPENDIX C Mini			

APPENDIX E	N° Questionnaire:
APPENDIX F	Date :
APPENDIX G	Durée de l'entretien :
APPENDIX H	Gouvernorat :
APPENDIX I	Délégation :
APPENDIX J	Secteur :

I. Identification de l'exploitant

1. Nom et prénom du chef d'exploitation ?
2. Origine (secteur)?.....
3. Age ?.....
4. Niveau d'instruction : analphabète primaire secondaire supérieure
5. Formation agricole : Oui Non
6. Avez-vous une autre activité (chantier tapis, commerce, fonctionnaire) ?
 Oui Non

II. Identification de l'exploitation

7. Plan de la ferme

NB :

Préciser :

- La superficie totale de l'exploitation.
- Les limites de chaque parcelle.
- La superficie de chaque parcelle.
- Le mode de faire valoir de chaque parcelle (héritier, propriétaire, locataire, métayer...).
- En cas de propriété privée : mentionnez quel est le prix d'achat, depuis quand utilisez-vous la parcelle, avoir ou non un titre de propriété).

ANNEXES

- Pour les parcelles en location préciser : les causes de prise ou mise en location ou association, les modalités de location (location de campagne ou de longue durée), prix de location, exigences recherchées), Vous gardez les mêmes parcelles ou bien vous changez d'emplacement chaque année ?
- Les cultures installées dans chaque parcelle : assolement (Causes d'orientation vers ces cultures).
- Nature des sols.
- Les parcelles cultivées en irrigué et celles cultivées en pluvial (causes de cultiver en sec ou date et cause d'arrêt de l'irrigation).
- Mode d'accès à l'eau pour chaque parcelle (PPI, forage, oued, émergence, aucun).
- Position par rapport forage du PPI.
- Présence ou pas des forages dans des parcelles appartenant au PPI.
- Les positions de(s) forages privés et des captages de surface s'ils existent.
- Mode d'accès à ces forages (individuel ou partagé).
- Préciser si vous captez directement de l'oued ou l'émergence.
- Les techniques d'irrigation pour chaque parcelle (irrigation de surface, irrigation de surface améliorée, aspersion, goutte à goutte).
- Plan d'installation d'irrigation (préciser le débit à l'entrée de chaque parcelle ou ligne)

Remarques supplémentaires :

III. Evolution historique de l'exploitation

8. Décrire l'évolution de votre exploitation depuis votre installation

	1960	1970	1980	1990	2000	2010	→
Principaux Changements							
Superficie totale							
Location des terres							
Cultures pratiquées							
Elevage							
Mode d'accès à l'eau							
Technique d'irrigation							
Equipement d'irrigation et matériels agricoles							
Main d'œuvre							
Facteurs de ces changements							

IV. Système de production

- Système de culture

9. Quelles sont les cultures installées durant les campagnes 2015 et 2016 (préciser aussi les cultures pérennes et les cultures en association) ?

N°Parcelle	Hiver 2015	Eté 2015	Hiver 2016	Eté 2016

- Commercialisation

10. Quelles sont les destinations de vos produits en 2015?

Parcelles	Produits	Autoconsommation	Consommation intermédiaire	Vente dans le marché			
				Marché hebdomadaire	Marché du gros à Tunis	Vente sur la parcelle	Usine de transformation

11. Est-ce que vous avez des problèmes de commercialisation de vos produits ?.....

- Système d'irrigation

ANNEXES

12. Avez-vous accès à l'eau à la demande ? oui non
13. Sinon, est ce que vous appliquez des tours d'eau ? oui non
14. Comment sont organisés les tours d'eau ? Par heure Par jours Autre
Préciser?
15. Au moment de pointe comment se font les tours d'eau ?.....
16. Si les tours d'eau sont prolongés, comment vous procédez pour irriguer votre parcelle ?
17. Y a-t-il des problèmes de distribution?.....
18. Si vous avez un forage, est-il autorisé ? Oui Non
19. Si non, pourquoi ?
20. Fiche du forage, puits, captage, oued

Type	Date de création	Profondeur (m)	Energie (électrique ou gasoil)	Emplacement (GPS)	Coût	Subventionné (oui/non)	Superficie irriguée par cet ouvrage

21. Si le forage est partagé, selon quelles modalités ?.....
22. Aviez-vous dans le passé des forages que vous avez abandonné ? Oui Non
23. Si oui, Préciser le nombre ?.....
24. Pourquoi vous l'avez abandonné?.....
25. Que pensez-vous de votre système d'irrigation (réseau d'irrigation, système de pompage, qualité de l'eau.....)?.....

Avantages	Inconvénients

26. Auriez-vous les capacités de renouveler les équipements de pompage ?.....

- Système d'élevage

27. Type d'élevage ?

Type	Bovins	Ovins	Caprins	Volailles	Equidés
Nombre de têtes femelles					
Nombre de têtes mâles					

28. Est-ce-que vous jugez rentables les activités d'élevage sur votre exploitation ?.....
29. Les fourrages sont-ils : auto produits Achetés

ANNEXES

30. L'alimentation des cheptels est-elle assurée par :

- Fourrages cultivés et distribués Pâturage des parcelles de l'exploitation
 Transhumance (parcours) Autre Précisez.....

31. Est-ce que vous donnez des animaux en pension ? Oui Non

32. Est-ce que vous prenez des animaux en pension ? Oui Non

33. Produit d'élevage

Produit animal	Vente	Autoconsommation	Consommation intermédiaire	Epargne

Production laitière

Type	Production moyenne par vache présente	Production par vache en pic de lactation	Quantité autoconsommée/j	Quantité vendue/j
Quantité moyenne en (l/j)				

34. Quel est votre mode de commercialisation du lait?.....

Clé: Vente directe aux consommateurs Vente à des colporteurs Vente à un centre de collecte

- Equipements

35. Est-ce que vous possédez des matériels agricoles ? Lesquels ?

36. Avez-vous des bâtiments et des équipements (machine à traite...) d'élevage ? Pour quels types d'animaux ? Nombre ?.....

- Main d'œuvre

37. Main d'œuvre familiale

Personnes	Age	Sexe	Travail sur exploitation (oui/non)	Travail lucratif à l'extérieur de l'exploitation	
				Permanent	Temporaire (spécifier nombre des jrs/mois ou le nombre de mois /an)

38. Nombre des membres de la famille qui contribuent à l'activité agricole (temps plein ou partiel) ?.....

39. Employez-vous de la main d'œuvre salariée ? Permanente ou saisonnière ?.....

40. Combien vous avez de salariés permanents ?.....

- Financement

41. Les revenus de la famille (y compris le revenu agricole) arrivent-ils à satisfaire les besoins de la famille ?.....
42. Le revenu agricole seul, peut-il satisfaire les besoins de la famille ?.....
43. Est-ce que vous arrivez à épargner ?
44. Sous quelle forme ?.....
45. Est-ce que vous empruntez ?

- Perceptions diverses

46. Quelles sont les principales contraintes qui entravent le fonctionnement de votre exploitation ?.....
47. Avez-vous des projets particuliers sur votre exploitation ?.....
Clé : Autre point d'eau *Plantations* *Vente* *Location*
48. Comment vous jugez l'évolution de la dynamique agricole dans la région ?
49. Est-ce que la ressource en eau est suffisante pour accompagner cette dynamique agricole ?.....
50. Sinon, avez-vous des propositions ?

ANNEXE 11 : Enquête technico-économiques « Usage-Ressource » auprès des agriculteurs de la plaine de Kairouan



APPENDIX A	République Tunisienne	Enquête technico-économique « Usage- Ressource » International	CIRAD: Centre
APPENDIX B	Ministère De L'agriculture	auprès des agriculteurs de la plaine de Kairouan Agronomique	De Recherche
APPENDIX D N° Questionnaire :			
APPENDIX E Nom du chef de l'exploitation :			
APPENDIX F Secteur :			

I. Occupation du sol :

NB :

- Indiquer dans le tableau la durée d'occupation du sol pour chaque culture et les dates de chaque pratique culturale de la préparation du sol jusqu'à la récolte (labour, semis, binage, fertilisation, fertigation, récolte...)
- Indiquer aussi les types et les quantités d'intrants appliqués.
- Préciser les cultures en association, les cultures intercalaires (différencier entre les pratiques communes et les pratiques spécifiques à chaque culture)
- Indiquer pour les cultures pérennes la date d'installation, l'âge des plantations, les phases de production (début de production, pic de production, fin de production), les périodes de récolte,
- Les cultures qui ont des dates d'installation, de récolte différentes ou des techniques culturales différentes sont considérées chacune comme une culture différente (de saison, arrière-saison, précoce, intensive, extensive, sous tunnel...)
- Indiquer le besoin en main d'œuvre pour chaque culture et chaque pratique culturale (précisez si vous avez recruté de la MO occasionnelle)

ANNEXES

1. Calendrier culturel

Culture	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Août

II. Rotation culturale :

2. Rotations culturales appliquées depuis la campagne agricole 2011/2012

Parcelles	Hiver 2011/2012	Eté 2012	Hiver 2012/ 2013	Eté 2013	Hiver 2013/2014	Eté 2014

3. Type de rotation : Monoculture biennale triennale quadriennale

III. Calendrier de disponibilité en MO :

4. Indiquer le nombre de jours pour chaque mois ainsi que le nombre d'heures moyen du travail dans l'exploitation pour chaque type de personnes.

ANNEXES

Personnes	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Août
Main d'œuvre familiale												
Salariés permanents												

5. Salaire

Salarié permanent	Type d'activité	Salaire en DT/mois

IV. Irrigation :

- Calendrier d'irrigation (utiliser les couleurs ou des lignes différentes pour distinguer les cultures, préciser la durée entre deux irrigations et le temps d'irrigation)

ANNEXES

Cultures	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Août

ANNEXES

7. Quelles sont les sources d'eau utilisées pour l'irrigation ?

Source d'eau	Date de début d'exploitation	Profondeur initiale	Profondeur actuelle	Salinité (g/l)	Diamètre	Niveau statique	Nature de l'entretien	Coût d'entretien	Rythme d'entretien (fréquence) (*)
Forage									
Puits / Sondage									
Emergence									
Oued									
Autre									

(*) Indiquez si l'entretien se fait avec un rythme Périodique (spécifier la période : mois, jours ?), annuel ou pluriannuel.

8. Dispositif de pompage?

- Pompe

Pompe	Critère de choix	Type de la pompe (immergée ou non)	Energie utilisée (*)	Puissance ²⁵	Débit théorique ²⁶	Débit réel ²⁷	Rendement ²⁸	Nombre de pouce ²⁹	Date d'achat	Prix d'achat	Nature de l'entretien	Coût d'entretien	Rythme d'entretien (fréquence)	Coût unitaire d'énergie (**)	Consommation annuelle (***)	Fournisseur

(*) Prix de KWh ou litre de diesel

(**) Si c'est électrique, spécifier si la pompe est monophasique ou tri-phasique

(***) Nombre de KWh ou litres consommés dans l'année (vérifier avec les factures si possible) ou montant total annuel de la facture.

²⁵ Puissance hydraulique (ou réelle) C'est la puissance fournie par le fluide en sortie (ou la puissance fournie par le moteur en entrée pour produire la différence de pression réelle). La puissance hydraulique se note Ph, et s'exprime en W. Ph= débit volumique* ΔPr

²⁶ C'est le volume de fluide déplacé théoriquement par unité de temps. Le débit volumique théorique se note DV, th et s'exprime en m³ / s.

²⁷ C'est le volume de fluide déplacé réellement par unité de temps. Le débit volumique réel se note D V, r et s'exprime en m³ / s.

²⁸ C'est le rapport entre le débit réel et le débit théorique. Le rendement volumétrique se note η_v et s'exprime sans unité. Il est toujours inférieur à 1 en raison des fuites et de la compressibilité du fluide.

²⁹ C'est un indice qui caractérise la pompe et reflète le diamètre intérieur du forage (1 pouce = 25,4 mm) : si la pompe est de 3 pouces le diamètre intérieur du forage allant de 80 mm à 104mm, si elle est de 4 pouces, elle est désignée pour un diamètre foré égale à 160 mm et si la pompe est de 6 pouces, le diamètre du forage sera 200 mm

❖ **Pour les agriculteurs ayant des parcelles dans un PPI :**

9. Quel est le tarif du m³ d'eau vendu par le GDA ?.....
10. Recevez-vous la quantité d'eau pour laquelle vous avez payé ? Oui Non
11. Avez-vous eu des interruptions accidentelles de l'irrigation dans les 3 dernières années? Oui Non
12. Si oui quelle en était la cause ?.....
13. Combien de temps cela a-t-il duré ?.....
14. Quelles ont été les conséquences pour la culture ? Et pour l'exploitation ?.....
15. La disponibilité de l'eau dans le GDA, la durée des tours d'eau et l'état du réseau peuvent-ils orienter vos choix cultureux ? Expliquez ?.....
16. Combien d'agriculteurs sont connectés sur votre borne d'irrigation ?
17. Comment vous répartissez l'eau sur la borne d'irrigation ?.....
18. Arrivez-vous à avoir les quantités d'eau nécessaires pour vos cultures ? Oui Non
19. Sinon, pourquoi ? Et comment faites-vous pour garantir vos besoins ?
20. Y a-t-il possibilité de s'arranger pour la distribution d'eau avec le pompiste ou avec les voisins ? Oui Non
21. Si oui, comment se font ces arrangements ?.....

Clé : Diminuer la surface irriguée Changer de culture Changer de système d'irrigation Autre Préciser....

22. Chaque borne est-elle équipée d'un compteur ? Oui Non
23. Possédez-vous votre propre compteur ? Oui Non
24. Sinon, comment la facture de votre consommation d'eau est-elle estimée?.....

Clé : Par heure d'irrigation Par nature de culture Par jour

25. La consommation estimée par le GDA reflète-t-elle toujours votre consommation réelle ?
26. Arrivez-vous à payer les factures d'eau de façon régulière ? Oui Non
27. Sinon, comment procédez-vous ?
28. Si vous avez un puits ou forage privé dans le PPI, pourquoi l'avez-vous installé ?
29. Avez-vous utilisé votre (ou vos) puits ou forage (s) pour vendre de l'eau à vos voisins ? Oui Non

Clé : S'il y a plusieurs puits ou forages, indiquez lesquels sont concernés par la vente d'eau

30. Si oui, quels sont les types d'agriculteurs qui achètent cette eau ?.....

Clé : Des agriculteurs qui n'ont pas payé leurs redevances d'eau Des agriculteurs hors PPI Des agriculteurs qui irriguent dans le PPI mais pour lesquels les quantités fournies par les GDA ne suffisent pas pour irriguer leurs parcelles

31. Projetez-vous de faire un puits ou forage sur vos parcelles dans le PPI dans les 5 prochaines années ? Oui Non
32. Pourquoi ?
33. Craignez-vous l'administration ? Oui Non
34. Si oui, pourquoi ?.....

35. Commentaire libre sur le PPI (qualité de l'eau, type de sols, organisation, prix...)?.....

.....

36. Avez-vous des parcelles hors PPI irriguées par l'eau du GDA ? Oui Non

37. Si oui, comment procédez-vous pour avoir accès à l'eau ?.....

38. Comment procédez-vous pour avoir accès à l'eau du GDA ?.....

Clé : Contrat écrit avec GDA Contrat verbal avec GDA Branchement illicites

39. Achetez-vous l'eau du GDA au même prix que pour les parcelles dans le PPI ?
Oui Non

40. Sinon à combien ?.....

41. Technique de distribution ?.....

42. Si le GDA cesse de vous donner l'eau, comment allez-vous procéder ?.....

❖ **Pour les agriculteurs qui ont des forages ou puits privés hors PPI:**

43. Si vous avez des forages privés, quel est l'origine du financement ?.....

Clé : Subvention prêt revenu agricole crédit revenu extra-agricole aide familiale

44. En cas de subvention, quels sont les organismes de financement ?

45. Y a-t-il des conditions pour octroyer ces subventions ?.....

46. Qui a fait l'étude ? CRDA Bureau d'étude privé Pas d'étude préalable

47. Qui a fait l'installation du forage ?

Clé: Foreur privé équipements personnels

48. Pourquoi avez-vous décidé d'installer le puits ou le forage ?.....

Clé : Projet futur (Anticipation du marché) Opportunité de vente d'eau Situation des voisins autre ?.....

49. Si vous avez un objectif de vente d'eau, quels sont les types d'agriculteurs qui achètent cette eau ?.....

Clé : Des agriculteurs qui n'ont pas payé leurs redevances d'eau Des agriculteurs hors PPI Des agriculteurs qui irriguent dans le PPI mais pour lesquels les quantités fournis par les GDA ne suffisent pas pour irriguer leurs parcelles

50. Comment avez-vous choisi l'emplacement du puits ou forage ?.....

51. Le niveau de l'eau a-t-il varié depuis la construction ? Oui Non

52. De combien ?.....

53. Avez-vous dû approfondir ? Oui Non

54. Quand et pourquoi ?.....

55. Quel est le rythme général de ces approfondissements ? Annuel Pluriannuel
Préciser ?.....

56. Quel est le coût moyen de l'approfondissement du forage?.....

57. Avez-vous dépassé la profondeur autorisée ? Oui Non

58. Si oui, comment allez-vous procéder lors du contrôle du CRDA ?.....

59. Le niveau ou le débit change-t-il quand les voisins pompent ? Oui Non

60. De combien ?.....

61. Le compteur de votre consommation électrique pour l'irrigation est-il séparé de celui pour la consommation familiale ? Oui Non

62. Si non, quelle est votre consommation électrique familiale moyenne?.....

63. Avez-vous diminué ou augmenté depuis l'installation les prélèvements en eau de votre puits ou forage ? Oui Non

64. Pourquoi ?

65. Si oui, comment vous avez fait ?.....

Clé : Diminué la surface irriguée à partir du puits Changé de culture Changé de système d'irrigation Changer la pompe Autre sondage Changement du moteur

❖ **Pour les agriculteurs qui ont accès à la ressource par captages dans les oueds ou l'émergence:**

- 66. D'où vient l'eau que vous captez ?.....
- 67. Est-ce que vous pouvez satisfaire les besoins en eau de vos cultures à tout moment (ou durant toutes l'année) ?.....
- 68. Si vous captez directement dans l'oued ou l'émergence, avez-vous diminué ou augmenté vos prélèvements ces dernières années ?.....
- 69. Pourquoi ?
- 70. Si oui, comment avez-vous fait ?.....

Clé : Diminué la surface irriguée à partir du captage des oueds Changé de culture Changé de système d'irrigation Changer la motopompe

71. Commentaire général sur l'irrigation privée?.....

.....

.....

.....

.....

.....

V. Perceptions par les irrigants de la rareté de la ressource en eau

- 72. D'où vient l'eau que vous pompez?.....
- 73. Les voisins captent-ils la même eau ? Oui Non
- 74. La ressource a-t-elle changé ? Oui Non Pourquoi ?.....
- 75. Connaissez-vous des gens dans la région qui ont dû abandonner leurs puits ? Oui Non
- 76. Pourquoi ?.....
- 77. Mise en situation en cas de changement (scénario)

Scénario	Dans cette situation, que faites-vous ?
*La nappe a beaucoup baissé, il faut approfondir encore les forages des GDA ou faire des nouveaux forages à bras ce qui augmente le coût de pompage (coût de l'énergie et du matériel investi), donc le GDA augmente considérablement le prix de l'eau.	*..... <i>Clé: J'arrête l'irrigation <input type="checkbox"/> Je passe au goutte à goutte <input type="checkbox"/> Je m'oriente vers des cultures moins consommatrices en eau (citer des exemples) <input type="checkbox"/> Je continue à utiliser la ressource comme d'habitude <input type="checkbox"/> J'investis dans un puits ou forage <input type="checkbox"/></i>
*L'Etat a déclaré votre zone une zone de sauvegarde, vous ne pouvez pomper qu'à une profondeur inférieure à 50 m. Dans ce cas les quantités d'eau disponibles vont diminuer, et le GDA ne peut pas répondre aux besoins de tous les agriculteurs.	*..... <i>Clé: Je cultive à sec <input type="checkbox"/> Je loue ma terre <input type="checkbox"/> Je vends ma terre <input type="checkbox"/> J'achète de l'eau des voisins qui ont des forages <input type="checkbox"/> Je ne respecte pas les règles et j'investis dans des forages profonds <input type="checkbox"/></i>

*Les prix des cultures de la pastèque, du melon, de la tomate, du piment ont baissé avec l'ouverture des marchés	*.....
*La STEG a décidé d'augmenter le tarif d'électricité	Clé: De combien cela a baissé ?..... Continuer à cultiver ces cultures <input type="checkbox"/> S'orienter vers d'autres cultures dont la valeur ajoutée est plus importante (citer des exemples) <input type="checkbox"/>
*Qu'allez-vous faire si la ressource diminue encore ?	*..... Clé: Diminuer les quantités d'eau consommées <input type="checkbox"/> Installer un forage privé avec gasoil <input type="checkbox"/> S'orienter vers l'irrigation photovoltaïque <input type="checkbox"/> S'orienter vers des cultures moins consommatrices en eau <input type="checkbox"/> Cultiver à sec <input type="checkbox"/>
	*..... Clé: Je continue à approfondir <input type="checkbox"/> J'arrête l'irrigation <input type="checkbox"/> Je loue mon puits <input type="checkbox"/> Je passe au goutte à goutte <input type="checkbox"/> J'électrifie mon puits <input type="checkbox"/> Je change la pompe et le moteur, et le coût du pompage augmente (plus de gasoil consommé, plus d'électricité, plus du matériel investi) <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/> préciser.....

78. Comment selon vous, peut-on empêcher l'eau de diminuer ?.....

VI. Elevage

79. Bilan annuel du cheptel (2015)

ANNEXES

	Bovins	Ovins	Caprins	Volailles	Equidés
Effectif initial : stocks Nombre de têtes femelles Nombre de têtes mâles Nombre des petits (moins d'un an)					
Nombre acheté Nombre de têtes femelles Nombre de têtes mâles Nombre des petits (moins d'un an)					
Montant des achats (DT)					
Animaux réformés (préciser pour chaque animal la date de réforme)					
Nombre vendu (préciser date et le prix de vente pour chaque animal)					
Montant des ventes (DT)					
Mortalité (préciser la date)					
Effectif final : Nombre de têtes femelles Nombre de têtes mâles Nombre des petits (moins d'un an)					

80. Est-ce que 2015, était une année normale pour l'élevage (nombre d'animaux acheté et vendus, période de vente, prix de vente...) ?.....
81. Si vous prenez des animaux en pension, combien ?.....
82. Pour quelle raison ?.....
83. Pendant combien de temps (préciser la période) ?.....
84. Combien êtes-vous payé en tout ?.....
85. Quand se fait le paiement ?.....
86. Est-ce vous bénéficiez du fumier associé aux échanges des animaux ?.....
87. A qui appartiennent-ils ?.....
88. Si vous donnez des animaux en pension ? combien ?.....
89. Pour quelle raison ?.....
90. Pendant combien de temps (préciser la période) ?.....
91. Combien ça vous coûte en tout ?.....
92. Quand se fait le paiement ?.....
93. A qui?.....
94. Est-ce que vous récupérez le fumier des animaux donnés en pension?.....

ANNEXE 12 : Statistiques des 150 exploitations enquêtées en 2005 (Données de structure et d'assolement)

	Moyenne	Ecart-type	Médiane
R_extra	0,54	0,50	1
MOS	1,01	0,54	1
Equip	0,27	0,41	0
UGB	2,99	2,94	1,42
S_tot	18,92	14,76	12
% S_irrigable	62%	40%	92%
% GDA	24%	32%	0%
Nb_Fprive	0,78	0,68	1
% GAG	32%	28%	22%
Taux_intensif	1,03	0,25	1
O_sec	1,88	2,61	0
GC_sec	2,77	3,52	0
O_irrig	3,69	3,49	2
GC_irrig	2,34	3,40	0
A	1,77	2,74	0
M	3,07	3,67	0
O_A	0,72	1,20	0
O_M	0,90	1,17	0
O_GC	0,12	0,22	0
NC	4,51	5,36	1
% O_sec	16%	14%	10%
% GC_sec	18%	25%	0%
% O_irrig	16%	20%	0%
% GC_irrig	8%	11%	0%
% A	24%	22%	18%
% M	4%	7%	0%
% O_A	6%	10%	0%
% O_M	15%	17%	0%
% O_GC	10%	13%	0%
% NC	2%	3%	0%

Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Poussin et al, pour l'année 2005

ANNEXE 13 : Statistiques des 69 exploitations communes enquêtées en 2005 (Données de structure et d'assolement)

	Moyenne	Ecart-type	Médiane
R_extra	0,46	0,50	0
MOS	0,96	0,39	1
Equip	0,22	0,34	0
UGB	2,43	2,18	1,5
S_tot	15,66	10,82	10
% S_irrigable	65%	37%	87%
% GDA	24%	33%	0%
Nb_Fprive	0,71	0,54	1
% GAG	29%	24%	24%
Taux_intensif	1,06	0,25	1
O_sec	1,79	2,45	0
GC_sec	2,42	3,00	0
O_irrig	2,59	2,29	2
GC_irrig	2,01	2,69	0
A	1,06	1,63	0
M	2,64	2,92	1
O_A	0,66	1,07	0
O_M	0,99	1,18	0
O_GC	0,09	0,17	0
NC	4,12	4,98	1
% O_sec	16%	23%	0%
% GC_sec	15%	19%	0%
% O_irrig	24%	22%	20%
% GC_irrig	11%	14%	0%
% A	8%	12%	0%
% M	15%	15%	9%
%O_A	5%	7%	0%
% O_M	10%	12%	0%
% O_GC	2%	4%	0%
% NC	22%	22%	13%

Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Poussin et al, pour l'année 2005

ANNEXE 14 : Statistiques des 126 exploitations enquêtées en 2015 (Données de structure et d'assolement)

	Moyenne	Ecart-type	Médiane
R_extra	0,49	0,62	0
Nb_Sap	0,26	0,46	0
MOF	2,25	1,14	2
Equip	1,49	0,83	1
FVD	0,84	0,21	1
UGB	2,56	2,60	1,2
S_tot	15,91	10,05	11
% S_irriguée	83%	20%	100%
% GDA	18%	25%	0%
% Fprive	54%	41%	67%
% GAG	52%	35%	50%
S_Asp	2,88	4,13	0
Taux_intensification	1,12	0,33	1
O_sec	0,53	0,93	0
GC_sec	0,70	1,25	0
O_irrig	3,43	3,52	2
GC_irrig	2,25	3,32	0
A	1,22	2,04	0
M	1,69	2,19	0
O_A	1,68	2,45	0
O_M	1,41	1,90	0
O_GC	0,29	0,52	0
NC	2,72	3,37	0
% O_sec	5%	8%	0%
% GC_sec	3%	6%	0%
% O_irrig	25%	24%	16%
% GC_irrig	10%	15%	0%
% A	5%	8%	0%
% M	11%	14%	0%
% O_A	10%	15%	0%
% O_M	13%	18%	0%
% O_GC	2%	4%	0%
% NC	15%	17%	0%

Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Azizi Amal, 2015

ANNEXE 15 : Statistiques des 69 exploitations communes enquêtées en 2015 (Données de structure et d'assolement)

	Moyenne	Ecart-type	Médiane
Equip	1,35	0,74	1
Nb_Sap	0,20	0,37	0
MOF	2,32	1,20	2
R_extra	0,52	0,64	0
FVD	0,89	0,16	1
UGB	2,85	2,76	1,8
S_tot	16,69	10,87	11,5
% S_irriguée	82%	22%	100%
%GDA	16%	23%	0%
% Fprive	57%	40%	70%
% GAG	48%	34%	42%
S_Asp	3,86	5,70	0
Taux_intensification	1,12	0,33	1
O_sec	0,60	1,05	0
GC_sec	0,51	0,91	0
O_irrig	3,54	3,41	2
GC_irrig	2,96	4,35	0
A	0,67	1,20	0
M	2,00	2,65	0
O_A	1,76	2,47	0
O_M	1,34	1,73	0
O_GC	0,21	0,39	0
NC	3,15	3,80	0
% O_sec	5%	8%	0%
% GC_sec	4%	6%	0%
% O_irrig	27%	25%	19%
% GC_irrig	12%	17%	0%
% A	3%	5%	0%
% M	9%	12%	0%
% O_A	10%	14%	0%
% O_M	14%	18%	0%
% O_GC	2%	4%	0%
% NC	16%	18%	0%

Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Azizi Amal, 2015

ANNEXE 16 : Les caractéristiques des groupes d'exploitations identifiés en 2005

Groupes	statistiques	% R extra	MOS	Equip	S_tot (ha)	% irrigable	% GDA	Nb_Fpriv	% GAG	UGB	Taux_intensif	% olivier_sec	% GC_sec	% O irrig	% A	% O_A	% M	% O M	% GC irrig	% O GC	% NC
groupe 3	Moyenne	50%	1,83	1,83	80,67	100%	6%	3,50	65%	3,45	0,65	0%	0%	14%	20%	5%	25%	1%	1%	0%	35%
	Médiane		2,00	2,00	75,00	100%	0%	3,00	68%	3,60	0,66	0%	0%	13%	23%	0%	26%	0%	0%	0%	35%
	Ecart-type		0,28	0,28	31,00	0%	10%	1,00	26%	3,05	0,20	0%	0%	5%	18%	9%	8%	2%	2%	0%	27%
groupe 1	Moyenne	100%	1,36	0,09	12,09	87%	1%	1,14	55%	1,56	1,20	7%	11%	39%	15%	5%	15%	21%	7%	0%	6%
	Médiane		1,00	0,00	9,75	100%	0%	1,00	50%	1,05	1,23	0%	0%	40%	0%	0%	0%	17%	0%	0%	0%
	Ecart-type		0,58	0,17	5,31	21%	2%	0,24	23%	1,61	0,26	17%	19%	29%	21%	10%	21%	24%	17%	0%	13%
groupe 6	Moyenne	67%	1,00	0,08	9,59	93%	91%	0,29	45%	1,38	1,18	0%	5%	42%	4%	4%	27%	13%	17%	6%	5%
	Médiane		1,00	0,00	5,50	100%	100%	0,00	33%	0,98	1,15	0%	0%	33%	0%	0%	18%	0%	5%	0%	0%
	Ecart-type		0,17	0,15	6,85	11%	12%	0,41	30%	1,15	0,26	0%	12%	37%	9%	13%	29%	21%	20%	14%	10%
groupe 7	Moyenne	10%	1,27	0,47	16,12	89%	7%	1,47	55%	1,74	1,01	3%	3%	29%	13%	7%	24%	9%	11%	1%	9%
	Médiane		1,00	0,00	13,50	100%	0%	1,00	50%	0,75	0,99	0%	0%	27%	0%	0%	24%	0%	0%	0%	4%
	Ecart-type		0,49	0,53	7,52	16%	11%	0,62	25%	1,84	0,16	10%	10%	25%	25%	14%	23%	13%	15%	4%	10%
groupe 4	Moyenne	38%	1,43	0,52	41,86	49%	33%	0,57	18%	9,89	0,91	17%	32%	11%	1%	1%	13%	3%	14%	0%	27%
	Médiane		2,00	1,00	34,00	34%	0%	1,00	12%	9,60	0,90	0%	31%	10%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	26%
	Ecart-type		0,65	0,50	21,35	40%	38%	0,49	16%	3,46	0,18	24%	26%	10%	2%	2%	16%	7%	21%	0%	20%
groupe 5	Moyenne	0%	0,44	0,00	11,72	32%	10%	0,28	5%	3,23	1,01	0%	29%	18%	1%	4%	5%	6%	8%	2%	35%
	Médiane		0,00	0,00	9,25	23%	0%	0,00	0%	3,00	1,00	22%	31%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	41%
	Ecart-type		0,49	0,00	5,77	25%	13%	0,40	6%	1,68	0,19	30%	22%	27%	2%	10%	6%	9%	16%	7%	28%
groupe 2	Moyenne	100%	0,34	0,00	9,82	10%	6%	0,10	1%	1,44	0,97	55%	28%	10%	0%	2%	0%	1%	3%	2%	56%
	Médiane		0,00	0,00	6,00	0%	0%	0,00	0%	0,90	1,00	44%	23%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%
	Ecart-type		0,50	0,00	8,24	16%	12%	0,19	2%	1,31	0,31	46%	28%	17%	2%	10%	2%	4%	11%	8%	39%

Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Poussin et al. 2008

ANNEXE 17 : Les caractéristiques des groupes d'exploitations identifiés en 2015

Groupe	Statistique	Nb_Sap	MOF	R_extra	Equip	FVD	UGB	S_tot(ha)	%Sirr	%GDA	%Fprive	P_GAG	S_Asp	T_intensif	%O_sec	%GC_sec	%O_irrig	%Arbo	%O_A	%M	%O_M	%GC_irrig	%O_GC	%NC
	Moyenne	1,06	2,66	0,11	2,78	71%	2,27	25,03	98%	2%	95%	91%	0,97	1,06	0%	0%	16%	17%	29%	13%	3%	3%	1%	12%
	Médiane	1,00	2,50	0,00	3,00	85%	0,45	20,25	100%	0%	100%	100%	0,00	1,00	0%	0%	2%	2%	10%	0%	0%	0%	0%	0%
	Ecart-type	0,97	1,32	0,21	0,35	29%	2,56	11,59	4%	3%	8%	12%	1,40	0,31	0%	0%	19%	22%	31%	15%	5%	6%	1%	16%
Groupe 5	Moyenne	0,14	3,00	0,00	2,14	67%	3,99	44,14	97%	1%	85%	24%	31,57	1,03	1%	0%	15%	0%	2%	15%	2%	46%	2%	4%
	Médiane	0,00	3,00	0,00	2,00	52%	3,60	38,00	100%	0%	93%	31%	28,00	1,00	0%	0%	5%	0%	0%	9%	0%	53%	0%	0%
	Ecart-type	0,24	1,00	0,00	0,73	29%	2,76	12,16	4%	1%	16%	14%	12,10	0,08	2%	0%	15%	0%	3%	12%	3%	15%	3%	6%
Groupe 9	Moyenne	8,00	0,20	2,00	3,00	100%	30,00	26,00	100%	0%	100%	77%	6,00	1,00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
	Médiane	8,00	0,20	2,00	3,00	100%	30,00	26,00	100%	0%	100%	77%	6,00	1,00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
	Ecart-type	0,00	0,00	0,00	0,00	0%	0,00	0,00	0%	0%	0%	0%	0,00	0,00	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Groupe 1	Moyenne	0,10	2,57	0,33	1,77	94%	4,02	21,24	74%	5%	60%	37%	2,20	0,94	1%	8%	24%	5%	7%	7%	8%	13%	5%	20%
	Médiane	0,00	2,00	0,00	2,00	100%	4,43	19,50	71%	0%	66%	42%	0,00	0,95	0%	0%	22%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	23%
	Ecart-type	0,19	1,26	0,49	0,72	8%	2,82	9,29	16%	8%	25%	22%	2,48	0,18	3%	13%	16%	9%	9%	10%	11%	17%	8%	16%
Groupe 4	Moyenne	0,00	1,88	1,41	1,24	97%	0,92	9,35	98%	3%	82%	56%	1,44	1,20	0%	0%	39%	4%	11%	7%	20%	12%	1%	7%
	Médiane	0,00	1,50	1,00	1,00	100%	0,00	10,00	100%	0%	100%	77%	0,00	1,00	0%	0%	41%	2%	9%	7%	21%	11%	1%	7%
	Ecart-type	0,00	0,58	0,48	0,57	5%	1,16	4,10	3%	5%	25%	43%	2,03	0,34	0%	0%	44%	2%	9%	7%	21%	8%	1%	8%
Groupe 3	Moyenne	0,10	3,40	0,10	1,30	90%	2,12	10,40	100%	0%	100%	88%	0,15	1,95	0%	0%	20%	5%	12%	8%	45%	0%	9%	0%
	Médiane	0,00	2,00	0,00	1,00	100%	1,73	9,50	100%	0%	100%	100%	0,00	1,81	0%	0%	0%	0%	0%	0%	43%	0%	0%	0%
	Ecart-type	0,18	2,44	0,18	0,42	13%	1,55	3,58	0%	0%	0%	17%	0,27	0,41	0%	0%	24%	9%	17%	12%	18%	0%	14%	0%
Groupe 6	Moyenne	0,06	1,45	0,94	0,81	62%	2,15	5,89	99%	83%	0%	58%	1,09	1,27	0%	1%	34%	0%	6%	26%	23%	6%	1%	3%
	Médiane	0,00	1,50	1,00	1,00	61%	0,90	6,00	100%	100%	0%	72%	0,00	1,00	0%	0%	19%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%
	Ecart-type	0,12	0,63	0,70	0,41	32%	2,32	2,45	2%	25%	0%	38%	1,39	0,37	0%	2%	35%	0%	12%	28%	29%	10%	2%	4%
Groupe 7	Moyenne	0,00	2,19	0,15	1,23	77%	0,59	8,30	79%	31%	14%	54%	0,54	1,12	14%	5%	23%	3%	10%	18%	10%	9%	0%	3%
	Médiane	0,00	2,00	0,00	1,00	100%	0,30	8,00	84%	42%	0%	50%	0,00	1,00	0%	0%	16%	0%	0%	21%	0%	0%	0%	0%
	Ecart-type	0,00	0,80	0,26	0,36	25%	0,61	2,14	18%	20%	20%	22%	0,91	0,16	19%	8%	20%	5%	16%	14%	12%	13%	0%	4%
Groupe 8	Moyenne	0,00	1,43	0,43	0,29	96%	1,71	8,36	34%	19%	0%	2%	0,11	0,77	24%	7%	26%	0%	0%	0%	8%	2%	0%	28%
	Médiane	0,00	1,00	0,00	0,00	100%	1,35	6,75	39%	5%	0%	0%	0,00	0,69	14%	0%	21%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	29%
	Ecart-type	0,00	0,84	0,49	0,41	7%	1,48	4,19	20%	21%	0%	4%	0,18	0,26	24%	12%	23%	0%	0%	0%	12%	3%	0%	20%

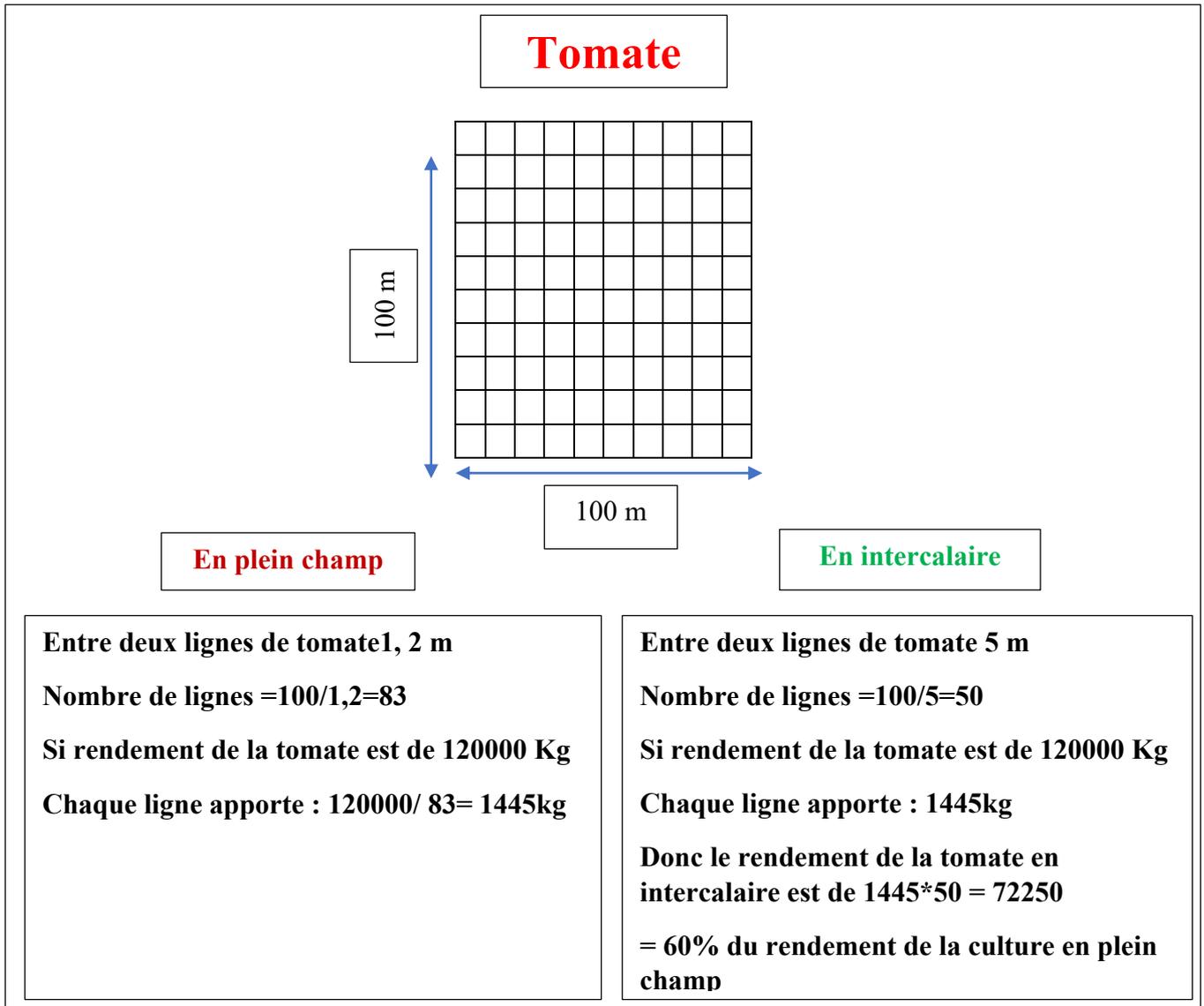
Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Azizi Amal, 2015

ANNEXE 18 : Caractéristiques des forages par type d'exploitation

Type	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre d'exploitation	30	18	10	17	8	16	13	14
Nombre des forages	39	33	14	18	15	0	6	1
Nbr_forage/ exploitation	1,3	1,83	1,4	1,06	1,88	0	0,46	0,07
Puissance	9	11,32	8,9	10,72	9,42	NC	10,06	2
Diamètre	4,1	3,95	4,1	3,8	4,08	NC	3,8	4
% Autorisation	46%	58%	50%	50%	60%	NC	33%	0%
%Energie_ électrique_tarif agricole	62%	73%	64%	56%	67%	NC	33%	0%
%Energie_ électrique_tarif non agricole	13%	0%	36%	17%	13%	NC	0%	0%
%Gasoil	21%	27%	0%	28%	20%	NC	50%	100%
% abandonné	13%	0%	0%	0%	27%	NC	17%	100%
Sup_irrigée/ Forage	9,15	12,29	7,32	8,32	21,15	NC	5,38	0
Approfondissement / an	1,17	1,42	1,22	1,21	0,77	0	1,51	2
Coût_moyen_installation	12832,5	17692,31	16222,22	10821,43	23875	NC	14000	10000
Coût_moyen_approfondissement	117,27	121,67	124,28	170,83	133,13	NC	167,5	180
Accès individuel	39	33	14	14	11	NC	3	1

Source : Enquêtes technico-économiques réalisées par Azizi Amal pour l'année 2015

ANNEXE 19 : Calcul de la différence de rendement entre une culture en intercalaire et une culture en plein champ (exemple tomate)



ANNEXE 20 : Les hypothèses de calcul de la disponibilité mensuelle en eau pour le cas du GDA et du forage

Les hypothèses de calculs de la disponibilité mensuelle en eau du GDA	Les hypothèses de calculs de la disponibilité mensuelle en eau du forage
<p>Débit du forage = 100m^3</p> <p>Nombre d'agriculteur qui irriguent au même temps sur la même ligne = 4 agriculteurs</p> <p>Débit à l'exploitation = $100/4 = 25\text{m}^3$</p> <p>Longueur des tours d'eau : -d'octobre à avril : 3 jours -de mai à septembre : 6 jours Nombre d'heure d'irrigation = 14 heures/jours</p> <p>Efficience du GDA = 0,8</p> <p>Disponibilité en eau en hiver: $25 \times 30 / 3 \times 14 \times 0,8 = 2800 \text{ m}^3 / \text{mois}$</p> <p>Disponibilité en eau en été : $25 \times 30 / 6 \times 14 \times 0,8 = 1400 \text{ m}^3 / \text{mois}$</p>	<p>Débit de forage = $28,6 \text{ m}^3$</p> <p>Nombre d'heure d'irrigation = 12 heures/jours</p> <p>Disponibilité en eau par mois : $28,6 \times 12 \times 30 = 10296 \text{ m}^3 / \text{mois}$</p>

ANNEXE 21 : Les prix relatifs des produits agricoles (2005, base 100)

CULTURE	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
TOMATE	100	93	89	111	104	117	124	145	143	165	155
PIMENT PIQUANT	100	98	94	108	122	109	123	149	164	161	0
PIMENT DOUX	100	95	94	110	120	116	136	163	174	154	181
FEVE VERTE	100	95	96	103	100	111	104	130	154	167	165
MELON	100	74	70	54	62	76	85	74	105	161	94
PASTEQUE	100	103	205	114	112	116	266	380	189	116	134
CAROTTE	100	100	119	122	123	128	135	183	182	203	213
OIGNON VERT	100	95	134	126	134	131	149	179	177	186	237
PETIS POIS	100	101	106	87	97	103	98	117	146	126	148
HUILE D'OLIVE	100	135	107	119	102	112	111	99	140	153	169
AGRUME (MALTAISE)	100	75	70	72	89	88	102	121	128	113	94
CITRON	100	104	99	128	167	143	213	182	197	165	134
RAISIN	100	131	142	121	119	135	203	171	149	153	138