THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT AGRO MONTPELLER ET DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER

En Sciences de l'eau

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau
Préparée dans le cadre d'une cotutelle entre l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II et l'Institut Agro - Montpellier

Unité de recherche UMR G-EAU Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages

Analyse des innovations de mobilisation des ressources hydriques pour faire face à la pénurie d'eau dans les oasis : cas du bassin de Todgha (Maroc)

Présentée par Yassine KHARDI
Le 14 décembre 2023

Sous la direction de Sami Bouarfa et Ali Hammani

Devant le jury composé de

Mohamed EL AMRANI, Professeur, ENA-Meknès	Président
Insaf MEKKI, HDR Maitre de conférences, INRGREF - Tunis	Rapporteure
Zahra THOMAS, Professeure, L'institut Agro Rennes-Angers	Rapporteure
Sami BOUARFA, Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et Forêts, INRAE - Montpellier	Directeur de thèse
Ali HAMMANI, Professeur, IAV-Hassan II - Rabat	Directeur de thèse
Guillaume LACOMBE, Chercheur, CIRAD - Rabat	Invité
Marcel KUPER, Directeur de l'UMR G-Eau, CIRAD – Montpellier	Invité

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II IAV

L'INSTITUT agro Montpellier

A mes très chers parents

À travers cette thèse, je souhaite vous honorer d'une manière qui va au-delà des mots, en signe d'une reconnaissance éternelle et d'un amour infini. Votre soutien indéfectible a été la force qui a animé chaque pas de mon parcours. Aucune expression verbale ne peut véritablement rendre compte de l'amour immense que je ressens à votre égard, ni de la gratitude profonde que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de faire en ma faveur.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de manière significative à la réalisation de cette thèse de doctorat. Leur soutien, leurs conseils et leur encouragement ont été des éléments cruciaux qui ont façonné ce travail de recherche.

Je voudrais tout d'abord exprimer ma reconnaissance envers mon directeur de thèse, Pr. Hammani Ali, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de superviser cette thèse et en me donnant l'opportunité de la mener au sein du réseau de chercheurs SIRMA. Son soutien et son apport ont été d'une grande utilité.

Un merci sincère à mon deuxième directeur de thèse, Dr. Bouarfa Sami, dont l'expertise et les conseils éclairés ont grandement enrichi cette thèse. Les discussions stimulantes et les idées novatrices partagées ont été d'une valeur inestimable.

Je suis très reconnaissant à Marcel Kuper pour sa générosité intellectuelle, ses conseils et ses discussions toujours fructueuses. Ses qualités humaines resteront toujours une source d'inspiration.

Les contributions de Guillaume Lacombe méritent également une mention spéciale. Ses suggestions, son appui et sa disponibilité ont contribué de manière significative à l'élaboration de cette thèse.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements envers Dr. Taky Abdelillah pour ses suggestions et conseils constructifs tout au long de mes années de thèse.

Je remercie énormément Benoit Dewandel du BRGM pour son appui fondamental en modélisation, son partage d'expertise et ses encouragements.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Amar Imache de Lisode et à Zeine Zein Taleb de l'ENA-Meknès qui m'ont fortement aidé à concevoir et à conduire le processus participatif.

J'exprime mes vifs remerciements à Pr. El-Amrani Mohamed de l'ENA-Meknès, Pr. Zahra Thomas de l'Institut Agro Rennes-Angers et Pr. Mekki Insaf pour avoir accepté d'évaluer cette thèse.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers tous les fonctionnaires de l'ORMVA-Tf, l'ANDZOA, l'ABH-GZR et l'ORMVA-O pour leur partage d'informations et connaissances de terrain. Leur collaboration a joué un rôle crucial dans la réussite de cette recherche.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues, au réseau SIRMA et à mes amis qui ont partagé leurs idées et leurs expériences tout au long de ce voyage académique. Leurs conseils et leur camaraderie ont rendu cette aventure encore plus enrichissante.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers ma chère petite famille pour leur soutien indéfectible et leur compréhension tout au long de cette période exigeante.

Chacune de ces contributions a été essentielle à la réalisation de cette thèse, et je suis reconnaissant envers chacun d'entre vous. Merci du fond du cœur.

Résumé

Le développement de l'agriculture irriguée dans les régions arides est souvent accompagné d'une exploitation intensive des eaux souterraines. Ce développement peut également être à l'origine des réallocations considérables de la ressource en eau de surface et souterraine à l'échelle du bassin versant. Cette thèse prend les innovations de mobilisation des eaux d'irrigation comme point d'entrée pour appréhender les pratiques d'adaptation au manque d'eau à l'échelle du territoire oasien Todgha-Ferkla au Sud-Est du Maroc et elle entreprend une concertation territoriale sur l'avenir de la gestion de l'eau moyennant une démarche participative. Deux innovations récemment introduites sur le territoire de Todgha-Ferkla ont été identifiées et analysées : (i) le captage des eaux de crues dans un bassin en terre pour la recharge de la nappe et l'irrigation à l'échelle de l'exploitation agricole initialement basée sur les eaux souterraines seulement ; (ii) le renforcement du débit d'une khettara par pompage à énergie solaire dans la nappe sous-jacente. Des enquêtes de terrains, l'analyse d'images satellitaires, un suivi piézométrique multi-site et une modélisation analytique de la recharge ont été menés entre 2020 et 2023. En parallèle, un processus participatif impliquant un panel mixte d'acteurs a été conçu et mené afin d'établir un diagnostic factuel de la disponibilité des ressources en eau afin de coconstruire des solutions consensuelles pour une gestion durable de l'eau à l'échelle du territoire. Notre recherche a montré que l'usage conjugué des eaux de crues à l'échelle de l'exploitation agricole pour l'irrigation des palmiers dattiers et pour la recharge de la nappe permet de minimiser les pertes par évaporation. La modélisation analytique basée sur les mesures de terrains a montré que la recharge à partir du bassin de captage des crues a un effet sur la piézométrie spatialement et quantitativement très limité en raison de l'hydrogéologie de la zone. En outre, l'irrigation pourrait contribuer à la recharge de la nappe lorsqu'elle est prolongée sur plusieurs semaines grâce à l'arrivée de plusieurs crues rapprochées dans le temps. Quant à l'association du pompage par énergie solaire et du système traditionnel de la khettara, elle permet de sauvegarder l'accès et la gestion collective des eaux souterraines. Ainsi, l'organisation sociale autour de la ressource en eau souterraine est maintenue et l'ouvrage traditionnel de captage des eaux souterraines pourrait être abandonné. L'analyse des innovations et les résultats de la concertation territoriale montrent que ce territoire est le siège d'une course à l'eau généralisée et non régulée, qui pourrait mettre en péril à terme toute forme d'agriculture, en premier lieu dans les parties les plus à l'aval du bassin versant. Les adaptations individuelles constatées apportent des améliorations locales mais restent tributaires des autres activités à l'échelle du bassin versant. La concertation territoriale révèle la nécessité de concevoir et de mettre en exergue un nouveau modèle de gouvernance de l'eau en vue d'assurer une gestion durable de l'eau dans ces oasis. De manière générale, la présente thèse contribue à la compréhension des pratiques d'irrigation et de leur mode de gestion dans le territoire oasien de Todgha-Ferkla et apporte des éléments de réflexion au débat national pour durabiliser la gestion de l'eau dans les oasis.

Mots clés : *oasis, extensions agricoles, irrigation, recharge de la nappe, khettara, innovations, concertation territoriale, eau au Maroc*

Abstract

The development of irrigated agriculture in arid regions is often accompanied by intensive exploitation of groundwater. This development can also lead to significant reallocations of surface and groundwater resources at the watershed scale. This thesis takes innovations of irrigation water mobilization as an entry point to understand adaptation practices to water scarcity at the scale of the Todgha Ferkla oasis territory in Southeastern Morocco. It undertakes a territorial concertation about the future of water management through a participatory approach. Two recently introduced innovations in the Todgha-Ferkla territory have been identified and analysed: (i) Harvesting floodwaters in an earthen pond to recharge the aquifer and to irrigate a date-palm farm, initially relying on groundwater only. (ii) Integrating solar-powered pumping into the existing khettara system in the traditional oases. Field surveys, satellite image analysis, piezometric monitoring, and analytical modelling were conducted between 2020 and 2023. In parallel, a participatory process involving a mixed panel of stakeholders was designed and carried out to establish a factual diagnosis of the current water resource situation and to co-create consensus solutions for sustainable water management at the territorial level. Our research has shown that the conjunctive use of floodwaters at the farm level for date palm irrigation and aquifer recharge minimizes evaporation losses from the studied floodwater harvesting pond. Field measurements combined with analytical modelling have shown that the spatial extent of recharge from the flood retention pond is limited in space and rate due to the hydrogeology of the area. Furthermore, over-irrigation could contribute to aquifer recharge in the case of prolonged irrigation due to the arrival of several floods close in time. As for the integration of solar-powered pumping into the downstream part of the existing khettara system, which includes transport and distribution structures and management rules, it helps to save the collective access and management of groundwater. Thus, the social organization around groundwater resources is maintained, and the traditional groundwater capture structure could be abandoned. The analysis of innovations and the results of the territorial consultation show that this territory is experiencing a generalised competition for water that could ultimately compromise all forms of agriculture in the downstream parts of the watershed if access to surface and groundwater is not regulated. The observed individual efforts led to local improvements but remain dependent on other activities at the watershed scale. Territorial concertation reveals the need to design and implement a new water governance model to ensure sustainable water management in these oases. In general, this thesis contributes to the understanding of irrigation practices and the current water management mode in the Todgha-Ferkla oasis territory and provides elements for consideration in the national debate on water management sustainability in the oases.

***Keywords**: oasis, agricultural extensions, irrigation, groundwater recharge, khettara, innovations, territorial concertation, water in Morocco.*

ملخص

غالبًا ما يكون تطوير الزراعة المسقية في المناطق القاحلة مصحوبًا باستغلال مكثف للمياه الجوفية. ويمكن أن يكون هذا التطور أيضًا سببًا في عمليات إعادة توجيه هامة لموارد المياه السطحية والجوفية على مستوى الحوض المائي. تتخذ هذه الأطروحة الابتكارات المتعلقة بتعبئة مياه الري كمدخل لفهم ممارسات التكيف مع نقص المياه في واحات تودغى فركلة في جنوب شرق المغرب وتعتمد على تشاور ترابي حول مستقبل تدبير المياه باستخدام مقاربة تشاركية. لقد تم تحديد وتحليل ابتكارين اثنين من مجموع الابتكارات التي تم إدخالها مؤخرًا إلى واحات تودغى - فركلة، وهما: (1) التقاط مياه الفيضانات في أحواض من تراب من أجل تطعيم الفرشة المائية وري النخيل على مستوى الاستغلاليات الفلاحية التي تعتمد في الاساس على المياه الجوفية فقط؛ (2) ربط الضخ بالطاقة الشمسية بنظام الخطارة في الواحات القديمة. تم إجراء الأبحاث الميدانية وتحليل صور الأقمار الصناعية والتتبع البارومتري والنمذجة التحليلية بين 2020 و2023. ومن ناحية أخرى، تم تصميم وتنفيذ عملية تشاركية تضم لجنة مختلطة من مختلف الفاعلين في هذا المجال من أجل وضع تشخيص واقعي للوضع الحالي للموارد المائية ومن أجل المشاركة في بناء حلول توافقية لتدبير مستدام للمياه على مستوى منطقة فركلة. لقد أظهر بحثنا أن الاستخدام المشترك لمياه الفيضانات على مستوى الاستغلاليات الفلاحية لري أشجار النخيل وتطعيم الفرشة المائية يمكن من تقليل الخسائر الناجمة عن التبخر. كما أظهرت القياسات الميدانية والنمذجة التحليلية أن تأثير التطعيم من حوض تجميع مياه الفيضانات محدود مكانيًا بسبب الخصائص الهيدروجيولوجية للمنطقة. وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يساهم الإفراط في الري في إعادة تطعيم الفرشة المائية في حالة الري لفترات طويلة بعد وصول مياه عدة فيضانات متقاربة في الوقت. أما بالنسبة لربط الضخ بالطاقة الشمسية مع الجزء السفلي من نظام الخطارة الحالي - والذي يشمل النقل والتوزيع وقواعد التدبير - فإنه يمكن من حماية الاستغلال والتدبير الجماعيين للمياه الجوفية. وبالتالي، يتم الحفاظ على التنظيم الاجتماعي حول موارد المياه الجوفية ويمكن التخلي عن البنية التقليدية لالتقاط المياه الجوفية. يظهر تحليل الابتكارات ونتائج التشاور الترابي أن هذه المنطقة تشهد سباقا عاما على المياه مما قد يعرض جميع أشكال الزراعة والحياة في الأجزاء السفلية من الحوض للخطر انعدام الماء إذا لم يتم تنظيم الحصول على المياه السطحية والجوفية. بالنسبة للمحاولات الفردية التي تمت ملاحظتها، فإنها تؤدي إلى تحسينات محلية لكنها تظل تعتمد على الأنشطة الأخرى على مستوى الحوض المائي. وتكشف المشاورات الترابية عن الحاجة إلى تصميم وتنزيل نموذج جديد لتدبير المياه من أجل ضمان التدبير المستدام للمياه في هذه الواحات. بشكل عام، تساهم هذه الأطروحة في فهم ممارسات الري والوضع الحالي لتدبير المياه في واحات تودغى فركلة وتقترح مجموعة من الأفكار من أجل إغناء النقاش الوطني لجعل تدبير المياه أكثر استدامة في الواحات.

الكلمات المفاتيح: الواحات، الاستغلاليات الفلاحية، الري، تطعيم الفرشة المائية، الخطارة، الابتكارات، التشاور الترابي، المياه في المغرب

Table de Matière

Résumé 4
Abstract 5
ملخص 6
Liste des figures 10
Liste des tableaux 11
Liste des abréviations 12
Chapitre 1 : Introduction générale 14
1.1. Les oasis : un laboratoire à ciel ouvert pour analyser et comprendre les enjeux d'une meilleure gouvernance de l'eau 16
1.1.1. Face à la rareté structurelle de l'eau, les oasis ont survécu grâce à une maitrise ancestrale de l'eau 16
1.1.2. Les oasis au Maroc : quelle stratégie face à la rareté de l'eau ? 17
1.2. L'innovation en agriculture et l'eau dans les oasis 18
1.2.1. L'innovation en agriculture 18
1.2.2. Une interaction permanente entre la ressource en eau, l'infrastructure et les règles de gestion 19
1.3. Le Todgha-Ferkla : un terrain oasien d'innovations induites par des changements sociaux et agricoles 20
1.4. Mon contact avec le terrain de thèse 24
1.5. Objectifs et questions de recherche 26
1.6. Démarche scientifique 26
1.7. Organisation de la thèse 28
Chapitre 2 : Utilisation conjointe du captage des eaux de crue pour la recharge de la nappe et l'irrigation des palmiers dattiers au Maroc 32
Section A : La démarche méthodologique 34
2.A.1. La zone d'étude 34
2.A.2. La méthodologie 35
2.A.2.1. Dispositifs de suivi et mesures sur le terrain 35
2.B.2.2. Le calcul du bilan d'eau dans le bassin 36
2.A.2.3. Le bilan d'eau dans le sol des parcelles irriguées 38
2.A.2.4. La modélisation analytique de la recharge 39
Section B : Recharge de la nappe à l'échelle de l'exploitation agricole dans le pré-Sahara marocain . 42
2.B.1. Introduction 43
2.B.2. Material and methods 43
2.B.2.1. Study site 43
2.B.2.2. Material 44

2.B.2.3. Methods 44
2.B.3. Results and discussion 46
2.B.3.1. Description and analysis of piezometric and limnimetric measurements 46
2.B.3.2. The infiltration rate in the basin 47
2.B.3.3. Calibration of the groundwater recharge model 47
2.B.4. Conclusion 49
Section C : Complément de Résultats 50
2.C.1. Résultats complémentaires 51
2.C.2. Le bilan d'eau dans le bassin 51
2.C.3. Le bilan d'eau dans le sol des parcelles irriguées 52
2.C.4. La modélisation analytique de la recharge de la nappe 53
Conclusion du chapitre 57
Chapitre 3 : Pomper ou disparaître : le dilemme du renforcement des khettaras par le pompage solaire dans les oasis du Maroc 60
3.1. Introduction 61
3.2. Méthodologie 62
3.2.1 Zone d'étude 62
3.2.2 Approche 63
3.3. Résultats 64
3.3.1 Une dynamique agricole des extensions qui atteint ses limites 64
3.3.2 Le pompage solaire : une menace et une opportunité pour les khettaras 66
3.3.3 Diffusion de l'innovation « khettara solaire » 68
3.4 Discussion et conclusion 71
Chapitre 4 : Repenser la gestion de l'eau à l'échelle territoriale dans les oasis du Maroc : le cas de Ferkla 75
4.1. Introduction 76
4.2. Zone d'étude 77
4.3. Méthodologie 78
4.3. Résultats 80
4.3.1. Une démarche symétrique au service d'une réflexion collective sur un nouveau modèle de gestion de l'eau 80
4.3.2. Des ateliers participatifs qui révèlent la fermeture du bassin versant : 80
4.3.3. Un cheminement depuis les problèmes d'infrastructures aux problèmes de gouvernance et de gestion de l'eau : 81
4.3.4. Présence d'une multitude de tentatives pour faire face au manque d'eau 84
4.3.5. Pour une implication de la population locale dans toutes les décisions et les projets liés à l'eau dans la zone 85

4.4. Discussion et conclusion 87
Chapitre 5 : Conclusion générale 90
Activités scientifiques 100
Productions scientifiques dans le cadre de la thèse 100
Séminaires et journées doctoriales : 100
Congrès scientifiques 100
Autres activités scientifiques 101
Références bibliographiques 103
Annexes 111

Liste des figures

Figure 1. Evolution du bassin hydrographique Todgha pendant les 50 dernières années 23
Figure 2. Pratiques de mobilisation d'eau d'irrigation observées dans le territoire 24
Figure 3. Schéma conceptuel de la démarche scientifique 28
Figure 4. Organisation générale de la thèse 29
Figure 5. Carte de l'exploitation agricole étudiée et des points automatisés de suivi du niveau d'eau 34
Figure 6. Le bassin de captage des eaux de crue et le point de pompage (photo prise un jour après l'inondation qui s'est produite le 9 mars 2021) 35
Figure 7. Schéma conceptuel du bassin, des points de suivi et du flux de déstockage 36
Figure 8. Schéma conceptuel de la recharge de la nappe phréatique à partir du bassin 40
Figure 9. Cross section of the study site and location of the probes S1, S2, S3 and S4 44
Figure 10. Water level in the basin (S4) and in the piezometric monitoring points (S1, S2, S3) 46
Figure 11. Infiltration rates as a function of water depth in the basin 47
Figure 12. Modelling of groundwater recharge in S2 for floods 1 and 2 (K=4.5x10-6 m.s-1 ; S=1.6x10-3) 48
Figure 13. Modelling of groundwater recharge in S2 for flood 3 (K=3.5x10^{-6} m.s^{-1} ; S=1.6x10^{-3}) 48
Figure 14. Modelling of groundwater recharge in S3 for floods 1 and 2 (K=4.5x10^{-6} m.s^{-1} ; S=1.6x10^{-3}) 49
Figure 15. Modelling of groundwater recharge in S3 for the 3rd flood (K=3.5x10^{-6} m.s^{-1} ; S=1.6x10^{-3}) 49
Figure 16. Graphique du niveau d'eau dans le bassin et dans les piézomètres 51
Figure 17. Bilan d'eau du bassin de captage des eaux de crues (en m³) pour les événements de crues enregistrés 52
Figure 18. Modélisation de la recharge de la nappe en S2, crues 1 et 2 (K=4.1×10^{-6}m s^{-1} S=3.5×10^{-3}), crue 3 (K=2.2×10^{-6}m s^{-1} S=8.5×10^{-3}), crue 5 (K=3×10^{-6}m s^{-1} S=5×10^{-2}), crue 6 (K=5×10^{-6}m s^{-1} S=3×10^{-2}) 55
Figure 19. Modélisation de la recharge de la nappe en S3, crues 1 et 2 (K=4,1.10^{-6}m/s S=3,5.10^{-3}), crue 3 (K=2,2.10^{-6}m/s S=8,5.10^{-3}), crue 5 (K=3.10^{-6}m/s S=5.10^{-2}), crue 6 (K=5.10^{-6}m/s S=3.10^{-2}) 56
Figure 20. Zone d'étude 63
Figure 21. Évolution des surfaces irriguées à Ferkla. 66
Figure 22. Schéma de la khettara solaire avec stockage d'eau. 69
Figure 23. Carte de la zone de Ferkla 77
Figure 24. Schéma des étapes principales du processus participatif 79
Figure 25. Problèmes liés à l'eau dans la zone inventoriée lors de l'atelier du diagnostic participatif 81
Figure 26. Arbre à problème du constat « déséquilibre entre l'offre eau disponible et la demande 83
Figure 27. Photos des tentatives pour renforcer l'offre en eau dans les oasis 84
Figure 28. Etape de Dessin sur des supports vierges en sous-groupes par les participants lors de l'atelier de l'état des lieux participatif moyennant. 85

Liste des tableaux

Tableau 1. La confrontation de l'offre en eau d'irrigation et du besoin en eau du palmier dattier et le retour d'eau potentiel vers la nappe 53
Tableau 2. Les différentes formes d'exploitation de l'eau souterraine à Ferkla. 66
Tableau 3. Les caractéristiques des khettaras solaires de Ferkla. 68
Tableau 4. La charte établie avec les participants pour guider et organiser le processus participatif 80
Tableau 5. L'é*chelle de consensus de quelques solutions proposées par les participants* 86

Liste des abréviations

ABH-GZR Agence de Bassin Hydraulique Guir-Ziz-Rhéris

ANDZOA Agence Nationale pour le Développement des Zones Oasiennes et de l'Arganier

COSTEA

FAO Food and Agriculture Organization

JICA Agence Japonaise de Coopération Internationale

ONEE Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable

ORMVA-Tf : Office Régionale de Mise en Valeur Agricole de Tafilalet

PACCZO Plan d'Adaptation aux Changement Climatiques dans les Zones Oasiennes

PDAIRE Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau

PMA Processus Multi-Acteurs

PMV Plan Maroc Vert

PNEEI Le Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation

RADDO Réseau Associatif de Développement Durable des Oasis

RBOSM : Réserve de Biosphère des Oasis du Sud Marocain

SIG système d'information géographique

UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Chapitre 1

Introduction générale

Chapitre 1 : Introduction générale

L'eau souterraine qui est souvent considérée accessible et disponible en permanence pour les usages anthropiques représente près de 30.1% des réserves d'eau douce sur Terre (Shiklomanov, 1993). Son utilisation remonte aux civilisations les plus anciennes (Margat, 2008). En revanche, cette ressource invisible a connu une exploitation intensive au cours des derniers décennies (Margat & Van der Gun ; 2013). L'agriculture irriguée à travers le monde occupe le premier rang des prélèvements des eaux souterraines avec un taux de 70% (FAO, 2020). Dans les régions arides et semi-arides, en l'occurrence les pays de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, les taux d'extractions[1] des eaux souterraines destinées à l'irrigation sont supérieurs à la moyenne mondiale (Margat and Van der Gun ; 2013). Depuis les années 70, le pompage des eaux souterraines a accéléré la production alimentaire qui est en croissance continuelle (FAO, 2020 ; Shah et *al.,* 2007). Cette pression sur les eaux souterraines, particulièrement dans les zones semi-arides et arides, risque d'être exacerbée avec le changement climatique (Taylor et *al*., 2013*)* qui prévoit une réduction des apports pluvieux dans ces régions. Il s'avère ainsi indispensable d'évaluer le potentiel en eau souterraine existant, de comprendre le mode de fonctionnement des aquifères, notamment leur recharge, d'objectiver ses usages, et de trouver les voies d'une gouvernance de cette ressource vitale (FAO, 2020 ; COSTEA, 2020 ; UNESCO, 2022).

Face à la pénurie d'eau de manière générale et en particulier à la diminution des eaux souterraines, les solutions préconisées telles que le transfert d'eau -parfois sur de longues des distances, la mise en place de nouveaux barrages ou le recours aux eaux non conventionnelles (i.e. dessalement des eaux de mer ou réutilisation des eaux usées traitées) soulèvent des questions. Elles sont en effet généralement couteuses économiquement et sur le plan environnemental. Ces solutions sont également axées sur l'offre en eau, ne questionnent pas la demande en eau liées à des systèmes agricoles de plus en plus intensifs, et négligent la multifonctionnalité des eaux souterraines (Petit et *al.*, 2021). Au-delà de l'irrigation, le caractère multifonctionnel des eaux souterraines réside dans leur mobilisation pour l'approvisionnement en eau potable, le développement d'autres activités économiques et le maintien d'un écoulement de base dans les rivières.

Par ailleurs, les eaux souterraines sont en interaction permanente avec les eaux de surface dans la quasi-totalité des cas (Nathan and Evans, 2011 ; Winter et *al.*, 1998). Une rivière peut drainer et/ou alimenter une nappe à un endroit donné d'une manière continue ou intermittente. Il s'agit de la

[1] Le ratio -exprimé en pourcentage- du volume d'eau prélevé pour un usage donné par rapport au volume total d'eau prélevé à partir d'une source (e.g. nappe) de manière temporaire ou permanente.

même ressource qui est souvent considérée et gérée séparément suivant son statut d'eau de surface ou d'eau souterraine (*ibid*). Pour une gestion efficace de ces ressources en eau, la compréhension des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface est essentielle (Brodie et *al.*, 2007). Les changements apportés à l'une de ces composantes peuvent par conséquent contribuer à l'altération de l'autre (Petit et *al.*, 2021).

A l'échelle du bassin versant, l'accroissement de la demande en eau suite au développement de l'activité anthropique, se traduit par un passage progressif d'un état d'ouverture du bassin[2] à un état de fermeture (Seckler, 1996). Dans un bassin fermé, tout le débit d'eau utilisable est capté et alloué *(ibid).* A l'exutoire du bassin hydrographique fermé, l'eau est complétement évaporée ou elle est polluée et inutilisable (Seckler, 1996 ; Svendsen et *al.*, 2001). Molle et *al.* (2008) ajoutent que i) la baisse structurelle des niveaux des nappes ii) la forte compétition entre usages, iii) la pollution sévère et iv) la dégradation des écosystèmes sont tous des symptômes révélant la fermeture d'un bassin versant. Dans un bassin hydrographique où les flux d'eau changent et requièrent d'être connus et chiffrés, les calculs d'économie d'eau en agriculture ont – à leur tour- évolué vers un système appelé « Comptabilité de l'eau »[3] (Water Accounting ; Perry, 2007 ; Gleick et *al.*, 2011). Les calculs d'économie d'eau concernent différentes échelles spatiales, depuis le champ, jusqu'au bassin versant transfrontalier et nécessite la quantification de flux d'eau *(ibid)*. De nos jours, plusieurs systèmes de comptabilisation de l'eau sont exploités par différents États et organisations internationales à des fins diverses (e.g. Quantifier les ressources en eau et la performance de leur gestion, identifier les possibilités d'économie d'eau, comprendre l'impact des pratiques sur les flux d'eau, etc.) (El Meknassi Yousoufi et *al.*, 2023).

L'augmentation de la demande en eau notamment au profit l'agriculture irriguée soulèvent des incertitudes et des inquiétudes considérables et de la même importance que les menaces causées par les changements climatiques (FAO, 2020). L'eau en agriculture connait une crise des ressources qui sont limitées et des usages qui ne cessent d'augmenter pour répondre aux besoins humains. L'augmentation des prélèvements à partir des ressources en eau souterraine a des conséquences immédiates ou différées sur les flux d'eau à l'échelle des bassins versants. Les approches scientifiques évoluent pour tenir compte du caractère multifonctionnel de l'eau, pour l'intégrer dans toutes ses dimensions et pour comprendre et chiffrer ses flux.

[2] En état d'ouverture du bassin, Il y a suffisamment d'eau pour satisfaire la demande pendant toute l'année, et les principales réserves d'eau douce s'écoulent du bassin vers son exutoire.

[3]« La comptabilité de l'eau est l'étude systématique de l'état actuel et des tendances de l'offre, de la demande, de l'accessibilité et de l'utilisation de l'eau. » (FAO)

A l'instar de plusieurs systèmes irrigués collectifs dans le monde, les agroécosystèmes oasiens ont connu des perturbations importantes de leurs modèles d'irrigation collective après l'irruption des technologies de pompage de l'eau souterraine qui ont libéré l'accès à l'eau souterraine et augmenté sa demande. Ces techniques de pompage ont amené, dans plusieurs cas, à l'épuisement de cette ressource. Par conséquent, l'organisation communautaire dans les systèmes oasiens a été graduellement impactée et altérée (Lightfoot, 1996). Cette thèse se focalisera sur les enjeux liés à la mobilisation de l'eau souterraine et sa gestion dans le contexte oasien et la pertinence d'une complémentarité avec les eaux de surface.

1.1. Les oasis : un laboratoire à ciel ouvert pour analyser et comprendre les enjeux d'une meilleure gouvernance de l'eau

De l'Asie centrale jusqu'à l'Amérique du Sud, en passant par le Grand Sahara, les oasis représentent des espaces cultivés en plein désert grâce à la présence de l'eau (Bouaziz et *al.*, 2018 ; Fassi, 2017). Les sociétés oasiennes ont su développer plusieurs systèmes de mobilisations et de gestion des eaux souterraines qui ont permis la survie des oasis pour des millénaires (Ahmadi et *al.*, 2010 ; Lightfoot, 1996). En revanche, les oasis de la région saharienne ont connu depuis la deuxième moitié du 20ème siècle plusieurs mutations à la fois économiques, sociales avec des conséquences profondes et parfois déstabilisatrices (Bouaziz et *al.* ; 2018). Une dynamique agricole, souvent encouragée par des fonds publics, a pris naissance dans ces zones oasiennes *(ibid)*. Actuellement, on observe que des exploitations agricoles modernes basées sur le pompage individuel des eaux souterraines sont juxtaposées aux anciennes oasis et plusieurs ruptures et adaptations ont pris place (Faiz and Ruf, 2010 ; Idda et *al.*, 2017 ; Bouaziz et *al.*, 2018).

1.1.1. Face à la rareté structurelle de l'eau, les oasis ont survécu grâce à une maitrise ancestrale de l'eau

Dans un contexte d'aridité extrême où les apports pluviaux sont largement inférieurs à 300 mm/an, les sociétés oasiennes ont tissé un rapport étroit avec l'eau depuis des siècles (Bensaâd, 2011 ; Fassi, 2017). Ce rapport a marqué les structures sociales à l'intérieur des oasis (Bensaâd, 2011). Plusieurs institutions d'irrigation ont été donc créées pour gérer cette ressource (Ostrom, 1992). L'organisation sociale et l'action collective qualifiée de « robuste » par Jouve (2012) a assuré la survie des oasis pendant des siècles. En outre, des systèmes de mobilisation de l'eau ont été développés pour mobiliser les eaux de surface et les eaux souterraines. A titre d'exemple, les « qanats » qui sont des galeries de captage et de transport des eaux souterraines ont été inventés dans la région d'Arménie et Perse depuis plus de 2000 ans et elles se sont diffusées dans plusieurs régions du monde sous différents

noms (Foggaras, Galéria et Khettara) (Ahmadi et *al.*, 2010). En outre, L'épandage des eaux de crues est l'une des pratiques d'irrigation oasiennes pour tirer profit des écoulements de surface rares qui surviennent lors des crues (Beckers and Schütt, 2013 ; Berking, 2018). Dans la conjoncture actuelle marquée par la coexistence entre les deux formes d'agriculture irriguée (i.e. ancienne où l'eau est gérée collectivement et moderne où l'accès à l'eau est individuel) et par une tension importante sur la ressource en eau, les oasis représentent un laboratoire où les irrigants innovent pour s'adapter au manque d'eau. Les agriculteurs des foggaras en Algérie et des Khettaras au Maroc ont su adapter leurs systèmes ancestraux d'irrigation en intégrant des puits équipés par des motopompes et des dispositifs de stockage et de distribution de l'eau afin de s'adapter à la diminution des niveaux des eaux souterraines (Idda et *al.*, 2017 ; Khardi et *al.* 2023).

1.1.2. Les oasis au Maroc : quelle stratégie face à la rareté de l'eau ?

Le Maroc abrite l'une des plus grandes oasis au Monde dans la région du Tafilalet qui a une superficie de 77.000km^2. En 2000, trois provinces du Sud-Est marocain (i.e. Errachidia, Ouarzazate et Zagora) ont été reconnues comme « Réserve de Biosphère des Oasis du Sud Marocain » (RBOSM) par l'UNESCO (UNESCO, 2018). Les régions oasiennes marocaines sont couvertes par des programmes et des plans nationaux de gestion de l'eau en agriculture similairement aux autres régions du Maroc. Le Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation[4] (PNEEI) qui s'inscrivait dans le cadre du Plan Maroc Vert (PMV) avait comme objectif l'économie et la valorisation de l'eau en irrigation à l'échelle des exploitations agricoles. La stratégie « Génération green »[5] (2020 - 2030) vise à soutenir les réalisations du PMV et à faire émerger une classe moyenne agricole. Ces politiques publiques ont contribué de facto à l'intensification de l'agriculture irriguée à partir des eaux souterraines (Benouniche, 2014 ; Fofack et *al.*, 2015). De surcroît, le recours aux eaux de surface pour sécuriser la totalité des besoins en eau potable reflète une augmentation d'accès aux ressources pour les agriculteurs et par extension une continuité d'une politique de l'offre (Del Vecchio, 2020).

Au niveau des oasis marocaines, Jouve (2012) suggère de créer des nouvelles institutions qui forment une continuité avec les anciennes institutions de représentation (Jmâa[6]) afin de veiller sur la gestion concertée des ressources dont dépend la viabilité des oasis. Jouve (2012) souligne que la création de l'Agence Nationale de Développement des Zones oasiennes de l'Arganier (ANDZOA) en 2010

[4] Programme national d'économie d'eau en irrigation (PNEEI) | Ministère de l'agriculture [WWW Document], n.d. URL https://www.agriculture.gov.ma/fr/projet/programme-national-deconomie-deau-en-irrigation-pneei (accessed 7.18.23).

[5] Génération Green 2020-2030 | Ministère de l'agriculture [WWW Document], n.d. URL https://www.agriculture.gov.ma/fr/ministere/generation-green-2020-2030 (accessed 7.18.23).

[6] La Jmaâ est une institution locale qui rassemble les notables de la tribu, sélectionnées en raison de leur influence et de leur richesse….

représente une adaptation institutionnelle pour renforcer la durabilité des oasis. On note que L'ANDZOA a pour mission d'élaborer et d'exécuter un programme de développement intégré et durable du territoire[7] oasien en coordination avec les différents acteurs et organismes concernés.

Les oasis à travers le monde et particulièrement au Maroc sont des milieux où un équilibre durable entre l'eau disponible et les systèmes de production existait depuis des siècles et par conséquent représentent un laboratoire pour analyser et comprendre les différents enjeux et défis liés à l'eau. Les sociétés oasiennes ont su développer une maitrise de l'eau grâce à leur organisation sociale et elles ont développé des systèmes d'irrigation ingénieux pour mobiliser et gérer la ressource. De nos jours, ces oasis à travers les agriculteurs et les institutions locales et/ou étatiques innovent pour s'adapter aux différents changements environnementaux et anthropiques[8] qui surviennent. C'est ainsi qu'il s'avère pertinent de comprendre les différents enjeux liés à l'eau en prenant les oasis du Maroc comme terrain d'analyse.

1.2. L'innovation en agriculture et l'eau dans les oasis

Dans les oasis, l'eau est loin d'être indépendante de l'action humaine qui se traduit par la mise en place d'infrastructures d'irrigations et l'instauration des règles de gestion. Une innovation ne peut être jugée ni bonne ni mauvaise et elle mérite d'être analysée dans son ensemble de manière objective.

1.2.1. L'innovation en agriculture

Le terme innovation est la combinaison entre deux composantes : l'invention et l'exploitation (Roberts, 2007). Il est également défini comme étant une invention qui a trouvé son marché. Akrich et *al. (1988)* définissent l'innovation comme « un parcours qui de décision en décision vous amène au bon moment sur le bon marché avec le bon produit ». Il ne s'agit pas d'un résultat monopolisé par les scientifiques ou des ingénieurs mais elle peut émaner n'importe où, sa clé de réussite est sa capacité à satisfaire une demande *(ibid)*. L'acceptabilité et la faisabilité d'une invention ne sont pas seulement techniques mais sociales également *(ibid)*. Une innovation réussie est d'abord appropriée par les acteurs et elle est reliée à un ensemble d'intervenants.

En revanche, toute innovation devrait être perçue et analysée objectivement y compris en termes d'impacts négatifs. A titre d'illustration, l'irrigation localisée dans la plaine de Saiss (Maroc) a été présentée comme un moyen d'économie d'eau et elle a *de facto* contribué au doublement des

[7] Un territoire est une étendue géographique délimitée (e.g. pays, région, ville ou zone géographique spécifique). Les interactions entre les personnes, les ressources naturelles, les infrastructures et les activités économiques contribuent à façonner et à influencer sa dynamique.

[8] Parmi les changements anthropiques on note le développement d'un modèle intensif d'agriculture basé sur les eaux souterraines, la croissance démographique et le développement des activités touristiques et minières

prélèvements des eaux souterraines et à l'augmentation des superficies irriguées de 50% entre 2005 et 2014 (Kuper et *al.*, 2017; COSTEA, 2020).

1.2.2. Une interaction permanente entre la ressource en eau, l'infrastructure et les règles de gestion

Dans son ouvrage « Oriental Despotism », Wittfogel (1957) a montré les interdépendances entre la ressource en eau, l'infrastructure et l'organisation politique. Ces interdépendances ont continué à inspirer les chercheurs et les pousser à approfondir leurs conceptualisations et leurs compréhensions de ces composantes (Obertreis et *al.*, 2016*)*. De nos jours, même si l'hydrologie, l'ingénierie et l'analyse coût-bénéfice restent prédominants dans la « sphère professionnelle » du secteur des ressources en eau, l'eau en tant que sujet de politique et d'action publique n'est plus principalement associée à ces domaines d'expertise *(ibid).* Les infrastructures ne sont plus considérées comme des objets techniques seulement, mais ils sont désormais perçus comme des objets sociotechniques qui combinent le produit technique, un cadre réglementaire et des mécanismes de financement *(ibid)*.

La gestion de l'eau dans les oasis se fait généralement à travers des institutions locales qui définissent et veillent sur l'application des règles de distribution de l'eau d'irrigation (Ostrom, 1992 ; Aït Hamza, 1999). Ces institutions jouent un rôle important pour opérationnaliser les adaptations liées à l'irrigation (Janssen et *al.*, 2007). Des variations peuvent survenir au niveau de la ressource en eau tel que la modification du débit ou des volumes mobilisables, des mesures d'adaptation et/ou des arrangements institutionnels prennent place (Schlager et *al.*, 1994). Ces adaptions concernent les règles de gestion et/ou l'infrastructure d'irrigation (Idda et *al.*, 2017 ; Jouve, 2012). Ainsi, la ressources en eau, l'infrastructure et les règles de gestion sont en évolution et en interactions permanentes.

A travers le monde, nombreuses sont les innovations qui visent à mobiliser l'eau d'irrigation dans les oasis. Dans le nord du Yémen, il y a plus de mille ans avant J.C., un système de déviation des crues était employé pour l'irrigation de 20 000 hectares de terres agricoles (Adato, 1987). Les communautés oasiennes en Algérie ont développé un système de recharge de la nappe et de gestion de l'eau (Saidani et al., 2022). Dans les oasis Tunisiennes, les ressources en eau proviennent principalement de l'exploitation d'aquifères non renouvelables. Ces aquifères ont un taux de recharge très faible et représentent 34% des ressources en eau souterraines de la Tunisie (Sghaier, 2010). L'activité agricole dans les oasis d'Oman repose essentiellement sur le pompage des eaux souterraines (Al-Ismaily et Probert, 1998).

Les oasis du Sud-Est Marocain se trouvent dans une zone tampon appelée le pré-Sahara (RBOSM ; UNESCO, 2018). Différemment aux oasis désertiques de l'Algérie et de la Tunisie, les oasis marocaines

en l'occurrence les oasis de Todgha-Ferkla se trouvent au piémont Sud du Haut-Atlas où les écoulements de surface générés par les crues rechargent des nappes libres peu profondes qui alimentent les khettaras.

1.3. Le Todgha-Ferkla : un terrain oasien d'innovations induites par des changements sociaux et agricoles

Le bassin versant de l'oued Todgha fait partie de la région du Drâa-Tafilalet au Sud-Est du Maroc (figure 1). Il est délimité par deux chaines de montagnes : le Haut-Atlas au nord et l'Anti-Atlas au sud. Son exutoire correspond à sa confluence avec l'oued Rhéris. Dans sa partie aval, l'oued Todgha change de nom et devient l'Oued Ferkla. Il y reçoit les eaux de deux affluents : l'Oued Satt et l'Oued Tanguerfa. La plupart des crues de l'oued Todgha s'assèchent totalement avant d'atteindre la zone de Ferkla, sous l'effet combiné de l'infiltration, de l'évaporation et des prélèvements.

Le bassin de Todgha s'étale sur une superficie d'environ 4860Km^2 et il reçoit une pluviométrie moyennent annuelle de l'ordre de 120mm (Station Ait bouijane ; 1977-2012). Cette pluviométrie varie entre 43 et 224 mm/an (ABH-GZR, 2019). Le cumul annuel de l'évaporation dépasse 2900mm dans ce bassin (Station Ait Bouijane, ABH-GZR, 2019). Les superficies agricoles à Ferkla ont augmenté de 2150ha au début des années 1970 à plus de 3700ha en 2021 soit une augmentation supérieure à 70% (Khardi et *al.* 2023). Ces superficies, principalement plantées en palmier dattier, sont irriguées par les eaux souterraines (ORMVA-Tf, 2021).

Le bassin de Todgha s'étale sur trois unités hydrogéologiques à savoir les aquifères du Haut Atlas, du bassin crétacé et les aquifères primaires de l'anti-Atlas. A ces unités s'ajoutent les nappes alluviales de Todgha et de Tinejdad-Toroug alimentées par les oueds (ABH-GZR, 2019 ; figures 1 et 20). Les nappes du bassin Crétacé sont la ressource principale de l'alimentation en eau potable pour les centres urbains et les douars du bassin de Todgha avec des débits de prélèvement d'environ 105 l/s pour alimenter les villes et les ksars de Tinejdad et Goulmima (ONEE, 2018).

Au centre du bassin de Todgha, il se trouve la vallée de Todgha et le Ferkla qui est une zone de plaine située à l'aval de la vallée qu'on nomme le territoire Todgha-Ferka. Ce territoire est constitué de sept communes territoriales : Todgha El Oulia, Tinghir, Todgha Essoufla, Taghzout N'ait Atta, Ferkla El Oulia, Tinejdad et Ferkla Essoufla (figure 1). Ce territoire a connu plusieurs évolutions en ce qui concerne les flux d'eau depuis le 20ème siècle suite à l'installation des dispositifs de captage des eaux souterraines et de surface. Ces dispositifs témoignent des mutations sociales, et agricoles (Jouve, 2012). Ce territoire oasien qui a connu une augmentation de la demande en eau pour l'irrigation (lié au

développement du palmier dattier) et pour l'alimentation en eau potable, abrite un ensemble d'innovations de mobilisation de l'eau d'irrigation.

L'activité agricole et particulièrement le recours à l'irrigation a été initialement organisée par les 'Jmâas'. Elle a été basée sur la dérivation des eaux de surface par des seuils fusibles appelées « Ougoug » et sur la mobilisation des eaux souterraines par les khettaras, les sources et les « Oghrour »[9]. Ensuite, Ce territoire a connu une perte de l'autonomie tribale depuis la période du protectorat français à partir de l'année 1931 et par l'émergence de l'Etat-nation marocain (De Haas, n.d. ; Haddache, 2009). A titre d'exemple, la gestion des eaux de l'Oued Todgha a été instaurée par les autorités coloniales puis par les autorités locales en 1974 *(ibid)*. Depuis les années 70, la zone a connu un flux migratoire important des oasiens vers l'Europe ce qui a permis à certains groupes ethniques (e.g. les *haratin*[10]) de se libérer de plusieurs contraintes imposées par les sociétés oasiennes traditionnelles notamment les travaux serviles d'entretien des Khettaras (Haddache, 2009). L'immigration a par conséquent amélioré considérablement le niveau de vie des oasiens qui ont investis dans le domaine de l'agriculture irriguée en dehors des anciennes oasis moyennant des puits équipés par des motopompes *(ibid)*. La plaine du Ghallil et la zone d'El-Bour à Ferkla, occasionnellement drainées par l'oued Todgha, étaient des terrains de parcours avant l'introduction de la motopompe dans le territoire (De haas, nd). Elles ont été transformées en périmètres irrigués à des fins de production agricole entre les années 80 et 90, suite à l'introduction de la motopompe *(ibid).* De ce fait, le territoire a connu d'importantes transformations sociales et une évolution agraire entre les années 60 et 90 (Jouve, 2012). Actuellement, on observe les exploitations familiales des ex-*Khammes*[11] et les grandes exploitations modernes juxtaposées aux anciennes palmeraies. Ces trois formes d'agriculture (i.e : grande exploitation moderne, exploitation familiale, ancienne palmeraie) peuvent dans certains cas exploiter la même nappe *(ibid).*

Depuis les années 90, l'Etat -à travers les ORMVA- a construit plusieurs digues d'épandage des eaux de crues pour irriguer les anciennes oasis qui ont connu une régression importante de la ressource en eau. A l'instar des autres oasis du Maroc, l'introduction de l'irrigation localisée et le remplacement des motopompes à gasoil ou à butane par des pompes électriques utilisant des panneaux photovoltaïques datent des années 2000 à l'échelle de Todgha Ferkla (Dione, 2012; Renevot, 2006). De surcroit, deux

[9] Ouvrage traditionnel utilisé pour l'extraction de l'eau à partir des puits

[10] Les Haratins sont généralement considérés comme descendants d'anciens esclaves ou de communautés marginalisées historiquement. Ils ont souvent été soumis à des discriminations et à des inégalités socio-économiques.

[11] Un terme utilisé en Afrique du Nord pour désigner un métayer qui cultive un domaine agricole et reçoit en échange un cinquième des revenus générés par cette exploitation.

grands barrages ont été récemment construits sur Oued Todgha et Oued Tanguerfa *(*figure 1)(ABH-GZR, 2019). Ces barrages ont été mis en eau respectivement en 2019 et 2022[12].

En somme, l'introduction des techniques modernes d'irrigation au territoire a permis le développement de l'activité agricole en dehors de l'ancienne oasis. L'Etat a ensuite installé plusieurs ouvrages de mobilisation des eaux de surface notamment les digues d'épandage des eaux de crues et les barrages. Ce territoire qui est en état de fermeture et dont témoigne l'absence d'écoulement dans ses oueds toute l'année et qui s'ouvre occasionnellement après des crues importantes, connait actuellement des changements considérables dans la distribution des flux d'eau (e.g. ; tarissement des puits et des khettaras et abandon des anciennes palmeraies). A l'intérieur des oasis des khettaras, les agriculteurs continuent leurs interventions sur les règles de gestion et sur l'infrastructure après la baisse des débits d'irrigation. Les agriculteurs des extensions agricoles à leur tour tentent de mobiliser plus de ressources en creusant plus ou approfondissant leurs forages ou en mobilisant les eaux des crues. Il s'agit bien donc d'un territoire à forte tension sur la ressource en eau (de surface et souterraine) où les irrigants innovent pour mobiliser plus de ressources hydriques.

[12] Mise à l'eau du barrage Toudgha près de Tinghir, 2022. Médias24. URL https://medias24.com/2022/10/12/le-barrage-toudgha-accueille-ses-premieres-reserves-deau/ (accessed 7.21.23).

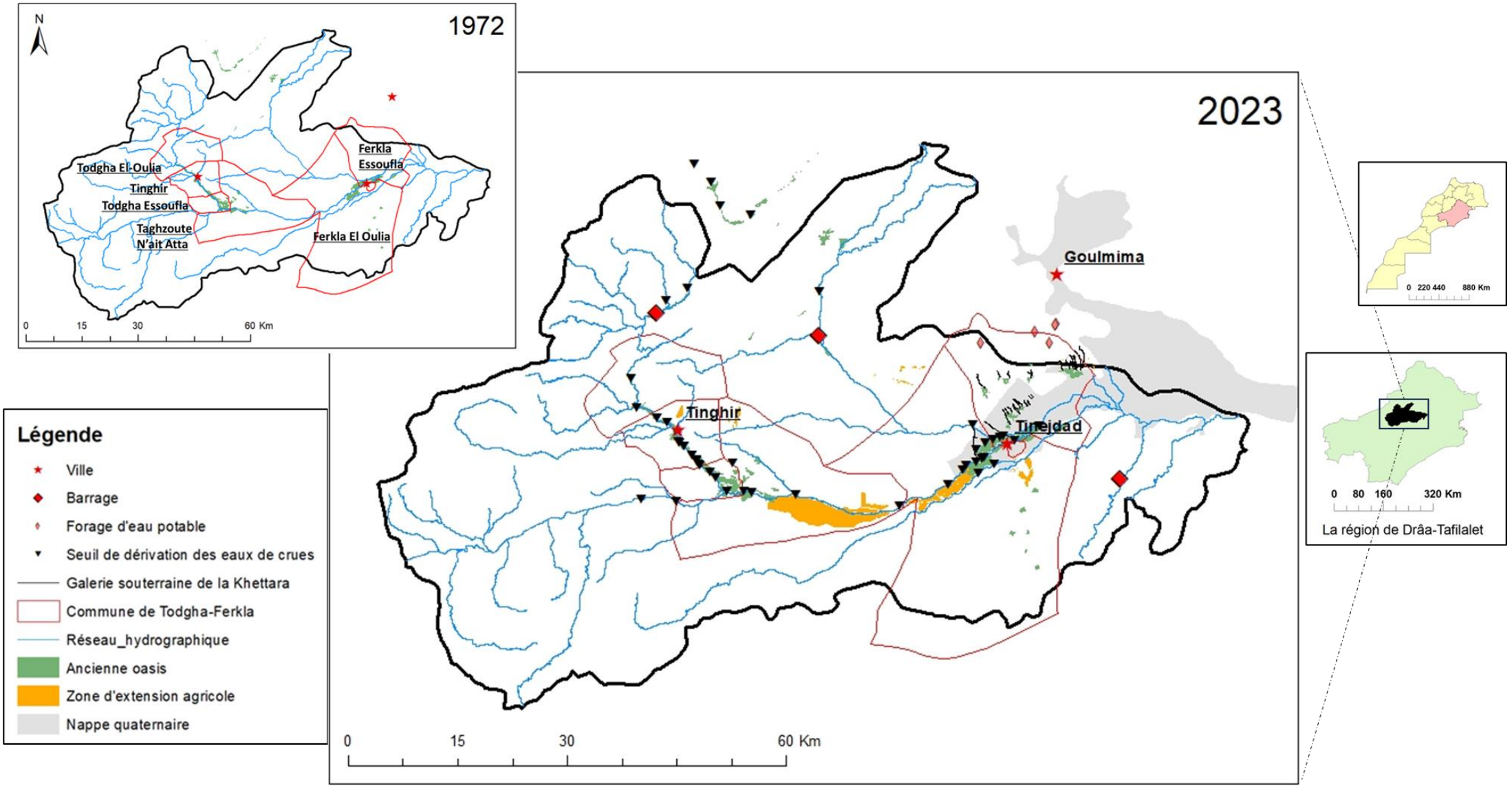

Figure 1. Evolution du bassin hydrographique Todgha pendant les 50 dernières années

Sources: (Google Earth, 2023; ABH-GZR, 2019; ORMVA, 2021)

1.4. Mon contact avec le terrain de thèse

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet « Massire » qui est financé par le Fond International de Développement Agricole (FIDA). Ce projet vise à renforcer les systèmes d'innovations agricoles et rurales dans les zones oasiennes et arides du Maghreb (https://massire.net/). Cette thèse était également une opportunité d'insertion dans le réseau SIRMA (Systèmes irrigués du Maghreb) qui regroupent plusieurs institutions d'enseignement supérieur et de recherche au Maghreb et en France. Le réseau SIRMA a pour mission l'analyse et l'accompagnement des dynamiques des systèmes irrigués au Maghreb.

Les premières visites de terrain m'ont donné l'occasion d'observer un grand nombre de pratiques et d'innovations liées à l'irrigation dans le territoire (figure 2). Par ailleurs, le projet Massire a mis l'analyse des innovations présentes sur terrain comme l'un de ses axes de travail et il a mis des Processus Multi-Acteurs (PMA) au centre de sa démarche (massire.net/processus-multi-acteurs/). Ces PMA sont basés sur des objectifs développés en concertation avec les acteurs locaux. Après plusieurs visites de terrains et discussions avec ses acteurs (institutionnels, agriculteurs, chercheurs, acteurs associatifs), il a été convenu d'observer les innovations présentes dans les anciennes oasis et dans les extensions agricoles simultanément et que je mène des études approfondies sur ces innovations dans le cadre de ma thèse. Deux innovations ont été présentées par des agriculteurs et des institutionnels comme des tentatives pour pallier au manque d'eau structurel dans le territoire voire sauver l'activité agricole et anthropique localement. Il s'agit de : a) le captage des eaux de crue à l'échelle de l'exploitation agricole pour recharger la nappe et irriguer les palmiers dattiers b) le pompage collectif par énergie solaire pour renforcer ou remplacer le système de khettara.



Figure 2. Pratiques de mobilisation d'eau d'irrigation observées dans le territoire

Vu que la grande majorité des extensions agricoles du territoire est irriguée à partir des eaux souterraines dont le niveau est en baisse continue, la présence d'une exploitation agricole qui mobilise les eaux de crues pour substituer occasionnellement les eaux souterraines était ingénieux de mon point de vue. De surcroit, cette expérience a été considérée comme une bonne pratique oasienne (Allaoui et *al.*, 2018) dans le cadre du projet « Gestion Adaptative des Oasis du Maghreb » porté en partenariat par la FAO et le Réseau Associatif de Développement Durable des Oasis (RADDO)[13]. En plus, nous avons observé des ouvrages collectifs de recharge de la nappe mis en place par l'Etat (seuils aménagés dans le lit d'oueds) presque totalement envasés et donc devenus inefficaces, illustrant ainsi des problèmes de gestion et d'entretien. Ainsi, il s'est avéré intéressant d'analyser ce dispositif individuel qui est présenté comme une pratique innovante de mobilisation des eaux de ruissellement pour l'irrigation et de recharge de la nappe à l'échelle de l'exploitation agricole.

Quant à l'innovation observée au niveau des anciennes oasis à savoir l'association entre le pompage par énergie solaire et le système des Khettaras, j'ai pu voir des expériences installées par l'Etat ou des organismes non-lucratif au démarrage de ma thèse. A partir de mes premières observations et entretiens de terrain, j'ai compris que ces expériences connaissent des difficultés de fonctionnement voire des échecs pour plusieurs raisons : i) contraintes dans les choix techniques du projet, ii) une faible appropriation du dispositif par certains collectifs d'irrigants et iii) le refus des ayants droit de certaines anciennes oasis de modifier ou d'abandonner les règles de gestion ancestrales 'Orf'. En juin 2021, j'ai pu découvrir 5 collectifs d'irrigants dans des oasis irriguées par les Khettaras qui ont développé et installé eux-mêmes et presque simultanément un dispositif associant la Khettara au pompage par énergie solaire. Ainsi, contrairement aux autres expériences où les agriculteurs demandaient l'intervention de l'Etat et dans certains cas ne s'approprient pas le dispositif, l'expérience des 5 collectifs d'irrigants était à mon sens intéressante et méritait d'être étudiée de prêt.

Tout au long des années de thèse, le territoire oasien Todgha-Ferkla connaissait une évolution permanente. Des extensions agricoles ont vu le jour, d'autres agriculteurs essayent de multiplier leurs sources d'approvisionnement en eau d'irrigation. Des collectifs d'irrigants s'organisent pour faire face au manque d'eau et d'autres agriculteurs abandonnent l'activité agricole. C'est dans ce contexte de forte tension sur la ressource en eau de surface et souterraine où les irrigants cherchent à améliorer leur accès à la ressource en eau plutôt que de réduire leur demande que j'ai décidé de conduire une réflexion territoriale sur l'avenir de la gestion de l'eau dans la zone de Ferkla.

[13] https://www.raddo.org/Actualites/60-fiches-bonnes-pratiques-oasiennes

1.5. Objectifs et questions de recherche

Les observations, les échanges avec les différents acteurs de terrain et l'état de l'art confirment la forte tension et la régression des ressources en eau au niveau du territoire Todgha-Ferkla. Face à cette situation, les agriculteurs essayent d'innover individuellement ou collectivement pour pallier au manque d'eau d'irrigation. Ainsi, on émet comme hypothèse de départ que *les innovations de mobilisation de l'eau d'irrigation qui sont considérées comme des bonnes pratiques peuvent perturber les flux d'eau à l'échelle du territoire*. L'objectif de la présente thèse est de comprendre et d'évaluer des innovations locales de mobilisation de l'eau d'irrigation dans les anciennes oasis et dans la zone d'extension agricole du Todgha-Ferkla (Maroc). Pour atteindre cet objectif, des analyses ont été menées qui tiennent compte des dimensions techniques et d'organisation sociale et un débat territorial sur la gestion de l'eau d'irrigation moyennant un processus participatif a été organisé.

Ainsi la question principale de la thèse a été posée comme suit : **Comment les innovations techniques de mobilisation des eaux d'irrigation changent-elles les flux d'eau et sa gestion dans un territoire oasien ?**

Pour répondre à cette question centrale, trois questions spécifiques de recherche ont été émises et dont les réponses sont présentées dans les trois chapitres suivant de cette thèse :

- ✓ *Comment un dispositif de captage des eaux de crue améliore-t-il l'accès à la ressource en eau et modifie-t-il les flux d'eau à l'échelle d'une exploitation agricole oasienne ?*
- ✓ *Comment l'association du système des khettaras au pompage par énergie solaire s'est imposée dans les anciennes oasis ?*
- ✓ *Quel est l'apport de la réflexion territoire moyennant une démarche participative à la gestion de l'eau à l'échelle du territoire ?*

1.6. Démarche scientifique

Pour atteindre notre objectif de recherche et apporter des éléments de réponse à la question centrale de la thèse, une démarche scientifique à plusieurs échelles avec plusieurs approches disciplinaires a été développée. Cette démarche combine des enquêtes de terrain, la caractérisation et la modélisation d'un processus physique de transfert d'eau, l'analyse des images satellitaires et la mobilisation d'outils de participation et de facilitation (figure 3).

Une série d'entretiens semi-structurés et de visites de terrain ont eu lieu au démarrage de la thèse pour le cadrage du travail sur la nature des innovations de mobilisation de l'eau et d'adaptation au manque d'eau dans les anciennes oasis et les extensions agricoles du bassin versant de l'oued Todgha.

D'un côté, les exploitations agricoles qui se sont initialement développées par pompage des eaux souterraines commencent actuellement à mobiliser les eaux de crues pour renforcer l'offre en eau d'irrigation. L'une des premières expériences de captage des eaux de crues à l'échelle d'une exploitation agricole moyennant un bassin en terre a été étudiée. De l'autre côté, certains collectifs des anciennes oasis irriguées par les khettaras ont décidé d'associer leur système traditionnel de mobilisation et de gestion des eaux souterraines au pompage par énergie solaire. Les circonstances et les arrangements entrepris pour associer la khettara au pompage solaire ont été analysés.

Pour comprendre les modifications des flux d'eau à l'échelle d'une exploitation agricole suite au captage des eaux de crues dans un bassin en terre, les processus physiques d'infiltration depuis le bassin et les prélèvements pour l'irrigation ont été quantifiés. Cette analyse s'est basée sur des mesures manuelles et automatisées de niveaux d'eau de surface et souterrains, l'exploitation de données climatiques et un levé topographique de l'exploitation. Ces données ont permis de calculer les différents termes du bilan hydrique du bassin de collecte d'eau de crue et de modéliser la recharge de l'aquifère sous-jacent à l'aide d'un modèle analytique développé par (Dewandel et *al.*, 2021). En outre, des entretiens avec l'agriculteur ont permis de comprendre les pratiques d'irrigation et de gestion des eaux de crues et souterraines à l'échelle de son exploitation agricole (figure 3).

Afin de comprendre les changements structurels et de gestion, consécutifs au tarissement des khettaras, en l'occurrence l'association de ce dispositif traditionnel à un système de pompage par énergie solaire, une approche par enquêtes a été adoptée. En parallèle, une analyse cartographique a été menée moyennant un système d'information géographique (SIG) afin d'avoir une vision d'ensemble sur l'évolution des superficies irriguées dans la zone d'étude. Des images satellitaires « Google Earth » ont été exploitées pour visualiser et délimiter les zones d'extensions agricoles, les anciennes oasis et les infrastructures d'irrigation (e.g. digues d'épandage des eaux de crues, canaux d'irrigation, Puits d'accès aux Khettaras, seuils de recharge de la nappe et barrages).

Finalement, une approche participative a été adoptée pour dépasser les échelles locales (i.e. oasis et exploitation agricole), pour mettre en débat les résultats et aboutissements des innovations analysées et pour poser les termes d'une réflexion territoriale sur la gestion de l'eau à l'échelle de la zone de Ferkla (figure 1). Un processus participatif a ainsi été conçu et mis en œuvre sur le terrain via la mobilisation d'un panel mixte d'acteurs du territoire (figure 3). Ce panel est composé des représentants institutionnels, des agriculteurs, des acteurs associatifs et des représentants communaux.

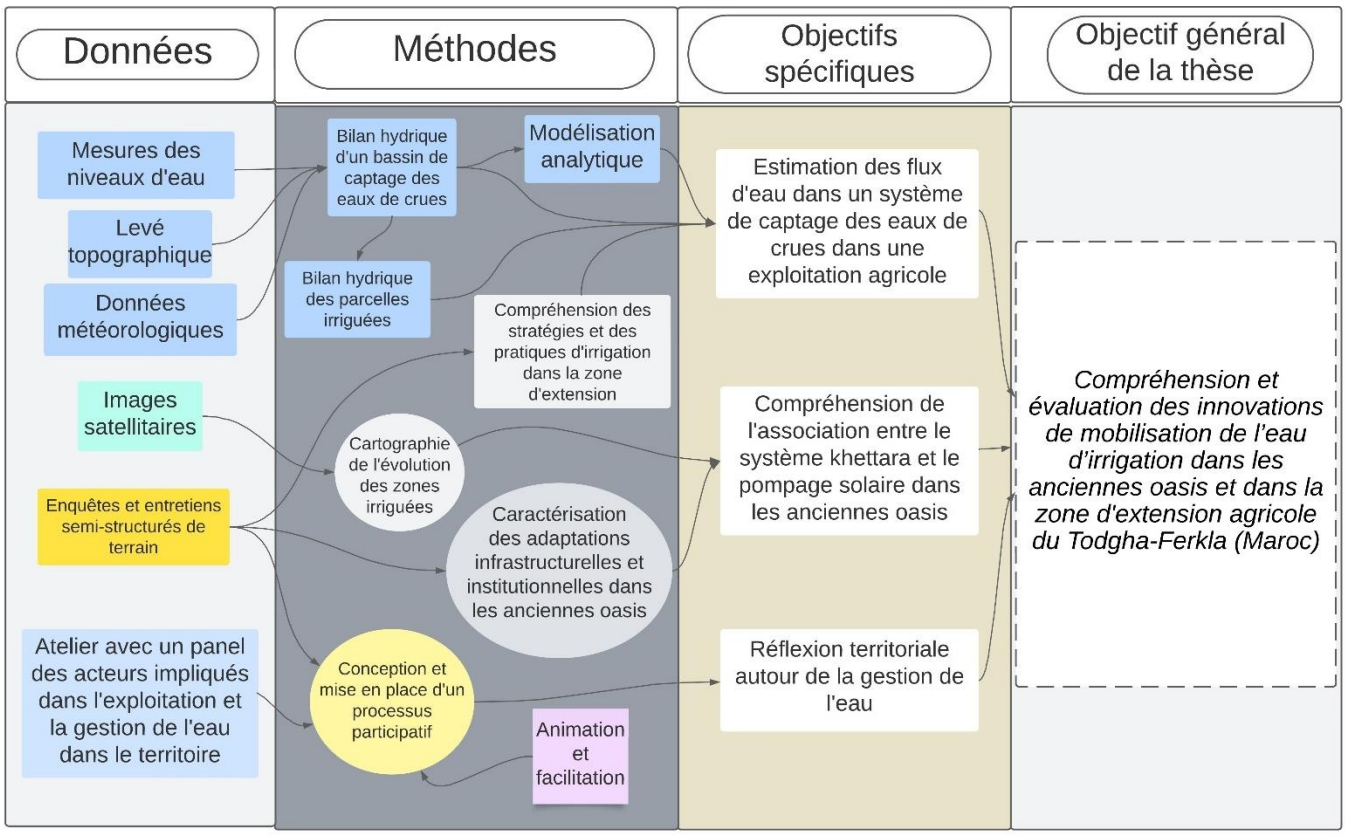

Figure 3. Schéma conceptuel de la démarche scientifique

1.7. Organisation de la thèse

Après ce chapitre introductif, les aboutissements de la thèse sont présentés en trois chapitres où nous traitons à chacune des trois questions spécifiques de recherche.

Le chapitre 2 est présenté en trois sections ; la première section décrit la démarche méthodologique du chapitre. La deuxième section est présentée sous format d'un article scientifique et la troisième section apporte des résultats d'analyse complémentaires qui ne figurent pas dans l'article scientifique de la deuxième section. Les chapitres 3 et 4 prennent le format d'un article scientifique. Les **chapitres 2 et 3** analysent les deux dispositifs d'innovation techniques de mobilisation des eaux d'irrigation présents respectivement dans une exploitation agricole individuelle et dans les anciennes oasis du bassin versant Todgha. Le **chapitre 4** élargit le champ de compréhension des enjeux de l'eau en impliquant un panel mixte d'acteurs locaux dans une réflexion territoriale sur la gestion de l'eau. Un dernier chapitre de conclusion discutera l'ensemble des résultats de la thèse et apportera des éléments de compréhension à la question centrale de recherche (figure 4).

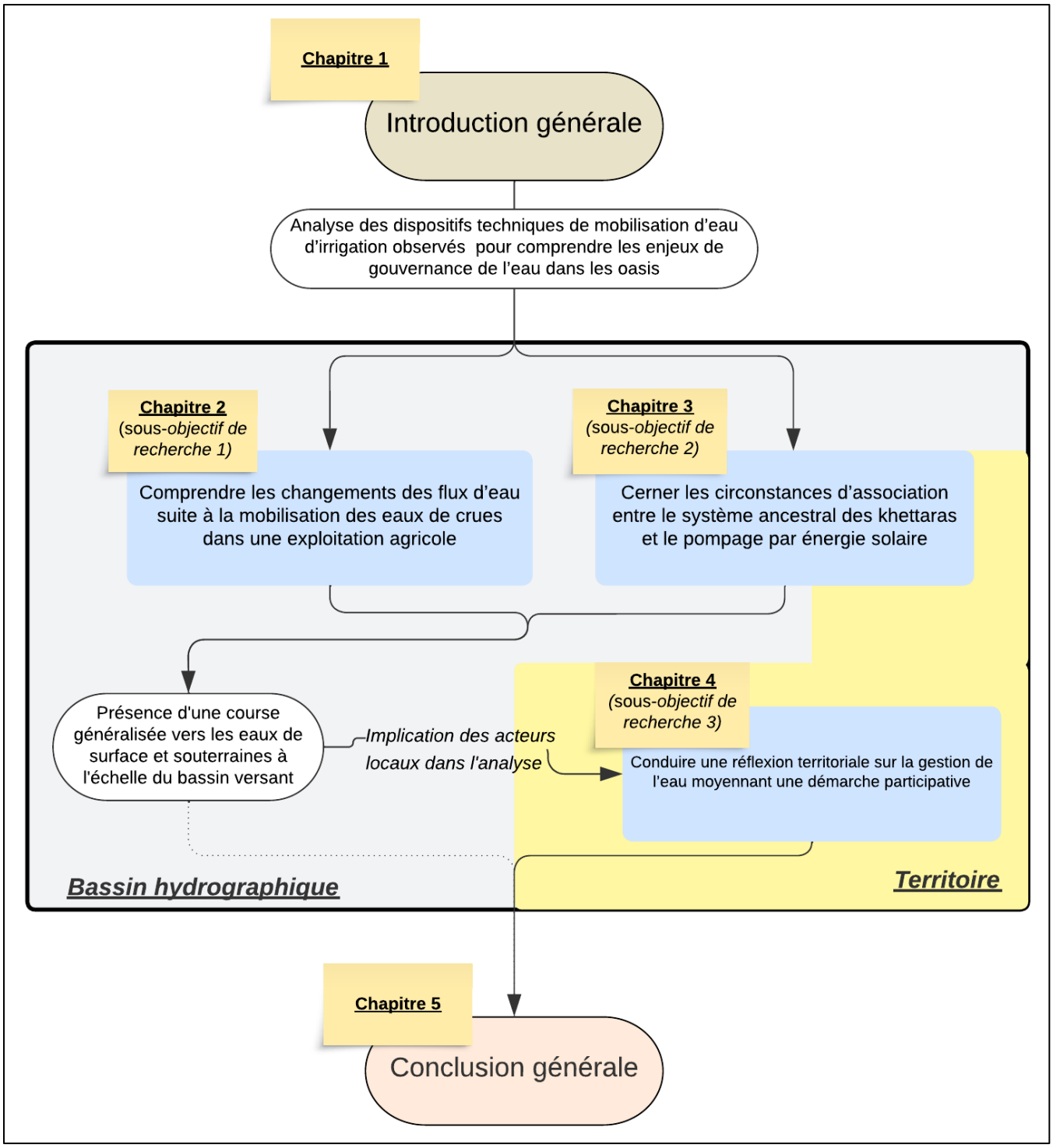

Figure 4. Organisation générale de la thèse

Dans le **chapitre 2,** le captage des eaux de crues, à l'échelle d'une exploitation agricole, pour la recharge de la nappe et l'irrigation des palmiers dattiers est analysé. Ce chapitre répond à la première question spécifique de recherche : « *Comment un dispositif de captage des eaux de crue modifie-t-il les flux d'eau à l'échelle d'une exploitation agricole oasienne ?* ». L'analyse physique des flux d'eau, la

modélisation analytique du processus de la recharge de la nappe et l'approche par enquêtes avec l'agriculteur sont déployées pour répondre à cette question.

Dans le **chapitre 3**, on apportera des éléments de compréhension sur les circonstances de l'association entre le pompage solaire et le système ancestral des khettaras. Ce chapitre répond à la question spécifique de recherche : « *Comment l'association du système des khettaras au pompage par énergie solaire s'est produite dans les anciennes oasis ? ».* Une approche combinant les enquêtes et l'analyse des images satellitaires a été entreprise pour apporter des éléments de réponses à cette question.

Le **chapitre 4** synthétise les aboutissements de la réflexion territoriale sur la gestion de l'eau et répond à la question de recherche : « *Quel est l'apport de la concertation territoire moyennant une approche participative sur la gestion de l'eau à l'échelle du territoire ? »*. Un processus participatif a été conçu et mis en œuvre dans les trois communes de Ferkla (Ferkla El oulia, Ferkla Essoufla et Tinejdad ; figure 1) afin d'amener les agriculteurs et les institutionnels à réfléchir collectivement l'avenir de gestion de l'eau à l'échelle du territoire. Différemment aux deux chapitres précédents (i.e. chapitres 2 et 3) où nous mettons en analyse les innovations de mobilisation de l'eau d'irrigation dans le cadre bassin hydrographique, nous avons impliqué les acteurs et les usagers de l'eau dans le chapitre 4 ; D'où le changement de l'échelle d'analyse depuis le bassin hydrographique vers le territoire.

Chapitre 2

Utilisation conjointe du captage des eaux de crue pour la recharge de la nappe et l'irrigation des palmiers dattiers au Maroc

Chapitre 2 : Utilisation conjointe du captage des eaux de crue pour la recharge de la nappe et l'irrigation des palmiers dattiers au Maroc

En lien avec les autres chapitres de la thèse, ce chapitre analyse la pertinence de l'usage des eaux de crues en agriculture irriguée initialement basée sur les eaux souterraines qui font face aux défis de disponibilité et de gestion. Nous apporterons dans cette introduction des éléments de contexte généraux sur la mobilisation des eaux de crues dans les oasis du Maroc avant d'approfondir notre analyse sur l'innovation observée sur le terrain notamment le captage individuel des eaux de crues à l'échelle des exploitations agricoles. Ensuite, nous dresserons la méthodologie générale du chapitre dans la première section. La deuxième section analyse l'impact du captage des eaux de crues dans un bassin en terre sur la recharge de la nappe à l'échelle d'une exploitation agricole et la troisième section permet de compléter la réflexion à ce sujet en apportant des résultats complémentaires d'expérimentation et de modélisation de la recharge de la nappe.

A l'échelle de la zone oasienne marocaine, plusieurs ouvrages sont installés le long des oueds par les institutions étatiques ou des agriculteurs afin de tirer profit des eaux de crues. L'épandage des eaux de crues qui est une pratique ancestrale exercée par les agriculteurs oasiens de manière collective bénéficie de l'appui de l'Etat à travers les ORMVA. Les principales actions des ORMVA consistent en la rénovation des digues existantes et le bétonnage de leurs réseaux de transport tout en respectant les règles et les négociations ancestrales existantes entre les « Jmâas » concernant ces digues en l'occurrence leurs positions dans les oueds et leurs hauteurs du seuil au-dessus du fond amont. Par ailleurs, les ORMVA mettent en place des nouvelles digues afin de transférer les excédents d'eau depuis des bassins versants, où il n'y a plus des usagers en aval, pour assurer des irrigations supplémentaires aux profits de certaines oasis (e.g. transfert de l'excédent d'eau de à l'aval d'oued Rhéris pour améliorer l'irrigation des oasis du Ziz moyennant la digue de transfert Moulay Brahim) (OMRVA-Tf ; 2020). Au niveau du bassin versant Rhéris qui inclut le bassin de Todgha, la capacité totale de dérivation des eaux de crues moyennant les aménagements hydroagricoles installés par l'ORMVA-Tf est estimée à 155 m^3/s (ORMVA-Tf ; 2020).

De surcroit, des seuils de recharge de la nappe sont installés par l'ABH-GZR et l'ANDZOA dans le cadre du Plan d'Adaptation aux Changement Climatiques dans les Zones Oasiennes (PACCZO) pour favoriser l'infiltration vers la nappe phréatique depuis les lits majeurs des oueds. Il s'agit des ouvrages de recharge de la nappe collective initiés par l'Etat dans le but de s'affranchir à la baisse piézométrique dans la Ferkla. Les nouveaux grands barrages installés par l'Etat (e.g. Barrages Timkit et Todgha) ont comme objectif la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable dans la région De Drâa-Tafilalet

suite la régression des eaux souterraines. Depuis 2010, d'autres initiatives ont été entreprises par des collectifs des oasiens afin de mobiliser les eaux de crues. Une association locale à Nkoub (Anti-Atlas) a installé des digues sur le lit d'un oued afin de recharger une nappe exploitée pour l'approvisionnement en eau potable.

La diminution drastique de la disponibilité des eaux souterraines due à leur surexploitation a poussé certains agriculteurs à mettre en place des dispositifs individuels captage des eaux de crues pour renforcer l'offre en eau d'irrigation à l'échelle de leurs exploitations pendant cette dernière décennie. Ces agriculteurs assurent eux même les charges de captage des eaux des ravines aux alentours de leurs exploitations pour usage en irrigation et parfois sans avoir l'approbation de l'agence du bassin hydraulique qui est en charge de réguler l'accès aux eaux de surface. Trois techniques de mobilisation des eaux de crues pour l'irrigation ont été identifiées à l'échelle des exploitations agricoles dans le bassin versant Todgha. La première technique consiste au stockage des eaux de crues dans un bassin planté en palmier dattier. Une partie des eaux de crues captées dans le bassin s'infiltre vers l'aquifère sous-jacent et l'autre partie est pompée directement depuis le bassin et elle est injectée dans un réseau d'irrigation gravitaire. La deuxième technique consiste en l'aménagement d'une zone ou de toute l'exploitation plantée en palmier dattier par des digues en terre afin de stocker les eaux de crues à l'intérieur des parcelles cultivées. Ces parcelles peuvent être équipées par des drains souterrains connectés à un puits. Après l'inondation, l'eau drainée vers le puits moyennant lesdits drains ou par infiltration est pompée pour assurer l'irrigation des autres parties non aménagées de l'exploitation. La troisième technique de mobilisation des eaux de crues est l'irrigation par inondation directe d'une zone de l'exploitation agricole qui est généralement proche du réseau hydrographique. Cette zone est répartie en plusieurs blocs moyennant des digues en terres. Après 24h à 48h, l'excédent des eaux de crues qui est à priori totalement intercepté au niveau du premier bloc est acheminée consécutivement vers les blocs à son aval par gravité.

L'entretien périodique de ces ouvrages de mobilisation des eaux de crues et leur nettoyage est généralement à la charge de leurs usagers. Ces opérations d'entretien sont organisées de manière collective par les irrigants d'une oasis ou individuellement par l'agriculteur de l'exploitation agricole individuelle. En fonction de la capacité financière des irrigants collectifs ou individuels, les opérations d'entretien se font manuellement ou en mobilisant des engins mécaniques.

2.A.1. La zone d'étude

L'exploitation agricole étudiée est située dans la région du Drâa-Tafilalet au Maroc, sur l'oued Sett qui prend naissance dans les montagnes de l'Anti-Atlas. Les eaux d'irrigation utilisées dans cette exploitation proviennent des eaux souterraines et des crues d'oued Sett (fig. 5). Les écoulements de l'oued proviennent par intermittence sous forme de crues occasionnelles suite à des événements pluvieux rares mais intenses. Le bassin versant de l'Oued Sett à l'amont de l'exploitation agricole s'étend sur une superficie d'environ 790 km^2. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 140 mm avec un écart type d'environ 70 mm (Station Ait Bouijane 1961-2018). A l'instar de la majorité des exploitations agricoles de la région, la principale source d'eau d'irrigation provient des alluvions quaternaires et les aquifères schistes-quartzites fracturés sous-jacents. L'eau souterraine pompée est destinée à l'irrigation en goutte-à-goutte des palmiers-dattiers. L'exploitation étudiée est dotée d'un bassin en terre de 6 500 m^3 (fig. 6) qui stocke une partie des eaux de crue dérivées de l'oued. La section mouillée moyenne du bassin est d'environ 3.250 m^2 et sa profondeur est égale à 2 m. En plus de l'eau souterraine pompée pour l'irrigation, une partie de l'eau de crue stockée dans ce bassin est pompée et injectée dans un système de tuyaux enterrés pour irriguer les palmiers. Un puits à l'intérieur du bassin a été creusé manuellement avant la construction des berges du bassin et la plantation du palmier au fond dudit bassin.

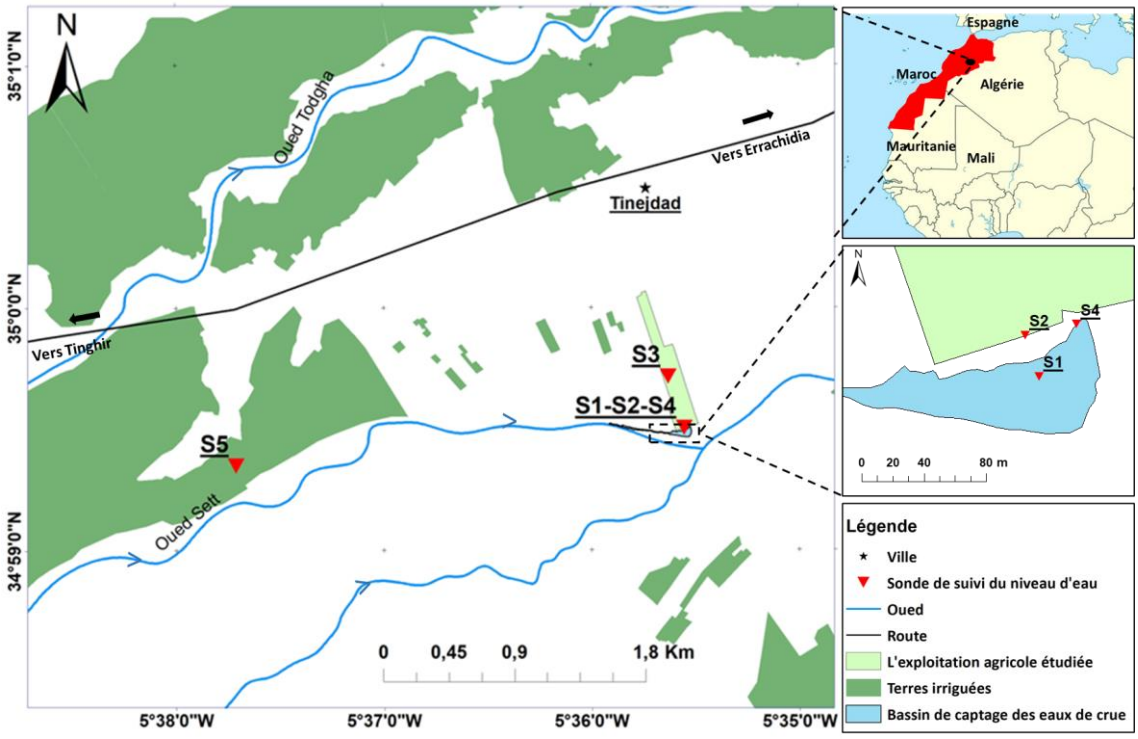

Figure 5. Carte de l'exploitation agricole étudiée et des points automatisés de suivi du niveau d'eau

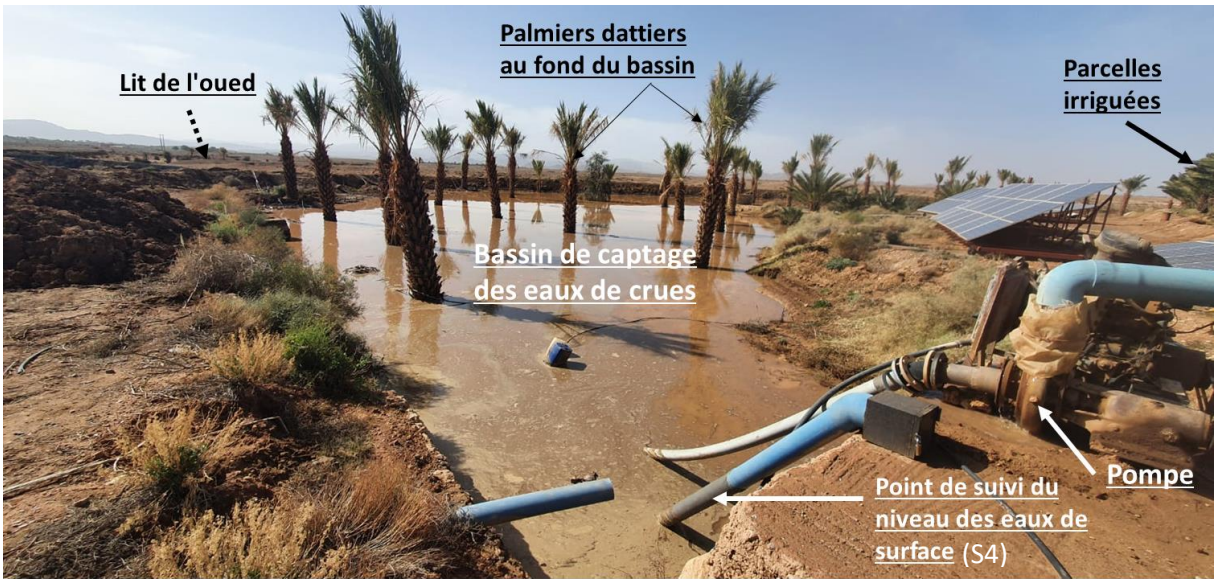

Figure 6. Le bassin de captage des eaux de crue et le point de pompage (photo prise un jour après l'inondation qui s'est produite le 9 mars 2021)

2.A.2. La méthodologie

2.A.2.1. Dispositifs de suivi et mesures sur le terrain

Un protocole expérimental a été établi pour évaluer les volumes d'eau de crue stockés dans le bassin soit pour alimenter le système d'irrigation gravitaire de l'exploitation agricole par pompage direct depuis le bassin, soit pour recharger la nappe par infiltration. Les niveaux d'eau ont été suivis à l'aide des sondes barométriques automatiques qui sont installés dans le puits, de 12m en profondeur, situé à l'intérieur du bassin de captage des eaux de crues (S1), dans deux forages situés respectivement à 30 m et 360 m dudit bassin (S2 et S3), au fond du bassin (S4), et dans un puits de 18m en profondeur situé à environ 3 km en amont de la ferme et à 180 m de l'oued (S5) (fig. 5). Les deux forages S2 et S3 qui ont des profondeurs supérieures à 80 m permettaient de mesurer les niveaux d'eau dans les aquifères de quartzite et de schiste de l'Ordovicien. S5 est suffisamment éloigné pour ne pas être influencé par la recharge du bassin, mais plutôt pour observer l'effet de la recharge naturelle de l'oued (fig. 5). Pour estimer les variations du niveau d'eau en absence de biais, un capteur supplémentaire a permis d'enregistrer la pression atmosphérique qui est ensuite soustraite de la pression mesurée sous l'eau. Tous les capteurs ont été réglés pour enregistrer la pression absolue à un intervalle de 10 minutes. La profondeur des capteurs dans les puits et les forages a été maintenue stable moyennant des câbles à longueur fixe reliés à la surface du sol. Des mesures piézométriques ont été prises manuellement à différentes profondeurs d'eau pour valider les mesures automatiques. Les coordonnées (X, Y, Z) des points de mesure ont été obtenues à partir d'un levé topographique et les niveaux d'eau souterraine mesurés dans les forages S1, S2, S3 et S5 ont permis d'obtenir les niveaux

piézométriques (e.g. en mètres au-dessus du niveau de la mer). Les mesures nécessaires à nos analyses n'ont pas été enregistrées pour les crues 4 et 6 parce que les capteurs S3 et S4 ont été hors service.

Le volume et la surface mouillée du bassin ont été obtenus par un levé topographique comprenant 117 points situés au fond et sur les berges du bassin. Les coordonnées (X, Y, Z) des points levés ont été traitées dans un logiciel de système d'information géographique (S.I.G.) pour obtenir la relation hauteur-volume-surface. Les données journalières de pluviométrie et d'évapotranspiration (ET_0), estimées par la méthode de Penman-Monteith, ont été obtenues à partir de la station météorologique la plus proche située à Goulmima (31.68312 ; 4.95869), à 23 km au nord de l'exploitation agricole.

2.B.2.2. Le calcul du bilan d'eau dans le bassin

Le bilan hydrique de bassin tient compte à la fois de l'infiltration et du volume d'eau pompé. Son équation (Eq. 1) est résolue en absence des précipitations et des apports de l'oued. Ces conditions prévalent la plupart de l'année car la région a un climat aride. Les flux de déstockage de l'Eq. 1 sont présentés dans la figure 7.

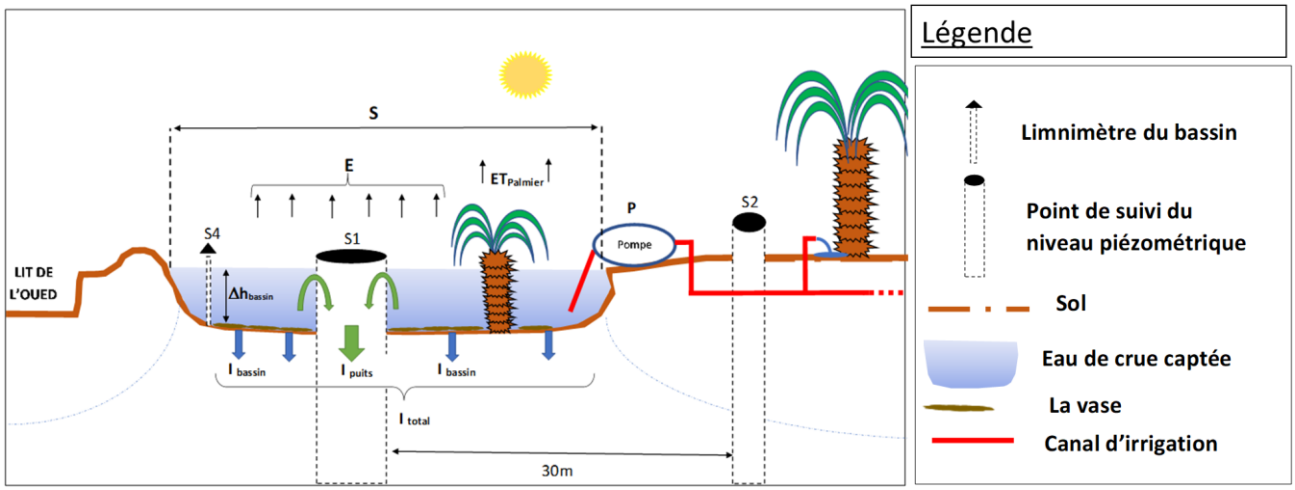

Figure 7. Schéma conceptuel du bassin, des points de suivi et du flux de déstockage

$$\Delta h_{bassin} = I_{total} + \frac{P}{S} + E + ET_{palmier} \quad (1)$$

Où :

- I_{Bassin} est le taux d'infiltration depuis le fond du bassin (m);
- I_{puits} est l'infiltration depuis le puits au milieu du bassin (m);
- $I_{total} = I_{bassin} + I_{puits}$
- **P** le volume d'eau pompé depuis le basin pour l'irrigation de l'exploitation agricole (m^3) ;
- **S** est la section mouillée du bassin (m^2) ;
- Δh_{bassin} est la variation du niveau d'eau dans le bassin mesuré en S4 (m), considérée positive en cas de décroissance du niveau d'eau dans le bassin ;
- **E** est l'évaporation depuis le bassin (m) ;

- **$ET_{palmier}$** est l'évapotranspiration des palmiers dattiers plantées au fond du bassin (m) ;

Pour déterminer le taux d'infiltration, on résout l'équation 1 pour différentes périodes de quelques heures chacune, qui correspondent à des différentes plages de niveaux d'eau. Ces périodes de calcul ont été sélectionnées sur la base de trois critères : (i) le dernier événement de crue a eu lieu plus d'un jour auparavant afin d'éviter les écoulements retardés depuis l'oued vers le bassin, (ii) ces périodes de calcul sont sélectionnées en période nocturne en absence du pompage direct depuis le bassin pour l'irrigation (c'est-à-dire entre 18 heures et 6 heures), (iii) l'abaissement du niveau d'eau est presque constant au fil du temps. Ces trois conditions ont été confirmées en vérifiant la série chronologique du niveau d'eau du bassin (S4) à des intervalles de 10 minutes. Sur ces périodes de calcul, l'équation 1 se simplifie et donne l'équation 2 :

$$\mathbf{I_{total}} = \mathbf{\Delta h_{basin}} - \mathbf{E} - \mathbf{ET_{palmier}} \quad \textbf{(2)}$$

L'évaporation (E) et l'évapotranspiration (ET_0) sont supposées constantes au pas de temps horaire lors d'une journée. L'évaporation directe du plan d'eau depuis le bassin (**E** en mm/j**)** est déduite à partir de l'ET_0 en utilisant le « facteur de réduction (**f**) » de PENMAN. Ce facteur est pratiquement constant et un peu supérieur à 0,8 (0,82 en moyenne) (Riou, 1971). Ainsi, la relation entre l'évaporation en Bac Colorado (E_{bac}) et l'évapotranspiration de référence (ET_0) s'écrit :

$$\boldsymbol{E_{bac}} = \boldsymbol{ET_0} / \boldsymbol{f} \quad \textbf{(3)}$$

L'évaporation à partir du bac de Colorado s'écrit (avec k est le coefficient du bac de Coloradot, il est égal à 0,8)

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{k} * \boldsymbol{E_{bac}} = \boldsymbol{k} * (\frac{\boldsymbol{ET_0}}{\boldsymbol{f}}) \quad \textbf{(4)}$$

L'évaluation des besoins en eau des palmiers (**$ET_{palmier}$** en mm/j) est donnée par la formule suivante (FAO, 1998)

$$\boldsymbol{ET_{palmier}} = \boldsymbol{k_c} * \boldsymbol{ET_0} \quad \textbf{(5)}$$

Kc est le coefficient cultural du palmier dattier. Il dépend du stade végétatif et il varie de 0,8 et 1. Afin de ne pas sous-évaluer l'$ET_{palmier}$, Kc a été prise égal à 1. Néanmoins, le biais lié aux estimations de E et ET_0 est négligeable car Δh est d'un ordre de grandeur supérieur à E et $ET_{palmier}$ sur les périodes de calcul utilisées.

Les taux d'infiltration dans le puits situé à l'intérieur du bassin ont été calculés à l'aide de l'équation 2 appliquée à S1 (avec $ET_{palmier}$ = 0) pour des niveaux d'eau inférieurs à ceux assurant la connexion hydraulique avec le bassin, c'est-à-dire lorsque les séries temporelles S1 et S4 ont divergé au cours d'une période de déstockage.

La relation entre le niveau d'eau du bassin (h) et son taux d'infiltration total (I_{total}) a été modélisée à l'aide de l'équation 6.

$$\boldsymbol{I_{total} = a \times h + b} \quad \textbf{(6)}$$

Où les paramètres a et b ont été déterminés par régression linéaire pour chaque période de déstockage suivant une crue. Les intervalles d'incertitude autour des valeurs d'infiltration dépendent de ceux de ($E+ET_{palmier}$) qui varient entre 0 et 2×ET0.

La lame d'eau pompée (*q* =P/S *(in m)*) a été dérivée de l'équation 6 et appliquée sur des périodes (t) avec des baisses quasi-constantes du niveau d'eau, qui durent généralement plusieurs heures dans la journée. Le début et la fin de ces périodes ont été identifiés à partir de la série temporelle de S4 en visualisant les points de rupture dans la pente de la courbe ($\Delta h/t_{avec\ pompage} > \Delta h/t_{sans\ pompage}$). Les intervalles d'incertitude sur les valeurs *q* estimées ont été évalués en incluant - ou non - le temps transitoire des changements de pente résultant de l'inertie du système.

Les volumes d'eau infiltrés et pompés ont été estimés en multipliant I_{total} et *q*, respectivement, par la section mouillée du bassin correspondante qui est obtenue à partir de la courbe HVS de bassin. L'incertitude des volumes pompés a été calculée en ajoutant l'incertitude de l'infiltration à l'incertitude de la section mouillée du bassin, en notant que la courbe HVS est pseudo-linéaire sur les intervalles des calculs du bilan hydrique. L'incertitude de la section mouillée pour un niveau d'eau h dans le bassin correspond à la surface mouillée de h ± 1cm. L'incertitude sur le volume pompé (c'est-à-dire la différence entre p_{max} et p_{min}) est calculée comme suit

$$\mathbf{p_{max}} = (\mathbf{\Delta h} - \boldsymbol{I} + \boldsymbol{\sigma}) * \boldsymbol{S}_{\mathbf{max}}$$
$$\mathbf{p_{min}} = (\mathbf{\Delta h} - \boldsymbol{I}_{\mathbf{max}} - \boldsymbol{\sigma}) * \boldsymbol{S}_{\mathbf{min}} \quad \textbf{(7)}$$

Où :

- $\mathbf{I_{max}}$ est le débit d'infiltration surestimé du fond de bassin (m);
- $\mathbf{S_{max}}$ est la section mouillée du bassin calculée à l'aide de la courbe HSV pour un niveau d'eau de (h + σ) (m²)
- $\mathbf{S_{min}}$ est la section mouillée du bassin calculée à l'aide de la courbe HSV pour un niveau d'eau de (h – σ) (m²)
- $\boldsymbol{\sigma}$ = 1×10^{-2} m

2.A.2.3. Le bilan d'eau dans le sol des parcelles irriguées

Nous avons étudié la possibilité d'une recharge de la nappe par une sur-irrigation en évaluant l'eau stockée dans le sol de la zone irriguée. Etant donné que l'infiltration sous la zone racinaire dépend à la

fois des paramètres du sol et des plantes, la réserve en eau utile du sol a été estimée sur la base de la profondeur d'enracinement et de la texture du sol (Bruand et al. 2004). La texture du sol des parcelles irriguées a été obtenue à partir d'une carte pédologique de la région (ORMVA-Tf, 1987) et la valeur de la profondeur d'enracinement des palmiers dattiers a été estimée selon Sedra (2003). Le besoin en eau journalier des palmiers dattiers a été obtenue à partir des travaux de Sabri et al. (2017) et d'El-Khoumssi (2017), dont les zones d'étude sont situées dans la région du Drâa-Tafilalet. Le besoin en eau les palmiers dattiers a été estimée en mm à partir du produit du nombre de palmiers dattiers irrigués, du besoin en eau journalier du palmier dattier et de l'inverse de la surface irriguée par les eaux de crue. Bien que nos observations sur le terrain aient montré que la palmeraie était subdivisée en six blocs d'irrigation, notre entretien avec l'agriculteur a révélé des incertitudes concernant la durée d'irrigation et la superficie effectivement irriguée dans chaque bloc.

2.A.2.4. La modélisation analytique de la recharge

La réponse de l'aquifère suite aux infiltrations depuis le bassin de captage des eaux de crues a été simulée à l'aide d'un modèle analytique développé par Dewandel et al. (2021) qui se base sur la solution analytique de Hantush (1967). Le modèle suppose que l'aquifère est infini et homogène et que l'infiltration se produit depuis un bassin rectangulaire dont la surface équivalente est la surface moyenne du bassin réel obtenue à partir de la courbe HVS et de la série temporelle S4. Le modèle tient compte de paramètres prédéterminés et de paramètres calibrés, et considère des taux d'infiltration variables. Les paramètres prédéterminés comprennent les dimensions (longueur et largeur ($2x_L$;$2y_L$)) du bassin rectangulaire (fig. 8), l'emplacement et le rayon du puits de recharge, l'emplacement des points de mesures du niveau des eaux souterraines par rapport au bassin et l'épaisseur de l'aquifère, qui est de 30 m selon la Division des Ressources en Eau (1977). Cette épaisseur représente à la couche de dépôt d'alluvions quaternaires saturées et la partie supérieure fracturée de l'aquifère ordovicien. Les paramètres de calibrage comprennent à la fois la perméabilité (K) et la porosité efficace (S) de l'aquifère.

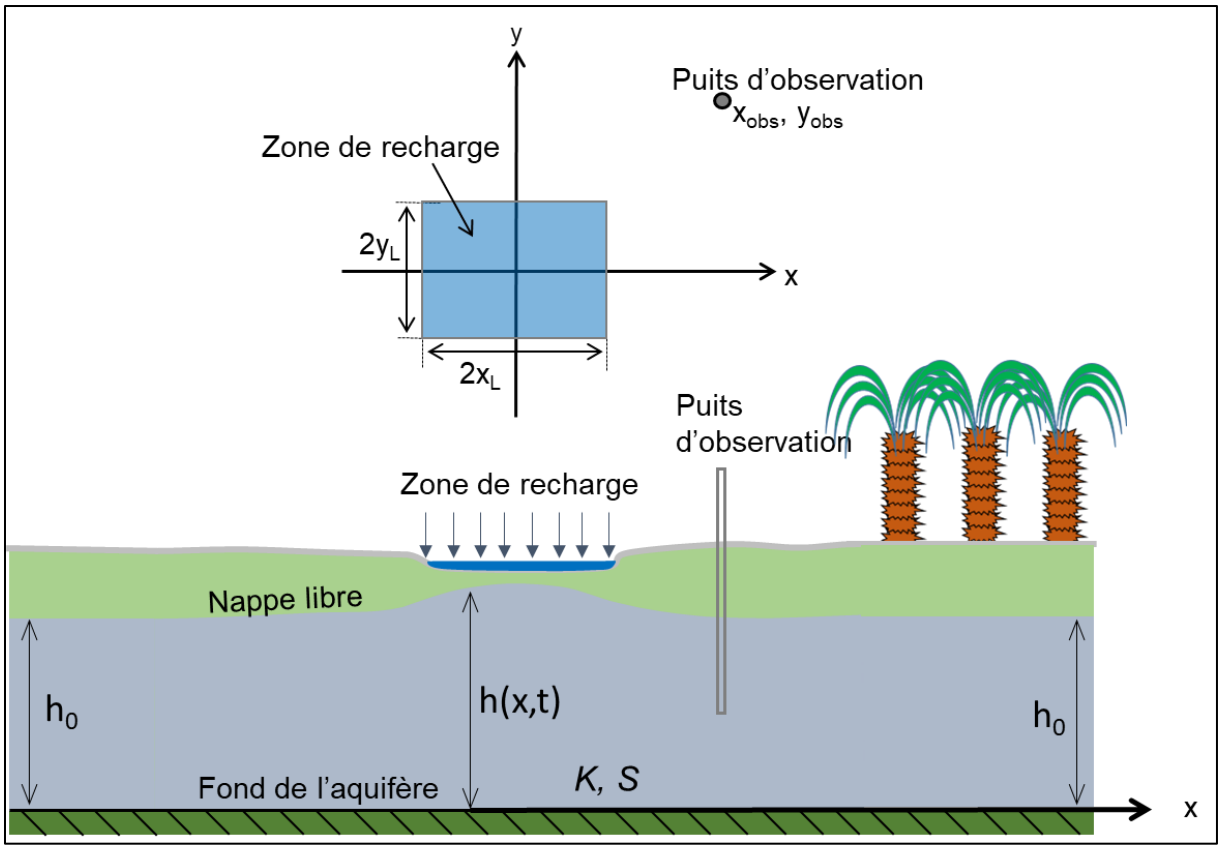

Figure 8. Schéma conceptuel de la recharge de la nappe phréatique à partir du bassin

Les variables d'entrée comprennent également les taux d'infiltration depuis le bassin et du puits de recharge (I_{bassin} + I_{puits} dans l'Eq. 1), en fonction du temps, et les pertes de charge quadratiques du puits de recharge. Sur la base des enregistrements de la sonde S5 indiquant l'absence de réponse de la piézométrie aux inondations de l'oued, la recharge des eaux souterraines à partir de l'oued a été supposée négligeable dans le modèle. Il est important de noter que la section mouillée du bassin diminue pendant la phase de déstockage alors que cette variation n'est prise en compte dans le modèle utilisé. Par conséquent, nous avons d'abord évalué le biais possible causé par le choix d'un bassin rectangulaire fixe dans le temps dans le modèle. Une analyse de sensibilité a été réalisée sur base des observations des crues 1 et 2 au point S2. Dans un premier temps, le rapport longueur/largeur a été modifié afin d'évaluer l'impact d'un changement de forme du bassin (d'un bassin carré à un bassin rectangulaire) et la surface d'infiltration modélisée a également été modifiée tout en respectant le principe de conservation de la masse. Pour la première analyse, des rapports longueur/largeur de 1, 2 et 3,5 ont été testés pour une surface mouillée moyenne de 3 250 m². Dans la seconde analyse, des surfaces de 2 700, 4 680 et 5 790 m² ont été testées. Le principe de conservation de la masse est appliqué au volume instantané d'eau infiltrée qui est lui-même le produit de la surface d'infiltration et des taux d'infiltration instantanés.

Le modèle a été calibré pour toutes les crues enregistrées, en sélectionnant les valeurs des paramètres correspondant à la meilleure adéquation visuelle entre les niveaux piézométriques observés et celles simulés au point S2. La calibration visuelle a porté principalement sur les taux d'augmentation et de diminution et sur la hauteur maximale de remplissage. Cette procédure de calibration a été reprise aux points S3 et S1.

Enfin, le modèle analytique utilisé dans la présente étude (Dewandel et al., 2021) comprend un seul bassin à partir duquel l'infiltration se produit. La recharge due au retour d'eau suite à la sur-irrigation pourrait expliquer la différence entre les résultats observés et modélisés à partir d'un seul bassin et pourrait également expliquer le monticule piézométrique observé au point S3. Par conséquent, une méthode d'essai-erreur a été utilisée pour estimer les flux de retour d'irrigation potentiels sous la zone racinaire qui pourraient expliquer l'élévation piézométrique observée au point S3. Pour ce faire, nous avons supposé que le flux d'infiltration sous la zone racinaire se produisait depuis les parcelles irriguées seulement de manière homogène.

Section B : Recharge de la nappe à l'échelle de l'exploitation agricole dans le pré-Sahara marocain

Cette section fait l'objet d'un article scientifique accepté et prêt pour publication dans un numéro spéciale de la revue PIAHS :

Khardi Y, Lacombe G, Dewandel B, Taky A, Maréchal JC, Hammani A, Bouarfa S. 2023. Managed groundwater recharge at the farm scale in pre-Saharan Morocco. Special Issue: IAHS2022 – Hydrological sciences in the Anthropocene: Past and future of open, inclusive, innovative, and society-interfacing approaches. https://doi.org/10.5194/piahs-100-1-2023

Dans cette section nous étudions en détail un dispositif de captage des eaux de crues à l'échelle d'une exploitation agricole. Il s'agit d'un bassin en terre où les eaux de crues sont stockées. L'infiltration à partir de ce bassin permet de recharger la nappe. Ce bassin est également équipé d'un système de pompage qui permet une irrigation gravitaire des palmiers dattiers. Un protocole expérimental de suivi des niveaux d'eau et une modélisation analytique ont été menés en 2021 pour comprendre l'impact local du captage des eaux de crues sur la nappe.

Les résultats de cette section montrent que l'effet de la recharge de la nappe par infiltration depuis le bassin de captage des eaux de crues est limité et il n'atteignait pas un piézomètre à une distance de 360m du bassin en raison de l'absence d'un réseau de fractures suffisamment dense. En outre, le taux d'infiltration varie après chaque événement de crues à cause de l'envasement du bassin. Nos recherches montrent également que l'effet de l'infiltration naturelle depuis l'oued et la recharge depuis un puits à l'intérieur du bassin sont faibles.

2.B.1. Introduction

The pre-Saharan Morocco has experienced a significant expansion of pumped agriculture since the 1980s. The pressure on the already scarce groundwater resource has increased considerably. Nowadays, some farms have set up groundwater recharge structures (Todd and Mays, 2004) to increase the supply of irrigation water from wadi floods (Hashemi et al., 2013).

Several authors have evaluated the feasibility of farm-level groundwater recharge (Arshad et al., 2014; Godwin et al., 2022) and the performance of farm-level well recharge structures (Soni et al., 2020).

Worldwide, infiltration rates from groundwater recharge basins vary between 0.3 and 1m/d. The volumes infiltrated into these basins are between 600 and 14.000 m^3d^{-1} (Wuilleumier and Seguin, 2008). The capacity of the injection wells fluctuates between 1700 and 6000 m^3d^{-1} (Casanova et al., 2013). It is important to assess the effect of infiltration on groundwater. The analytical solution developed by Hantush (1967) for assessing the growth and decay of the groundwater mound below an infiltration basin is worldwide used and very accurate compared to numerical modelling (Warner et al. 1989; Carleton 2010). Recently, this solution has been adapted to the case where a pumping or recharge well is located near or inside the recharge area (Dewandel et al. 2021)

In this paper, we assess the infiltration rate of a farm-scale recharge basin from its water balance and we evaluate its impact on the local aquifer. The research site, located in Ferkla (Morocco), consists of a floodwater storage basin built around and above a well formerly used for pumping.

2.B.2. Material and methods

2.B.2.1. Study site

The farm studied (5°02'01.00''W, 31°29'40.00''N) is located in the arid region of Drâa-Tafilalet (Morocco). It is located on the left bank of Oued Satt which originates in the Anti-Atlas. Its runoff reaches the farm during flood periods only. The average rainfall is around 141mm/year with a standard deviation of around 70mm (Ait Bouijane station 1961-2018). This farm relies on the quaternary formations of Oued Satt and pump water from both quaternary and underlying fractured schist-quartzite aquifers. Like all the farms in Ferkla, this farm is irrigated by pumping groundwater throughout the year. It has a basin that allows partial storage of flood water and local recharging of the water table. After filling the basin with a maximum storage area and depth of about $6400m^2$ and 2.8m, respectively, part of the stored water is pumped during the day using solar energy, and channeled into a pipe to irrigate the date palms by gravity. Some palm trees are planted inside the storage basin.

2.B.2.2. Material

In order to assess groundwater recharge from the flood basin and its well, four barometric probes recording surface and groundwater levels every 10min (fig 9) were installed in the basin, in its well and in two boreholes located 30m and 360m away from the basin. The depth of the well inside the basin does not exceed 12m. The other boreholes are more than 80m deep and capture water from the Ordovician quartzite and the shale aquifers. One probe placed in the open air aimed to remove the effect of atmospheric pressure variations. Measured water levels were converted to piezometric levels based on a topographic survey.

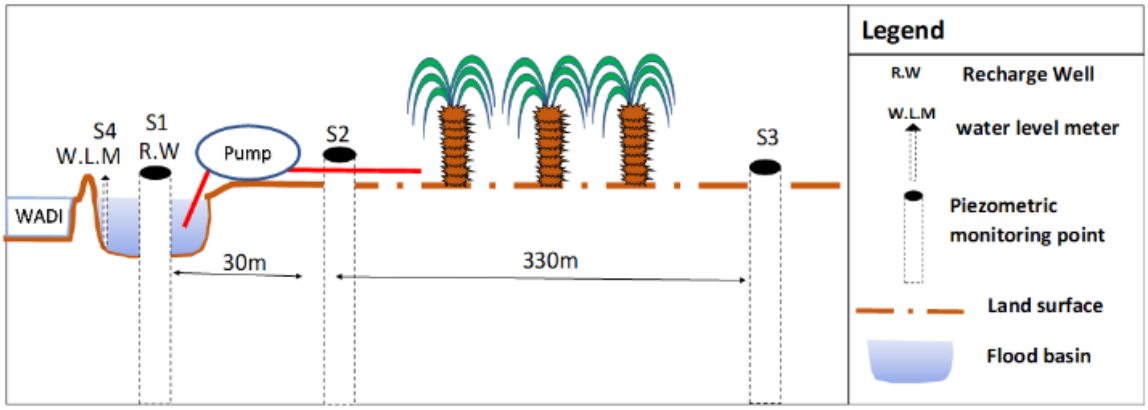

Figure 9. Cross section of the study site and location of the probes S1, S2, S3 and S4

Periodic measurements with a manual piezometer aimed to validate automatic records. A topographic survey of the basin was carried out and processed in Arcgis to derive the height-volume-surface curve of the basin. Daily precipitation and evapotranspiration data calculated by the Penman-Montheith method (ET_0) were available from the nearest meteorological station (Goulmima, ORMVA-Tf).

2.B.2.3. Methods

2.B.2.3.1. Calculating the infiltration rate from the basin

Infiltration from the basin and its well were estimated from the simplified water balance equation of the basin (8) obtained during periods with no pumping, no inflow and no rainfall. During these periods visually identified on the graph depicting temporal variations of the basin water level, its water balance simplifies as follows:

$$\mathbf{\Delta h}_{basin} = -(q + E + ET_{palm}) \quad \textbf{(8)}$$

where Δh is the variation of the basin water level (mm) over time, q, E and ET_{palm} are the infiltration (mm), the evaporation (mm) and the evapotranspiration of the palm trees located in the basin, respectively, over the same period of time.

These computation periods were selected at least 24 hours after each flood event to ensure the absence of delayed inflow that can bias the infiltration rate calculations, and during the nighttime

when there is no pumping from the basin. Infiltration rates were assessed for different water levels in the basin, over time periods of a few hours and exhibiting near-constant drawdown. E and ET_{palm} were calculated with equations (9) and (10), respectively:

$$\boldsymbol{E = k * E_{tank} = k * (\frac{ET_0}{f})} \quad \textbf{(9)}$$

where k is the coefficient of the Colorado tank measuring E_{tank}, usually equal to 0.8, f is the Penman reduction factor of ET_0 used to estimate E_{tank}, equal to 0.82 for semi-arid areas (Riou, 1971).

$$\boldsymbol{ET_{palm} = k_c * ET_0} \quad \textbf{(10)}$$

where kc is the cultural coefficient of the date palm. It depends on the vegetative stage and varies between 0.8 and 1. In order not to under evaluate ET_{palm}, Kc was fixed to 1.

The infiltration rates q calculated over the selected periods were plotted against their corresponding mean basin water level (h_{basin}). Spurious values likely caused by undetected pumping or probe dysfunctions were removed from the sample (3 values among 17). Linear regressions with R^2 exceeding 0,94 were fitted to the scatter plots of each recorded flood using equation 11:

$$\boldsymbol{q = a * h_{basin} + b} \; ; \quad \textbf{(11)}$$

Different values for the parameters a and b were obtained for each flood event because of the change in the geometry and permeability of the basin due to siltation. On one of the recorded floods, the infiltration rates were calculated for shallow depths. Thus, two infiltration equations were calculated for this flood, depending on the water level, either lower or greater than 1.4m.

Infiltration rates of the well located in the basin were computed for water levels lower than those ensuring hydraulic connection with the basin. These infiltration rates were calculated from the well discharge curve. The calculation intervals selected from this curve are the same for all recorded flood events. This velocity is multiplied by the cross-sectional area of the well to derive the seepage rate from the well.

2.B.2.3.2. Analytical modelling of groundwater recharge

In order to model the response of the water table below the studied recharged basin, the analytical model developed by Dewandel et al. (2021) which is based on the equations of Hantush (1965 and 1967), was used. The model accounts for the aquifer characteristics (storage coefficient, permeability and aquifer thickness) and for the infiltration flow as a function of time (Eq. (11)), to estimate piezometric variations.

For the purpose of the modelling, the geometry of the basin was approximated to a rectangle with the same average area of ponded water. The aquifer thickness used in the model was assigned to 30m,

which corresponds to the saturated quaternary deposit and the top of fractured Ordovician aquifer (Ressources en Eau Du Maroc Tome III, 1977). An additional probe located in the vicinity of the wadi 3km upstream showed no reaction of the piezometry during floods. Therefore, the natural river recharge was assumed to be negligible and not accounted in the model.

The calibration of the model was performed by adjusting the permeability and storage coefficients values so as to obtain a visually satisfactory match between observed and simulated piezometric levels at S2 and S3.

2.B.3. Results and discussion

2.B.3.1. Description and analysis of piezometric and limnimetric measurements

During the three recorded flood events (fig. 10), the water levels in the basin (S4) and in the well inside the basin (S1) initiate a sharp and rapid increase (filling stage), immediately followed by a smoother drop (emptying stage). At the beginning of the emptying stage, S1 and S4 follow similar decrease rates, suggesting that the well and the basin are hydraulically connected. The staircase-like shape of the curves (Fig. 10) reflects the intermittence of pumping that occurs during daytime to irrigate the farm.

After several days of nearly synchronized drawdown of S1 and S4, S1 initiates a much sharper decrease, suggesting that the well disconnects from the basin.

The monitoring points S1 and S2 respond to all filling of the basin. The maximum groundwater level reached during each flood in S2 decreases overtime. In contrast, point S3 did not seem to respond to the first and the third flood, and its response to the second flood is delayed.

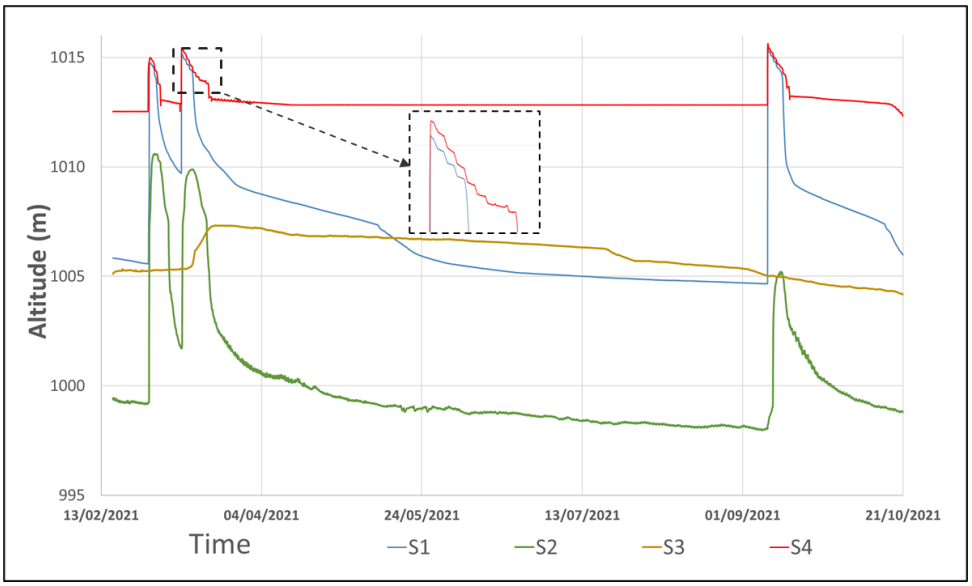

Figure 10. Water level in the basin (S4) and in the piezometric monitoring points (S1, S2, S3)

2.B.3.2. The infiltration rate in the basin

The basin infiltration rates vary between 1 and 9 mm.h^{-1}. Figure 11 shows that the infiltration rates decrease overtime (from flood 1 to flood 3). This is assumed to result from the silting up of the basin and the local clogging of the bottom. Furthermore, it is found that the rates are proportionally linear to the depth of water in the basin; the infiltration equations from the basin are thus deduced.

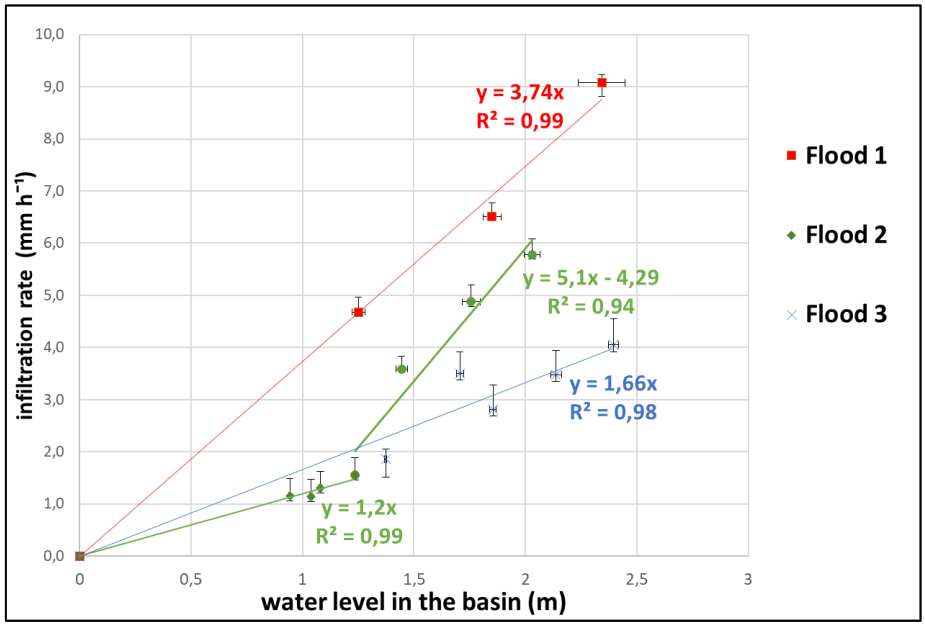

Figure 11. Infiltration rates as a function of water depth in the basin

The basin has a maximum storage capacity of approximately 6500 m^3, the volumes of water infiltrated during the three events fluctuate between 2100 and 3150m^3. Moreover, the sum of evaporation and evapotranspiration accounts for 3%, 7% and 14% of the infiltrated volumes for the first, second and third floods, respectively. As for the infiltration flows from the recharge well, they do not exceed 0.7m^3.h^{-1}, i.e. less than 17m^3 per day. These values are negligible compared to the infiltration from the basin, which are between 240 and 380m^3 per day. Thus, we are only interested in infiltration from the bottom of the basin in the remainder of this work.

2.B.3.3. Calibration of the groundwater recharge model

The model was first fitted at point S2 where all the fills of the basin induced an increase of the observed and modelled water levels. The permeability and the aquifer storativity values yielding the best match between the observed data and the simulated values are K=4.5x10^{-6} m s^{-1} and S=1.6x10^{-3}, respectively (fig. 12). The third flood was fitted with a permeability coefficient, K=3.5x10^{-6} m s^{-1}, slightly lower than that used for the first two floods (fig. 13). This slight difference may be due to errors in flow estimation and to the artefact of modelling the basin as a rectangle. These K and S values are typical of free fractured aquifers (Dewandel et al., 2006; Lachassagne et al., 2021).

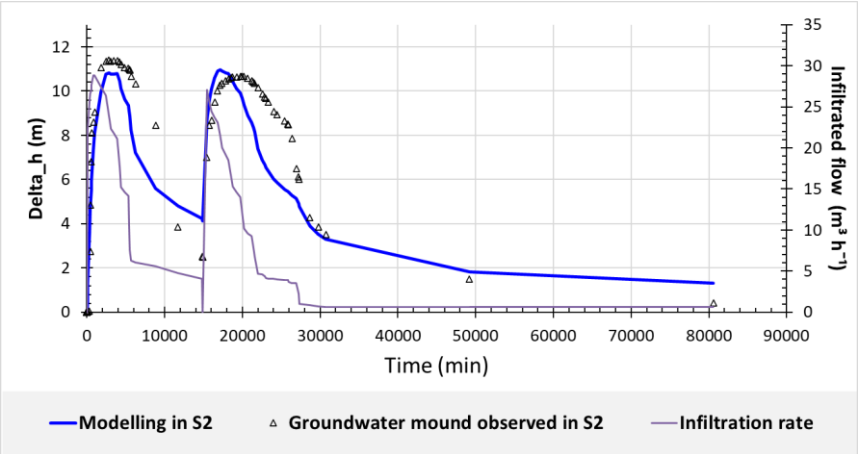

Figure 12. Modelling of groundwater recharge in S2 for floods 1 and 2 (K=4.5x10-6 m.s-1 ; S=1.6x10-3)

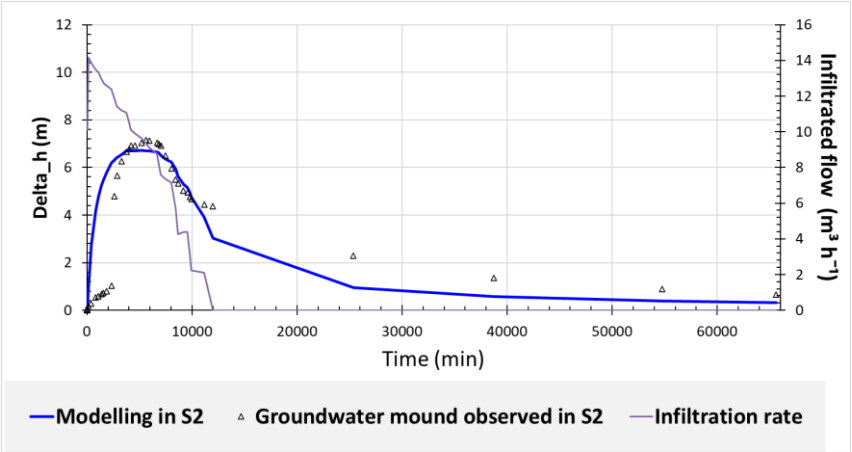

Figure 13. Modelling of groundwater recharge in S2 for flood 3 (K=3.5x10^{-6} m.s^{-1} ; S=1.6x10^{-3})

The calibration values of permeability and storage coefficient obtained in S2 were also used in S3 (Fig 14 and 15), assuming that the structure of the aquifer is homogenous. However, the model could not reproduce the groundwater level fluctuations observed in S3 during the three floods, even for other K and S values. Thus, we may conclude that there is no direct link between the infiltration basin and S3. The piezometric increase in S3 may be due to the return flow from irrigation (Fig 14) that occurs around this point.

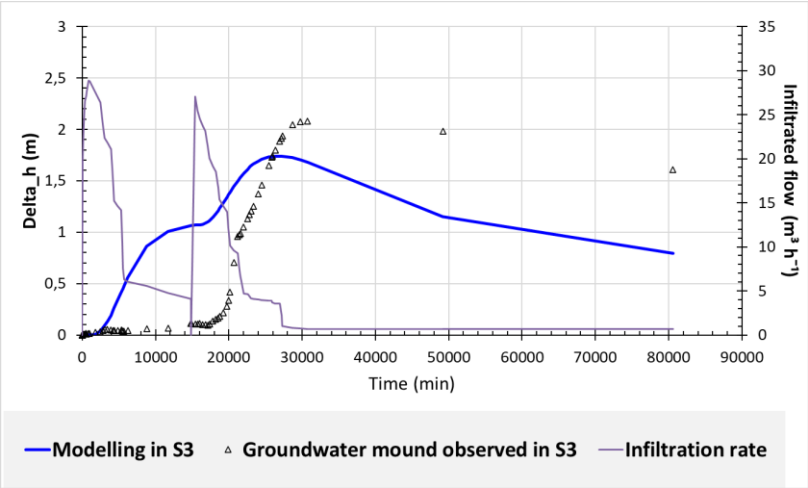

Figure 14. Modelling of groundwater recharge in S3 for floods 1 and 2 (K=4.5x10^{-6} m.s^{-1} ; S=1.6x10^{-3})

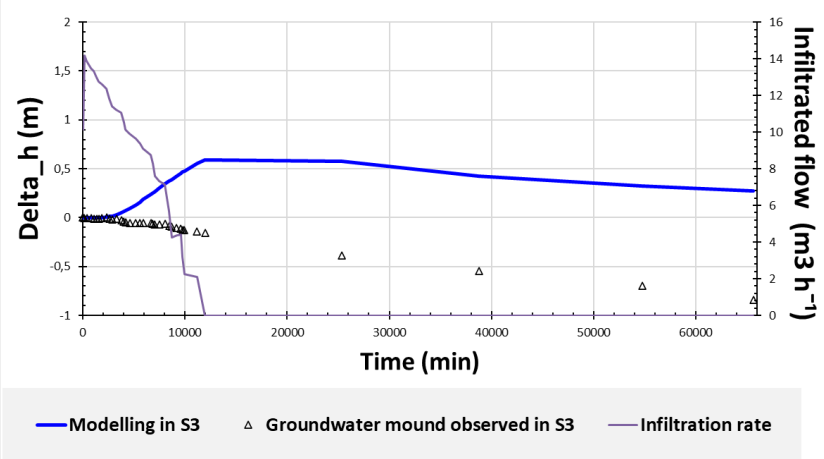

Figure 15. Modelling of groundwater recharge in S3 for the 3rd flood (K=3.5x10^{-6} m.s^{-1} ; S=1.6x10^{-3})

2.B.4. Conclusion

Modelling that takes into account the infiltration flow rates from the basin and does not take into account the natural recharge of the wadi and the recharge by the well has allowed the response at piezometer (S2) to be reproduced reasonably. This modelling also shows that a farther piezometer (S3) does not respond to the pond infiltration, probably due to the absence of a dense enough fractures network to connect the aquifer on a large scale. After each flood, infiltration rates decrease because of the basin siltation. In summary, this recharge basin allows the groundwater to be recharged locally over a radius less than 360m, which may improve locally water sustainability for agriculture. Also, we show that on this experimental site, the recharge induced by the wadi is weak, likely because of its low-permeable bed, and that the recharge induced by the well inside the basin is weak too, probably due partial or total clogging by the flood deposit.

Section C : Complément de Résultats

Dans cette section, nous complétons l'analyse du dispositif de captage des eaux de crues à l'échelle de l'exploitation agricole. Les résultats de la modélisation et de l'expérimentation présentés ci-dessous complètent ceux de la section B. Ces résultats ont pour objectifs la compréhension de la dynamique de la recharge de la nappe et des utilisations de l'eau de crues captée à l'échelle de l'exploitation agricole oasienne. Ces résultats incluent les bilans d'eau du bassin de captage des eaux de crues et du sol des parcelles irriguées, la réflexion liée à la modélisation analytique amorcée dans la section précédente est développée dans cette section. Finalement, cette section repose sur une série de données plus longue qui inclue les mesures exploitées dans la section A et forme deux années de mesures (février 2021 jusqu'à février 2023).

Les résultats de cette section montrent qu'environ 56% du volume d'eau de crues collecté est exploité pour l'irrigation de l'exploitation agricole et qu'en moyenne 40% des eaux stockées dans le bassin s'infiltrent avec un taux d'infiltration d'environ 90 mm/j. La modélisation analytique montre que l'effet de la recharge depuis le bassin est limité vue l'hétérogénéité de l'aquifère. Le bilan hydrique combiné à la modélisation par la méthode d'essai-erreur montre que la recharge par le retour de l'eau d'irrigation peut prendre place en cas d'irrigation prolongée dans le temps suite à deux crues successives.

Cette section conclut que le captage des eaux de crue dans un bassin de stockage pour la recharge de la nappe et l'irrigation de surface est une technique efficace pour minimiser les pertes par évaporation depuis le bassin de captage des eaux de crues. Cet usage conjugué des eaux de crues renforce l'apport en eau d'irrigation et réduit la pression sur les eaux souterraines. En revanche, l'accès aux eaux de crues est conditionné par la proximité de l'exploitation agricole au réseau hydrographique et son effet cumulé mériterait d'être analysé et anticipé à l'échelle du bassin versant.
Un article scientifique autour de ces résultats a été soumis à la revue Irrigation and Drainage.

Yassine Khardi, Guillaume Lacombe, Benoit Dewandel, Ali Hammani, Abdelilah Taky, and Sami Bouarfa. Conjunctive use of floodwater harvesting for managed aquifer recharge and irrigation on a date palm farm in Morocco. Irrigation and Drainage

2.C.1. Résultats complémentaires

La série de mesure représentée dans la figure 16 inclue les mesures présentées dans la section B auxquelles ont été ajoutées les données de mesure de la deuxième année. Bien que le niveau piézométrique au forage S2 réponde à tous les remplissages du bassin, le maximum atteint après chaque crue diminue au fil de temps. Cette tendance négative reflète probablement la tendance décroissante de la piézométrie à grande échelle, mais elle pourrait également être due à l'envasement progressif du bassin, qui réduit le taux d'infiltration. Les deux dernières crues (n° 5 et 6) ont été assez courtes par rapport aux précédentes. Le niveau piézométrique dans le forage S3 n'a augmenté qu'après les deux premières crues et, malgré les crues suivantes, il a continué à diminuer progressivement jusqu'à la fin des enregistrements.

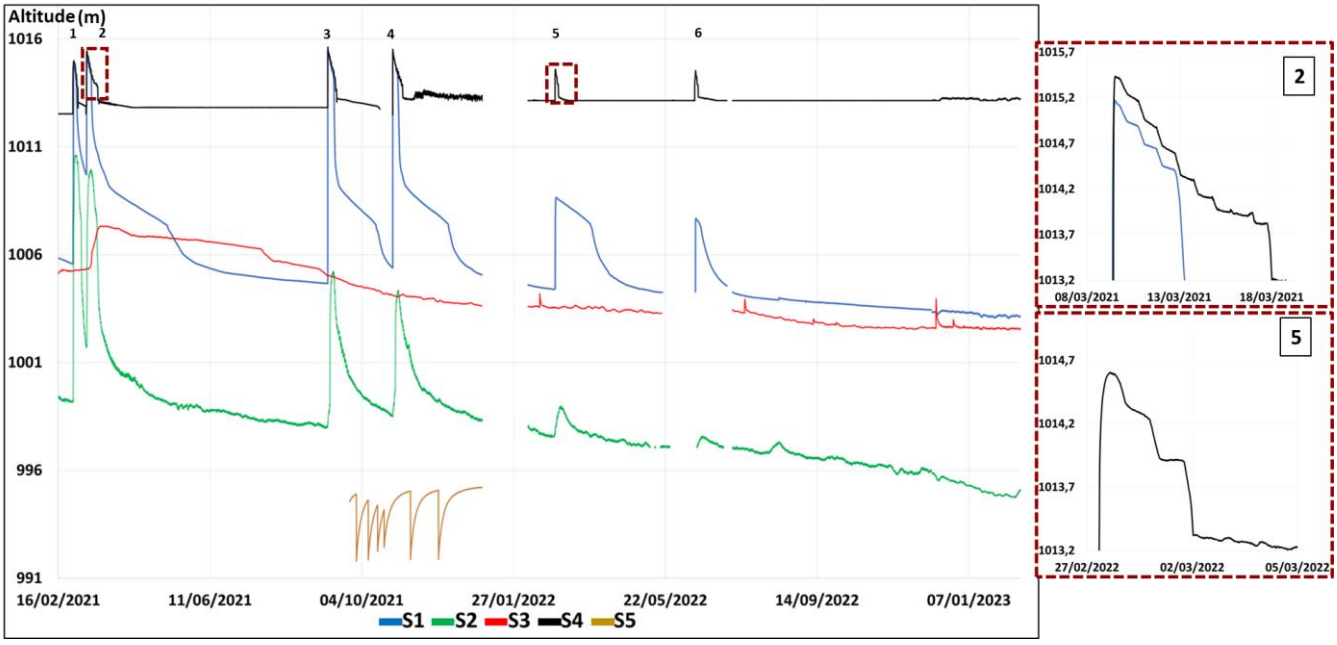

Figure 16. Graphique du niveau d'eau dans le bassin et dans les piézomètres

2.C.2. Le bilan d'eau dans le bassin

La figure 17 montre que l'évaporation et l'évapotranspiration représentent moins de 3,8 % des eaux de crue captées sur la période de suivi. Les volumes journaliers infiltrés ont les mêmes ordres de grandeurs des volumes infiltrés dans d'autres contextes (Dillon et al., 2019 ; Wuilleumier et Seguin, 2008).

Le rapport entre le volume d'eau infiltré et le volume d'eau pompé pour chaque événement de crue décroit au fil du temps, passant de 1/1 pour la première crue à 1/3 pour la dernière (fig. 17). Cette diminution est probablement due à deux facteurs : (i) moins d'eau s'infiltre à cause de l'envasement du fond du bassin et de plus en plus d'eau est pompée pour irriguer les palmiers dattiers ; (ii) le volume

total d'eau de crue captée diminue après chaque crue, passant de 4 724 m^3 pour la première à 2 473 m^3 pour la dernière. Ainsi, les faibles niveaux d'eau correspondants dans le bassin sont à l'origine des faibles taux d'infiltration. La maximisation de l'irrigation lorsque l'infiltration diminue permet donc de réduire la perte d'eau depuis le bassin par évaporation.

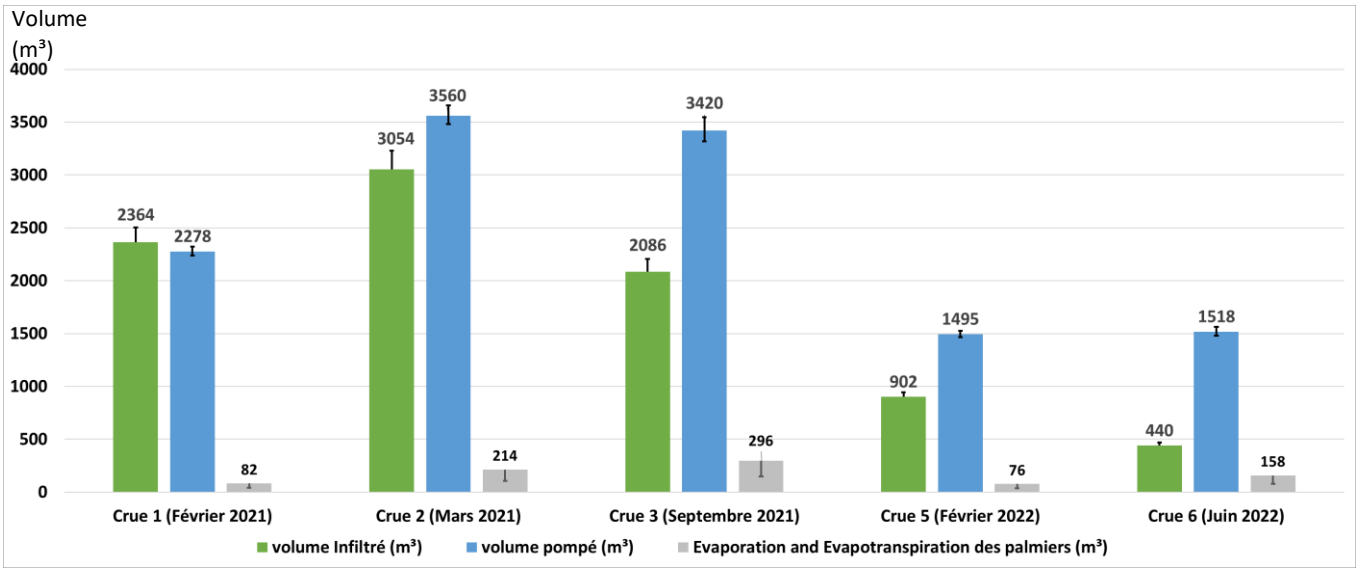

Figure 17. Bilan d'eau du bassin de captage des eaux de crues (en m³) pour les événements de crues enregistrés

2.C.3. Le bilan d'eau dans le sol des parcelles irriguées

Sur la base d'une profondeur d'enracinement moyenne prise entre 1 et 1,5m et d'une réserve utile du sol de 1,5 $mm.cm^{-1}$, la réserve d'eau dans le sol de la zone racinaire des palmiers dattiers est supérieure à 150mm. Le besoin en eau journalier des palmiers dattiers est de 2,2 ; 4,5 et 6,4 mm pour les mois de février, septembre et juin, respectivement (El-Khoumssi, 2017). Le tableau 1 résume l'apport moyen d'eau par irrigation et la consommation des palmiers dattiers lors des épisodes d'irrigation par les eaux de crues captées.

Tableau 1. La confrontation de l'offre en eau d'irrigation et du besoin en eau du palmier dattier et le retour d'eau potentiel vers la nappe

Evénement	Période d'irrigation par les eaux de crues (jour)	La lame d'eau apportée au sol par irrigation (mm)	La lame d'eau consommée par les palmiers dattiers (mm)	Flux potentiels de retour d'eau vers la nappe (mm)
Crue 1 (27 Février, 2021)	**3**	**31**	**7**	**24**
Crue 2 (9 Mars, 2021)	**8**	**49**	**27**	**22**
Crue 3 (8 Septembre, 2021)	**6**	**47**	**30**	**17**
Crue 5 (27 Février, 2022)	**3**	**21**	**7**	**14**
Crue 6 (13 Juin, 2022)	**3**	**21**	**19**	**2**

La méthode d'essai-erreur déployée dans la modélisation de la recharge de la nappe à partir de l'ensemble de la zone irriguée a montré qu'un flux d'infiltration moyen compris entre 2 et 3 mm/j étalé sur huit jours à partir du début de la deuxième crue pourrait générer une réponse de la nappe similaire à celle observée au point S3 après la deuxième inondation. Le tableau 1 montre qu'un tel taux ne pourrait se produire que lors des deux premières inondations. En particulier, lors de ces deux premières crues, une différence entre les observations et la modélisation de l'infiltration depuis le bassin seul n'a été observée que lors de la vidange du bassin de captage des eaux de crues.

2.C.4. La modélisation analytique de la recharge de la nappe

Concernant le test de sensibilité relatif au choix d'une surface du bassin rectangulaire fixe en modélisation, nous avons déduit que les erreurs liées à ce choix sont moins importantes que d'autres erreurs non prises en compte par le modèle (par exemple, l'estimation du taux d'infiltration, l'envasement du bassin et l'hétérogénéité de l'aquifère). D'une part, le modèle a été recalibré en augmentant la porosité d'environ 40% tout en gardant le même coefficient de perméabilité pour les crues 1 et 2 lors de la modification du rapport longueur/largeur avec la même surface d'infiltration. D'autre part, presque aucune modification du coefficient de perméabilité et de la porosité n'a été nécessaire pour des surfaces d'infiltration de 2 700 m² et de 4 680 m². Pour calibrer le modèle à une surface d'infiltration de 5.790m², nous avons réduit la porosité de 20%.

La figure 18 montre les niveaux piézométriques observés et modélisés au point S2. Tous les remplissages du bassin ont conduit à une augmentation des niveaux d'eau observés et modélisés. Les valeurs du coefficient de perméabilité $K=4{,}1\times10^{-6}$ m s^{-1} et de la porosité efficace $S=3{,}5\times10^{-3}$ ont conduit

à la meilleure correspondance entre les valeurs observées et simulées pour la première et la deuxième inondation (dans laquelle nous avons supposé une zone d'infiltration modélisée équivalente à la surface moyenne du bassin réel). Ces valeurs sont typiques des aquifères fracturés libres (Dewandel et al., 2006 ; Lachassagne et al., 2021).

La troisième, la cinquième et la sixième crues ont été respectivement modélisées en utilisant les coefficients de perméabilité et de porosité efficace ($K=2.2\times10^{-6}$m s-1 ; $S=8.5\times10^{-3}$), ($K=3\times10^{-6}$m s^{-1} ; $S=5\times10^{-2}$) et ($K=5\times10^{-6}$m s-1 ; $S=3\times10^{-2}$). Les crues se sont produites à des niveaux piézométriques de plus en plus profonds et l'aquifère a mis plus de temps pour répondre au flux d'eau résultant de l'infiltration (cf. Fig.18). Étant donné que le modèle ne tient pas compte de la profondeur de l'aquifère (l'infiltration est supposée atteindre directement la zone saturée de l'aquifère), nous avons dû augmenter la porosité et/ou réduire la perméabilité du modèle pour tenir compte de la réponse tardive de l'aquifère.

Les valeurs de K et S révèlent une diminution générale de la diffusivité ($\nu=T/S$; $T=B.K$ avec B : épaisseur de l'aquifère) de l'aquifère modélisé. Il convient de noter que, dans ce contexte, les valeurs de la perméabilité restent cohérentes, mais que les porosités sont des valeurs apparentes. En d'autres termes, le système met plus de temps à réagir à l'infiltration du bassin, qui est modélisé tout en diminuant sa diffusivité ν. Ce délai peut s'expliquer par le fait que l'aquifère est plus profond et que la zone non saturée est par conséquent plus épaisse. Il pourrait également s'expliquer par le fait que la fracturation de l'aquifère diminue avec la profondeur et qu'une partie de l'eau infiltrée n'est pas interceptée dans le point de mesure S2 (Guihéneuf et al., 2014).

Au début de la troisième et de la sixième crue, nous avons observé une différence remarquable entre les niveaux piézométriques observés et modélisés. Cette différence peut être liée à l'estimation du taux d'infiltration (en raison de l'envasement du fond du bassin).

Lors de la première et de la deuxième crue, nous avons observé une différence entre les niveaux piézométriques observés et modélisés pendant la vidange du bassin (de t=4 000 min à t= 14 000 min et de t=20 000 à t=30 000 min respectivement, pour la première et la deuxième crue ; figure 18). Cette différence pourrait s'expliquer par l'égouttement retardé de la zone non saturée dû à l'irrigation, qui atteint l'aquifère plus tard et contribue à sa recharge.

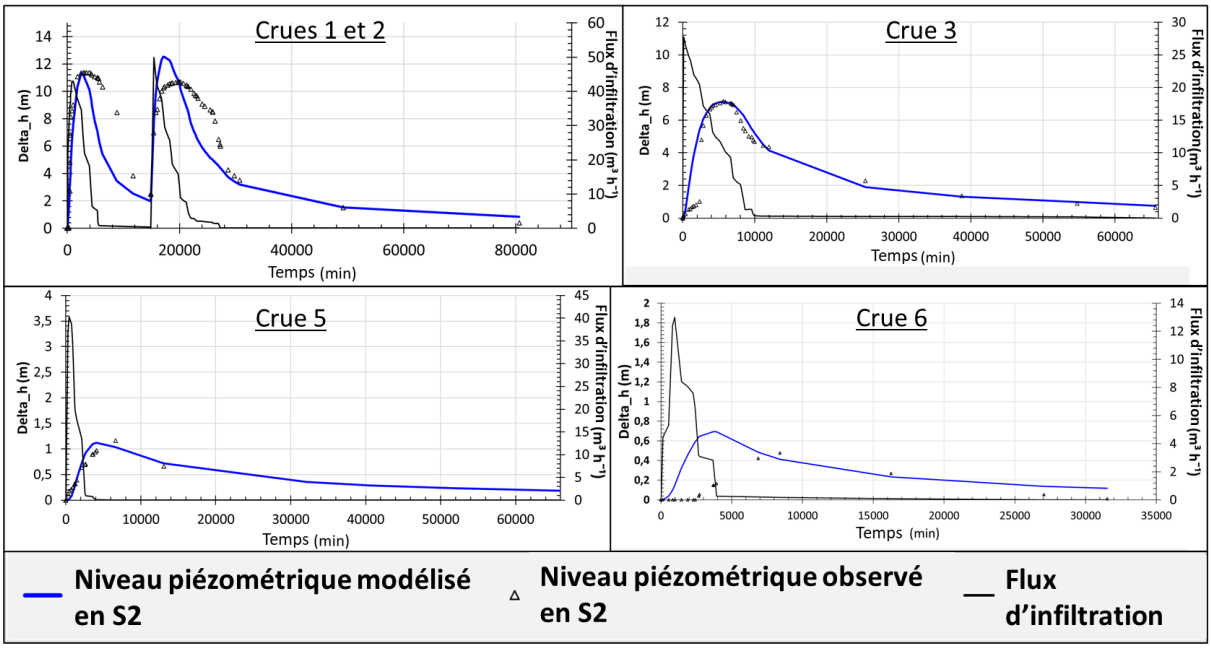

Figure 18. Modélisation de la recharge de la nappe en S2, crues 1 et 2 ($K=4.1\times10^{-6}$m s^{-1} $S=3.5\times10^{-3}$), crue 3 ($K=2.2\times10^{-6}$m s^{-1} $S=8.5\times10^{-3}$), crue 5 ($K=3\times10^{-6}$m s^{-1} $S=5\times10^{-2}$), crue 6 ($K=5\times10^{-6}$m s^{-1} $S=3\times10^{-2}$)

Au point S3, les mêmes valeurs de conductivité hydraulique et de coefficient d'emmagasinement obtenues lors de la calibration de S2 ont été appliquées en supposant l'homogénéité de la structure de l'aquifère (fig. 19). Cependant, le modèle n'a pas été en mesure de reproduire les fluctuations piézométriques similaires à celles observées au point S3. D'autres valeurs du coefficient de perméabilité et de la porosité ont été testées mais en vain. De plus, les fluctuations observées au point S3 n'étaient pas liées aux cycles de remplissage et de vidange du bassin (fig. 16). On peut donc en déduire qu'il existe une déconnexion hydraulique entre les points S2 et S3. Le flux de retour d'irrigation dans la zone autour du point S3 peut être la cause de l'augmentation piézométrique observée après la deuxième crue. Par conséquent, ce flux de retour d'irrigation peut être modélisé dans S3 sans tenir compte de l'infiltration à partir du bassin étant donné la déconnexion hydraulique.

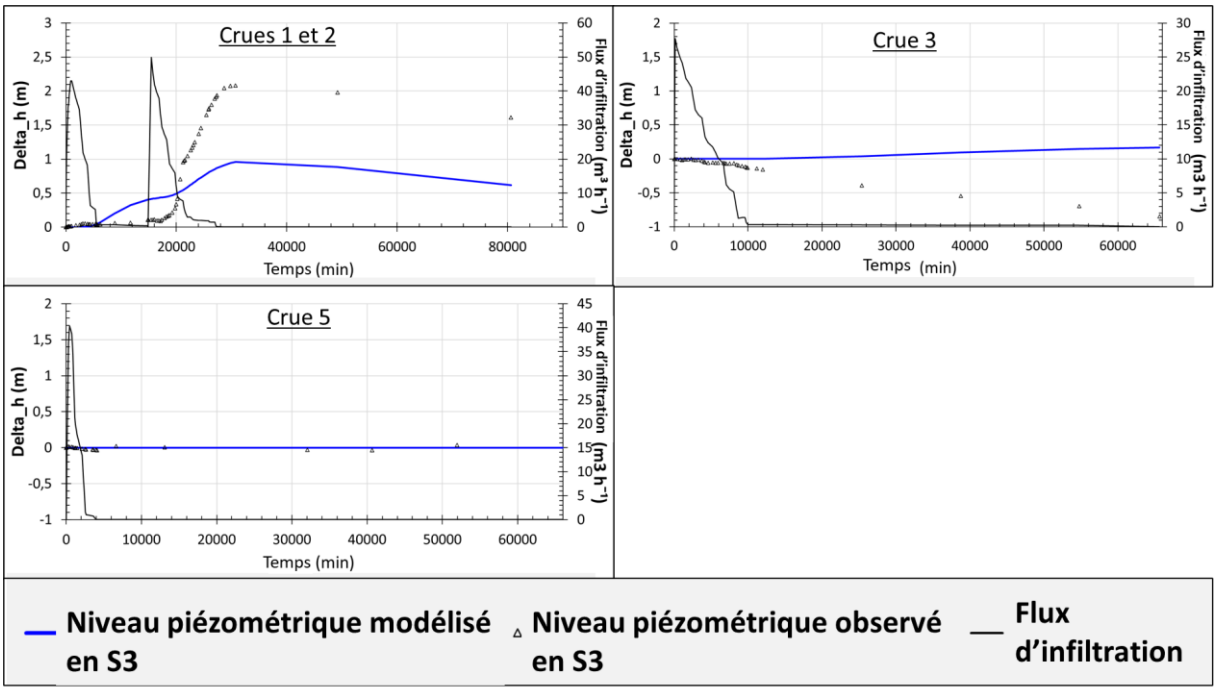

Figure 19. Modélisation de la recharge de la nappe en S3, crues 1 et 2 ($K=4,1.10^{-6}$m/s $S=3,5.10^{-3}$), crue 3 ($K=2,2.10^{-6}$m/s $S=8,5.10^{-3}$), crue 5 ($K=3.10^{-6}$m/s $S=5.10^{-2}$), crue 6 ($K=5.10^{-6}$m/s $S=3.10^{-2}$)

Conclusion du chapitre

Le captage des eaux de crue dans un bassin pour la recharge de la nappe et l'irrigation gravitaire des palmiers dattiers s'est avérée une technique efficace pour minimiser les pertes par évaporation dans la zone aride du sud-est du Maroc. Suite au colmatage du bassin après chaque crue (réduisant ainsi son taux d'infiltration), l'eau stockée est de plus en plus pompée pour l'irrigation, compensant toute augmentation de l'évaporation. Malgré l'hétérogénéité de l'aquifère qui complique sa réponse piézométrique à l'infiltration, et explique probablement les écoulements retardés, la modélisation analytique a permis de comprendre le comportement de l'aquifère. Nous suggérons également qu'une sur-irrigation intentionnelle et susceptible de provoquer le retour des eaux d'irrigation vers l'aquifère, pourrait même contribuer à la recharge de l'aquifère sous la parcelle cultivée en cas de plusieurs crues successives sur une courte période. De surcroit, l'emplacement du bassin s'est révélé sous-optimal en termes de potentiel de recharge. On peut en déduire qu'en termes d'importance et d'utilité pour l'agriculteur, l'utilisation directe des eaux de crue pour l'irrigation prime sur la recharge des eaux souterraines. Malgré ces conditions globales de recharge assez faibles, beaucoup moins favorables que dans la plupart des sites de recharge artificielle des nappes dans le monde, l'exploitation agricole étudiée a un meilleur accès aux ressources en eau par rapport à ses voisins éloignés du réseau hydrographique. Sans un accès direct à la ressource en eau de surface occasionnellement depuis l'oued, de nombreuses exploitations voisines seraient obligées de réduire ou d'abandonner leurs terres cultivées en raison de la baisse continue et régionale des niveaux d'eau souterraine.

Cette étude démontre les avantages du captage des eaux de crue dans la région de Drâa-Tafilalet, mais révèle plusieurs contraintes qui doivent être prises en compte par les planificateurs des ressources en eau. A l'échelle locale, le recours à la recharge artificielle de la nappe par de nouveaux agriculteurs peut être entravée non seulement par son coût prohibitif, mais aussi par la nature invisible de la ressource en eau souterraine : la recharge profitera-t-elle à la personne qui la pratique ou à son voisin? Seule une étude hydrogéologique locale détaillée peut répondre à cette question. Cependant, ces différentes contraintes pourraient probablement être surmontées en optant pour des systèmes collectifs de captage des eaux de crue plutôt que des dispositifs individuels. Étant donné que ce système est alimenté par des eaux de crues chargées et turbides qui colmatent à la fois le bassin et réduisent ses capacités de stockage et d'infiltration, avec des effets à la fois négatifs et positifs sur la disponibilité de l'eau en surface et souterraine pour l'irrigation, des études supplémentaires sont nécessaires pour identifier les pratiques de gestion optimales de ces eaux de crues. La quantification des retours d'eau par l'irrigation à l'aide de mesures sur le terrain, la modélisation et des études dédiées est également nécessaire.

Au niveau régional, le développement de cette technique est une stratégie prometteuse pour renforcer la résilience face à un climat de plus en plus sec et à la surexploitation des ressources en eau souterraine. Cependant, il est nécessaire de prévoir l'effet cumulé de la réplication de cette technique. En multipliant les prélèvements d'eau le long des oueds, les crues peuvent complétement captées sur des distances plus courtes et les agriculteurs peuvent également être tentés de pomper davantage d'eau, privant ainsi les utilisateurs d'eau situés plus en aval. Tous ces aspects devraient être pris en compte dans les études futures.

Chapitre 3

Pomper ou disparaître : le dilemme du renforcement des khettaras par le pompage solaire dans les oasis du Maroc

Ce chapitre a été publié sous forme d'article scientifique dans la revue Cahiers Agricultures

Khardi Y, Lacombe G, Kuper M, Taky A, Bouarfa S, Hammani A. 2022. Pomper ou disparaître : le dilemme du renforcement des khettaras par le pompage solaire dans les oasis du Maroc. *Cah. Agric.* 32: 1. https://doi.org/10.1051/cagri/2022030

Chapitre 3 : Pomper ou disparaître : le dilemme du renforcement des khettaras par le pompage solaire dans les oasis du Maroc

Ce chapitre permet de mettre en lumière les enjeux liés à la mobilisation et la gestion des eaux souterraines dans les anciennes oasis irriguées par les Khettaras.

Les khettaras sont des ouvrages ancestraux d'approvisionnement en eau qui permettent de mobiliser les eaux souterraines gravitairement et d'instaurer une organisation sociale autours de l'eau d'irrigation. En revanche, ces systèmes ancestraux connaissent une régression importante de leurs débits voire un tarissement complet. Actuellement, certains ayants-droit des khettaras oasis ont choisi d'introduire des moyens modernes de pompage alimentés par l'énergie solaire et de les associer au système traditionnel des khettaras. Ce chapitre discute ce choix jugé dilemmatique. Nous analysons i/ les circonstances d'émergence, ii/ la conception technique et iii/ les adaptations apportées au règles ancestrales liées à ce dispositif qui associe le système ancestral des khettaras dans ses dimensions techniques et organisationnelles au pompage par énergie solaire.

Les résultats de ce chapitre montrent que dans un contexte : (i) de développement des forages individuels équipés par des pompes électriques et des panneaux photovoltaïques au niveau des extensions agricoles, (ii) et de baisse piézométrique continuelle suite à l'augmentation des prélèvements (agriculture et alimentation en eau potable) et la diminution de la recharge de la nappe, les irrigants des oasis des khettaras ont choisi de renforcer cette dernière à partir des puits alimentés par l'énergie solaire. Ce renforcement des khettaras permet de maintenir l'accès collectif à l'eau souterraine et contribue à la surexploitation de la nappe.

Ce chapitre déduit que l'association de la khettara au pompage par énergie solaire témoigne de la dynamique et de la robustesse du tissu sociale à l'intérieur des oasis irriguées par les khettaras mais il ne garantirait pas leur survi à long terme. L'émergence de ce dispositif nommé « khettara solaire » révèle la difficulté d'une gestion durable des eaux souterraines ; En absence d'un arbitrage des allocations à l'échelle du bassin versant, nombreux seront les agriculteurs qui seront condamnées à abandonner leurs terres par manque d'eau.

3.1. Introduction

Les khettaras (également appelés qanats, foggaras, karez ou galerias dans d'autres pays ou continents) sont des galeries souterraines conçues pour mobiliser les eaux des nappes phréatiques et les conduire par gravité jusqu'aux oasis irriguées (Ahmadi et al., 2010). Ces ouvrages hydrauliques ont été inventés il y a plus de 2000 ans dans la région arménienne et perse et se sont diffusés rapidement en Asie, au Moyen Orient et en Méditerranée (Lightfoot, 1996). Idda et al. (2021) considèrent la khettara comme un dispositif hydraulique ingénieux associé à un ensemble de règles de gestion permettant d'entretenir le dispositif et de distribuer l'eau aux collectifs d'agriculteurs. La conception et l'entretien du dispositif hydraulique et les règles de gestion dépendent de la dynamique des ressources en eau souterraine. Par exemple, la fréquence et l'ampleur des travaux d'entretien de la khettara sont intimement liés au régime d'écoulement de la khettara, et par extension aux dynamiques et caractéristiques de la nappe, notamment sa productivité, son taux de rabattement et son taux de réalimentation.

Depuis des siècles, les agriculteurs ont adapté les khettaras dans les territoires oasiens en intervenant à la fois sur le dispositif hydraulique et sur les règles de gestion. Par exemple, pour pallier son tarissement, la galerie de la khettara peut être approfondie, prolongée ou ramifiée par des branches latérales (Bisson, 1992). Pour s'affranchir de la raréfaction de la main-d'œuvre servile suite aux transformations sociales profondes (par ex. diminution de la stratification sociale et changement dans les rapports de force entre des acteurs multiples pour l'accès à l'eau) (Ghodbani et al., 2017), les ayants droit de la khettara peuvent décider d'allouer des droits d'eau à des métayers (khammes) pour bénéficier de leur savoir-faire dans l'entretien des khettaras ou peuvent aussi recruter périodiquement de la main-d'œuvre (Idda et *al.*, 2021).

De ce fait, l'évolution permanente des conditions physiques (par ex. baisse de la nappe) et sociales (comme la nécessité d'intégrer des héritiers) nécessaires au fonctionnement de la khettara requiert des ajustements qui en font un lieu d'innovation (Bisson, 2003 ; Idda et al. 2017). Cette action collective robuste a permis d'entretenir et d'adapter le dispositif et plus largement assurer la survie des oasis durant plusieurs siècles (Jouve, 2012). Ainsi, le système des khettaras connaît des interactions continues entre le dispositif hydraulique, la ressource en eau souterraine et les règles de gestion.

À partir des années 1980, la zone de Ferkla située entre les villes d'Errachidia et de Tinghir (Maroc) a connu une augmentation continue des superficies irriguées par pompage, grâce à des fonds issus de l'émigration puis l'encouragement des pouvoirs publics via des subventions (Lightfoot, 1996 ; Jouve, 2012). La croissance démographique et les changements d'habitude ont augmenté la demande en eau potable. Les khettaras se tarissent ainsi sous l'effet du rabattement de la nappe dû aux pompages pour l'eau potable et pour l'irrigation des exploitations agricoles, mais aussi du fait d'une réduction de la

recharge de la nappe causée par l'utilisation accrue de l'eau à l'amont et la baisse des apports des eaux de crues liée au changement climatique (Johannsen et al., 2016).

Les communautés oasiennes font ainsi aujourd'hui face à un dilemme : leurs khettaras menacées de disparition, certains collectifs ont choisi à leur tour d'équiper des forages ou des puits avec des pompes électriques et des panneaux solaires pour alimenter leurs khettaras et sauver leur accès collectif à l'eau souterraine, tout en contribuant ainsi à faire davantage baisser la nappe. L'alternative consistant à ne rien faire aboutirait à une exclusion de facto de la nappe souterraine (dans un contexte où les pompages individuels des alentours ne sont pas contrôlés) et à la disparition de la khettara, tandis que l'accès individuel à la nappe est une solution coûteuse et s'éloignant du mode d'accès collectif usuel, qui n'est pas envisageable pour l'ensemble des agriculteurs. Dans cet article, nous analysons la mise en place du pompage solaire dans des khettaras de la région de Ferkla et nous mettons en discussion le choix cornélien des communautés oasiennes dans le sud du Maroc : pomper comme les autres ou voir disparaître leurs khettaras, ce qui menacerait leur mode de vie.

3.2. Méthodologie

3.2.1 Zone d'étude

Les oasis de Ferkla se situent dans la région du Drâa-Tafilalet dans le sud-est du Maroc. La pluviométrie moyenne annuelle y est de l'ordre de 125 mm pour la période 1977–2012. L'évaporation mensuelle varie entre 60 et 85 mm en janvier, et entre 275 et 512 mm en juillet. Le cumul annuel de l'évaporation est de l'ordre de 2930 mm à la Station d'Ait Bouijane. L'étude concerne la zone de Ferkla qui se trouve à l'aval du bassin versant de Todgha. Les eaux de surface des deux principaux oueds (Todgha et Tanguerfa, qui rejoint le Todgha pour former l'oued Ferkla) n'atteignent ces oasis qu'en périodes de crues, lors desquelles les agriculteurs pratiquent occasionnellement l'irrigation par épandage de crue (Fig. 20). La seule ressource en eau disponible en continu est donc souterraine.

Les neuf oasis irriguées par les khettaras de la zone d'étude sont réparties sur une superficie de 420 ha et reposent toutes sur les aquifères de l'Anti-Atlas qui sont caractérisés par des discontinuités et des faibles porosités. Les khettaras qui se trouvent au nord de la zone d'étude drainent la nappe libre de l'infra-cénomanien, alimentée par des écoulements en provenance du Haut Atlas, dont la profondeur varie entre 6 et 91 m. La transmissivité de cet aquifère varie entre 10^{-4} à $2{,}51 \times 10^{-2}$ m2/s et sa productivité fluctue entre 0,07 et 102 L/s (Oulidi et al., 2008). Les khettaras qui se trouvent au centre de la zone d'étude drainent des aquifères quaternaires alimentés essentiellement par les écoulements de surface de l'oued Tanguerfa prenant sa source dans le Haut Atlas. Les khettaras de la zone sont donc alimentées à partir de nappes renouvelables.

D'après l'inventaire réalisé conjointement en 2005 par l'Agence japonaise de coopération internationale (JICA) et l'Office régional de mise en valeur agricole de Tafilalet (ORMVA-Tf), la commune de Ferkla-Essoufla compte 29 khettaras cumulant une longueur totale d'environ 74 km. Dix khettaras sont actuellement asséchées et les débits moyens sortants des khettaras en écoulement varient entre moins de 1 et 19 L/s. L'activité agricole dans les extensions irriguées (hors oasis), basée sur le pompage individuel dans les nappes souterraines, s'est développée dans la zone de Ferkla depuis les années 1980. La superficie agricole de ces extensions dépasse aujourd'hui de loin la superficie des oasis. Les agriculteurs de ces extensions ont des profils différents : des émigrés de retour au pays avec des fonds permettant d'investir dans l'agriculture ; des notables des villes environnantes ; et des jeunes oasiens, souvent installés sur des superficies plus modestes.

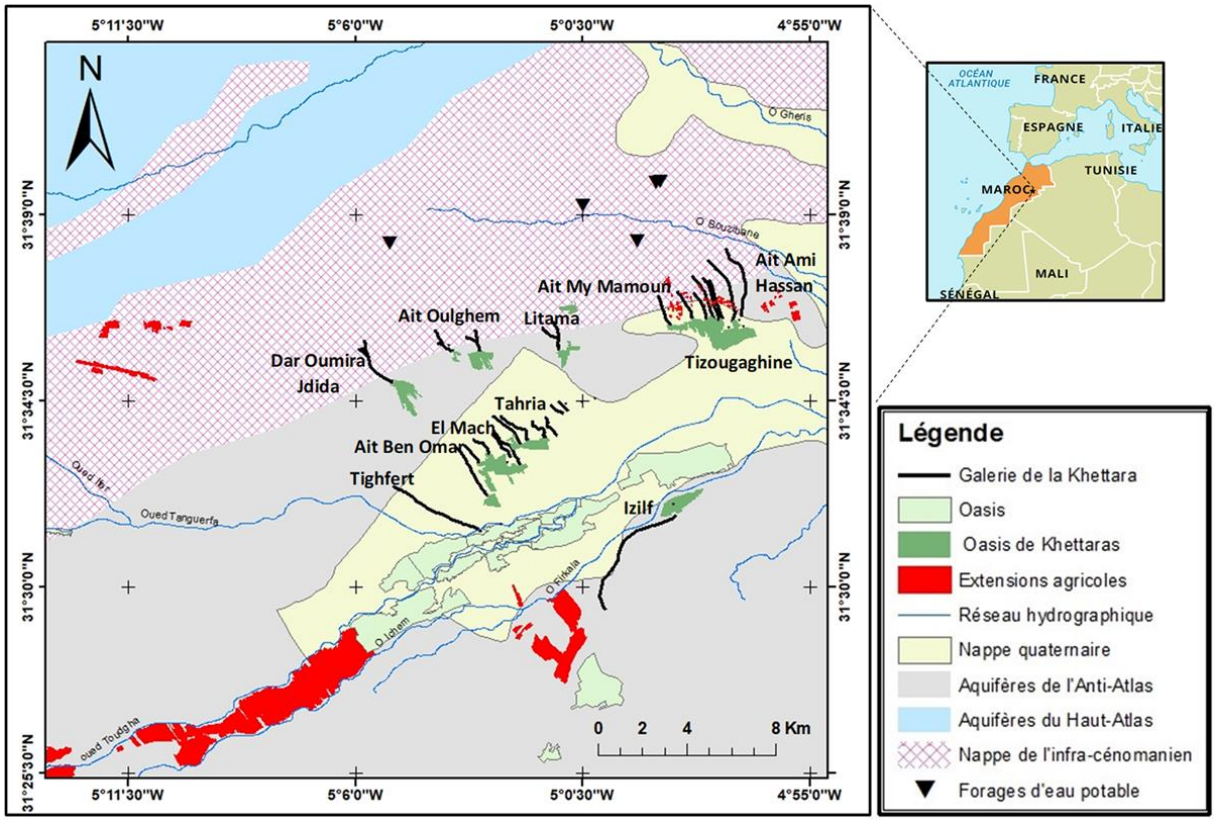

Figure 20. Zone d'étude

3.2.2 Approche

Douze entretiens semi-structurés et des visites de terrain ont ciblé les exploitations agricoles de la zone Todgha-Ferkla, qui sont exclusivement irriguées par des forages, pour analyser les différentes pratiques de mobilisation de l'eau d'irrigation qui exercent une pression importante sur la nappe. Ces entretiens ont été complétés par des entretiens avec des cadres de l'ORMVA-Tf et de l'Agence du bassin hydraulique de Guir-Ziz-Rheris (ABH-GRZ) pour identifier et caractériser les différents systèmes agraires de la zone. Une analyse par télédétection, qui repose sur l'appréciation visuelle et la

délimitation manuelle des surfaces cultivées (zones labourées plus sombres et zones irriguées de couleur verte), facilement identifiables en climat aride (absence de nuage et quasi-absence de végétation non-irriguée), a été effectuée afin d'évaluer les surfaces agricoles dans les oasis et dans les extensions. Cette analyse est basée sur les images « Google Earth Pro » (entre 1984 et 2021).

Ensuite, des enquêtes de terrains ont été menées parmi des groupes d'agriculteurs utilisant 18 khettaras sur les 29 existantes dans la commune de Ferkla-Essoufla. Onze enquêtes par khettara ont été menées sous la forme de focus groupes de deux à quatre agriculteurs et sept enquêtes par khettara se sont déroulées individuellement. Le choix de l'échantillon d'agriculteurs rencontrés a été fait en concertation avec les services de l'ORMVA-Tf et des associations locales. Ces enquêtes, couplées à des observations de terrain, ont été menées de février 2021 à janvier 2022. Elles ont permis de collecter des informations sur la gestion de l'eau des khettaras (tours d'eau, adaptations au manque d'eau), les techniques d'irrigation, les pratiques agricoles et l'utilisation de ressources en eau alternatives (puits et forages privés et collectifs) en cas de besoin. Les échanges avec les agriculteurs ont eu comme but de comprendre les origines des dispositifs de renforcement du débit des khettaras, les modalités de leur mise en œuvre (montage technique et financier et règles de gestion) et la façon dont d'autres groupes d'irrigants s'en sont inspirés. Par ailleurs, des rapports et des études sur la zone ont été récupérés auprès des institutions pour évaluer le nombre de stations de pompages (destinées l'irrigation ou à l'eau potable) et le confronter au nombre des agriculteurs regroupés autour des khettaras.

3.3. Résultats

3.3.1 Une dynamique agricole des extensions qui atteint ses limites

L'analyse des images satellitaires confirme une augmentation continue de la surface des extensions entre 1984 et 2021 dans la zone de Ferkla. Cette surface est passée d'environ 1580 ha à 3730 ha, soit un accroissement de l'ordre de 1600 ha (Fig. 21). Fonctionnant initialement au gaz ou au gasole, les stations de pompage privées utilisant les panneaux photovoltaïques apparaissent dans les années 2000 (Dione, 2012). Le nombre de stations de pompage équipées de panneaux photovoltaïques pour l'irrigation est passé d'une vingtaine en 2013 à plus de 180 en 2020 (Faraj et Janah, 2020). L'énergie solaire pour le pompage de l'eau d'irrigation s'est avérée moins chère sur le long terme que les énergies fossiles ou le recours au réseau électrique, en particulier dans le cas où les membres émigrés de la famille financent l'investissement. De plus, cette option était intéressante du fait de l'éloignement du réseau électrique, auquel le raccordement aurait coûté cher, et du fait des difficultés d'approvisionnement en gazole et en gaz. Par ailleurs, l'irrigation localisée s'est développée dans les extensions depuis les années 2000 et dans une moindre mesure dans les oasis traditionnelles, appuyée techniquement et financièrement par l'État, des organismes internationaux et des instituts

de recherche (Renevot, 2006). L'installation du goutte-à-goutte, accompagnée de la mise en place de l'énergie solaire, a nécessité la construction de bassins de stockage d'eau d'irrigation en raison des différences entre le débit d'exhaure (faible rendement des aquifères) et le débit nécessaire pour l'irrigation (débit plus fort sur des périodes plus courtes). Ce modèle de mobilisation et de stockage d'eau, qui peut être à l'origine de beaucoup de pertes par évaporation et de sur-irrigations, est actuellement adopté dans la majorité des exploitations agricoles, indépendamment de leurs superficies.

Suivant l'exemple des extensions agricoles, des jeunes des oasis des khettaras (Tizougaghine) acquièrent également des terrains de moins d'un hectare en dehors de l'oasis grâce à l'appui de l'État (Plan Maroc vert). Hamid, un jeune oasien de Ait My Mamoun, estime que « L'investissement dans le palmier dattier en particulier la variété "Majhoul" va améliorer les revenus des jeunes de la zone ». L'analyse des images satellites a permis de dénombrer environ 80 nouvelles petites exploitations (de moins d'1 ha) basées sur le pompage dans un rayon d'un kilomètre autour des khettaras de Tizougaghine (Fig. 20).

À l'échelle de la zone de Ferkla, environ 200 stations de pompages – a priori individuelles – ont été autorisées par l'ABH-GZR, alors que le nombre de stations fonctionnelles recensées par l'ORMVA-Tf est de 415. Dans le secteur oasien, 2140 agriculteurs sont regroupés autour des 19 khettaras restantes (JICA, 2005). Par ailleurs, l'Office national de l'électricité et de l'eau potable (ONEE) exploite 5 forages pour l'alimentation en eau potable des villes et des zones rurales avoisinantes (Tab. 2).

Nombreux sont les agriculteurs des extensions agricoles qui se sont rendu compte de la crise de l'eau, de surface et souterraine. Un agriculteur de Tinejdad relate l'historique de la nappe locale et déclare que « auparavant, l'eau était proche de la surface du sol et coulait dans l'oued toute l'année. Maintenant ce n'est plus le cas ». De son côté, Mohamed (65 ans), qui a une exploitation dans le douar El Bour, rencontre des difficultés d'accès à l'eau souterraine : « actuellement, ma pompe ne dépasse plus 1 h de fonctionnement pendant toute la matinée ». Ces difficultés ont incité certains agriculteurs à renforcer l'offre en eau pour leurs exploitations en mobilisant les eaux des crues pour irriguer et pour recharger la nappe. Un émigré à la retraite, exploitant à Tinejdad, a ainsi installé des ouvrages de captage et de recharge de la nappe à partir des eaux des crues : « le besoin crée l'invention ; les ressources souterraines de la zone sont limitées, aussi j'ai eu l'idée de mobiliser les eaux des crues pour irriguer le palmier dattier ». Ces initiatives individuelles traduisent une course à l'eau souterraine et de surface dans un contexte où, à l'échelle du bassin, la demande en eau dépasse de loin les ressources en eau disponibles. Si, dans le passé, les eaux souterraines étaient une ressource fiable en cas de manque d'eau de surface, aujourd'hui cette ressource fait également défaut.

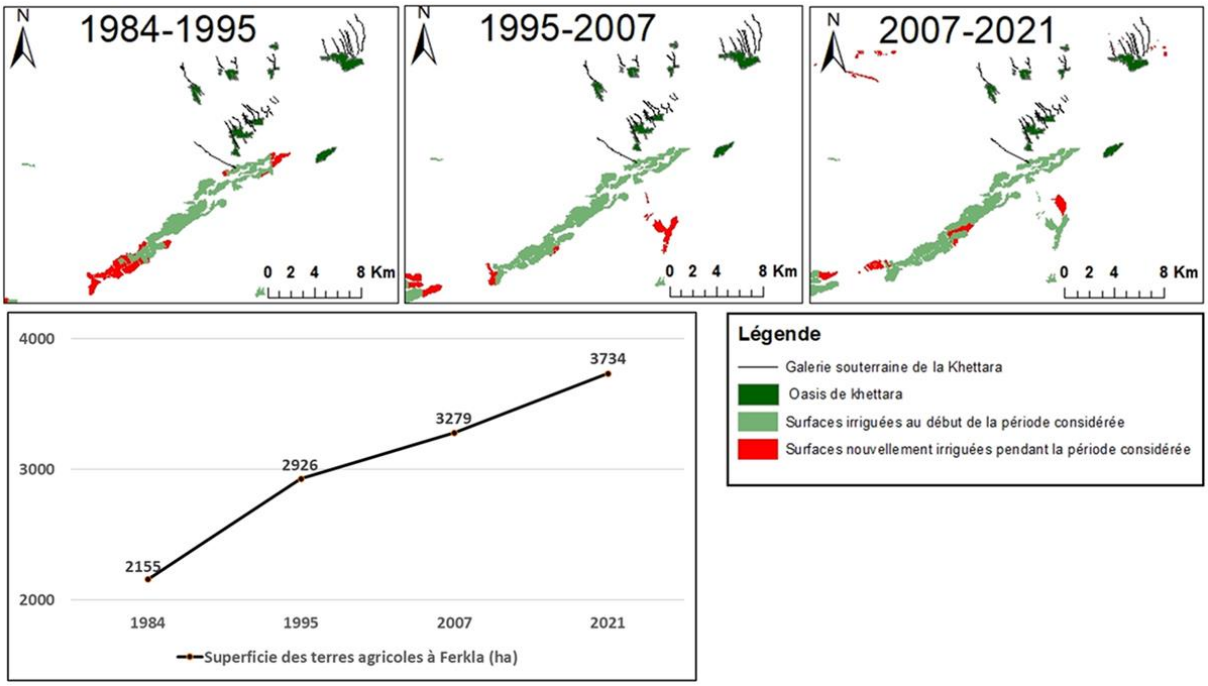

Figure 21. Évolution des surfaces irriguées à Ferkla.

Tableau 2. Les différentes formes d'exploitation de l'eau souterraine à Ferkla.

Les stations de pompage (ORMVA-Tf, 2021)	***Les stations de pompages autorisées (Communication personnelle : ABH-GZR, 2022)***	***Les stations de pompage équipées de panneaux solaires (Faraj et Janah, 2020)***	***Les forages d'eau potable (ONEE, 2018)***	***Les 19 khettaras fonctionnelles (JICA, 2005)***
415 stations exploitées	*200 stations*	*185 stations*	*5 forages (105 L/s)*	*2140 ayants droit*

3.3.2 Le pompage solaire : une menace et une opportunité pour les khettaras

Dès leur apparition, les pompages d'eau souterraine ont été considérés comme une menace pour les khettaras, car entraînant des baisses de débit (Lightfoot, 1996 ; Faiz et Ruf, 2010). Les agriculteurs qui continuent à exploiter les oasis irriguées par les khettaras s'adaptent techniquement et institutionnellement à cette baisse de débit. Certains décident d'irriguer uniquement les parcelles proches de la sortie de la khettara. D'autres stockent les faibles écoulements de leur tour d'eau dans un bassin traditionnellement aménagé entre la khettara et le départ des saguias (canaux de surface). Ils laissent ensuite le volume accumulé s'écouler à plus fort débit, réduisant ainsi les pertes par infiltration lors du transfert dans les canaux d'irrigation. Certains agriculteurs, à titre individuel, pompent l'eau du puits ou du forage qu'ils possèdent ou qu'ils louent à l'intérieur de l'oasis et exploitent l'ouvrage de transport ("saguia") pour acheminer l'eau pompée et irriguer leurs parcelles.

Pour préserver leurs oasis, certaines communautés des khettaras, avec l'aide de l'État, ont cherché à introduire le pompage solaire, dont elles avaient observé l'apparition dans des zones d'extensions. À

l'échelle du territoire oasien, l'une des premières expériences consistant à associer le système des khettaras avec le pompage solaire et le stockage d'eau dans un bassin en géomembrane, a pris naissance en 2013 dans l'oasis d'Anounizem (Drâa, Maroc). Appuyé par une association locale, le collectif de cette khettara a mobilisé l'ambassade d'Allemagne pour financer le projet (Association Anounizem pour le développement, 2014). Dans la zone de Ferkla, l'État a mis en place des forages équipés de panneaux solaires pour alimenter les khettaras d'Ait My Mamoun et d'Izilf entre 2016 et 2018 (Tab. 3). Ces oasis ne bénéficient des eaux pompées qu'en période diurne et les agriculteurs de ces khettaras ont dû adapter les règles de gestion à ce nouveau contexte. Par ailleurs, l'ORMVA-Tf planifie d'équiper avec des forages collectifs solaires 5 oasis de khettaras de Ferkla.

En 2020, un dispositif de pompage et de stockage d'eau similaire à celui d'Anounizem a été mis en place pour la première fois à Ferkla dans la khettara d'Ait Ami Hassan (oasis de Tizougaghine). Un député communal et ayant droit de la khettara Ait Ami Hassan, faisant partie du noyau d'émergence de ce dispositif à Ferkla, explique comment la mise en place de la khettara solaire a été inspirée par les expériences dans les extensions : « les visites organisées par les établissements de l'Agriculture à destination des fermes modernes de palmiers dattiers à Erfoud et mon observation des nouvelles techniques de pompage solaire et de stockage de l'eau dans des bassins m'ont donné l'idée d'apporter et d'appliquer ces nouvelles techniques à notre khettara ; un fournisseur d'équipements de pompage solaire qui est un ayant droit de la khettara nous a apporté son savoir technique et a assuré l'acquisition et l'installation du matériel ». En revanche, les entretiens de terrain n'ont pas permis de révéler un éventuel transfert d'innovation depuis la khettara d'Anounizem ou depuis toute autre expérience précédente vers Ferkla. Dans les autres khettaras de Ferkla, la perception des agriculteurs des khettaras vis-à-vis du pompage solaire évolue au fil de temps. Cette technologie a d'abord été considérée comme une menace lors de son adoption dans les exploitations individuelles, mais est maintenant perçue comme une opportunité incontournable pour sauver la khettara dans un contexte où le pompage dans la nappe ne peut pas être régulé par l'État. Abdelkrim (ayant droit de la khettara d'Ait Ben Omar et président d'une association locale, 58 ans) explique que : « personne n'a interdit cette exploitation agricole de pomper l'eau à côté des puits de khettara ; j'essaye actuellement de convaincre les autres irrigants d'installer des panneaux solaires pour alimenter notre khettara ». À son tour, Hsain (agriculteur de l'oasis Ait Oulghoum, 50 ans) explique que « depuis l'installation des forages d'eau potable à l'amont de notre khettara, nous constatons une baisse continuelle du débit ; le phénomène s'est accentué à partir de 2010 ; on tente actuellement d'équiper un puits avec une pompe et des panneaux solaires pour alimenter la khettara ».

Tableau 3. Les caractéristiques des khettaras solaires de Ferkla.

Khettara	Mode de financement	Bassin de stockage	Présence d'une vanne pour gérer l'eau pompée	Intervention sur les règles de gestion	Type d'interventions sur les règles
Ait Ami Hassan	A	Présent	Oui	Non	–
Lkbira	A et B		Non	Non	–
Atti Kaida			Oui	Oui	Séparation provisoire des eaux du pompage et de la khettara
Maamrya			–	–	–
L'Bakassia	B et C		Non	Oui	Augmentation de la durée du tour d'eau
Ait My Mamoun	D	Absent	Non	Oui	Abandon des droits d'eau ancestraux
Izilf					Permutation – jour et nuit – des périodes d'irrigation entre chaque tour d'eau

A = Vente d'un terrain collectif associé à la khettara ; B = Imposition d'une redevance proportionnelle à la durée d'irrigation de chaque ayant droit ; C = Modification du tour d'eau et location d'eau aux irrigants ; D = Financement étatique.

3.3.3 Diffusion de l'innovation « khettara solaire »

3.3.3.1 Mise en œuvre de la structure

Le dispositif technique de la « khettara solaire » peut être défini comme l'assemblage entre la partie aval du système de khettara et le pompage des eaux de la nappe utilisant l'énergie solaire à partir d'un puits ou d'un forage (Fig. 22). Un bassin revêtu d'une géomembrane peut éventuellement être installé pour stocker l'eau pompée pendant la journée et assurer ainsi un débit alimentant la khettara de façon continue sur 24 h. L'eau pompée rejoint l'eau drainée par gravité au niveau de l'exutoire de la galerie souterraine de la khettara à l'amont immédiat d'un deuxième bassin, traditionnel, utilisé comme réservoir tampon des eaux de la khettara. Les eaux pompées et drainées sont ainsi exploitées conjointement par les agriculteurs suivant les droits d'eau et les règles de gestion initialement en vigueur dans la khettara existante, mais celles-ci peuvent aussi être adaptées à la nouvelle ressource en eau.

La khettara solaire peut mobiliser l'eau par pompage de la même nappe drainée par gravité moyennant un puits (Fig. 22), ou elle peut exploiter des aquifères captifs en dessous de la nappe de la khettara grâce à des forages. Si la distance entre le point de pompage collectif et l'oasis excède plusieurs centaines de mètres, les agriculteurs acheminent l'eau pompée jusqu'à la sortie de la khettara par des conduites sous pression (diamètre entre 50 et 80 mm), enterrées à une profondeur d'environ 80 cm parallèlement à la khettara pour détecter et réparer facilement les fuites d'eau (Fig. 22).

Actuellement à Ferkla, les khettaras converties en solaire avec un nouveau bassin de stockage sont au nombre de cinq. Elles appartiennent toutes à l'oasis de Tizougaghine. Certains agriculteurs de cette oasis possèdent des droits d'eau dans d'autres khettaras, comme c'est le cas d'un élu communal d'Ait Ami Hassan et ils contribuent ainsi à la diffusion de l'innovation entre les différentes khettaras qu'ils exploitent. Les cinq khettaras solaires sont conçues de façon similaire à la première expérience de la khettara Ait Ami Hassan (Tab. 3). Elles disposent d'un ou deux puits de pompage avec des profondeurs qui varient entre 16 et 20 m. Les diamètres des conduites de refoulement à partir des pompes varient entre 50 et 100 mm. Les bassins de stockage ont des capacités qui varient entre 1200 et 2200 m3.

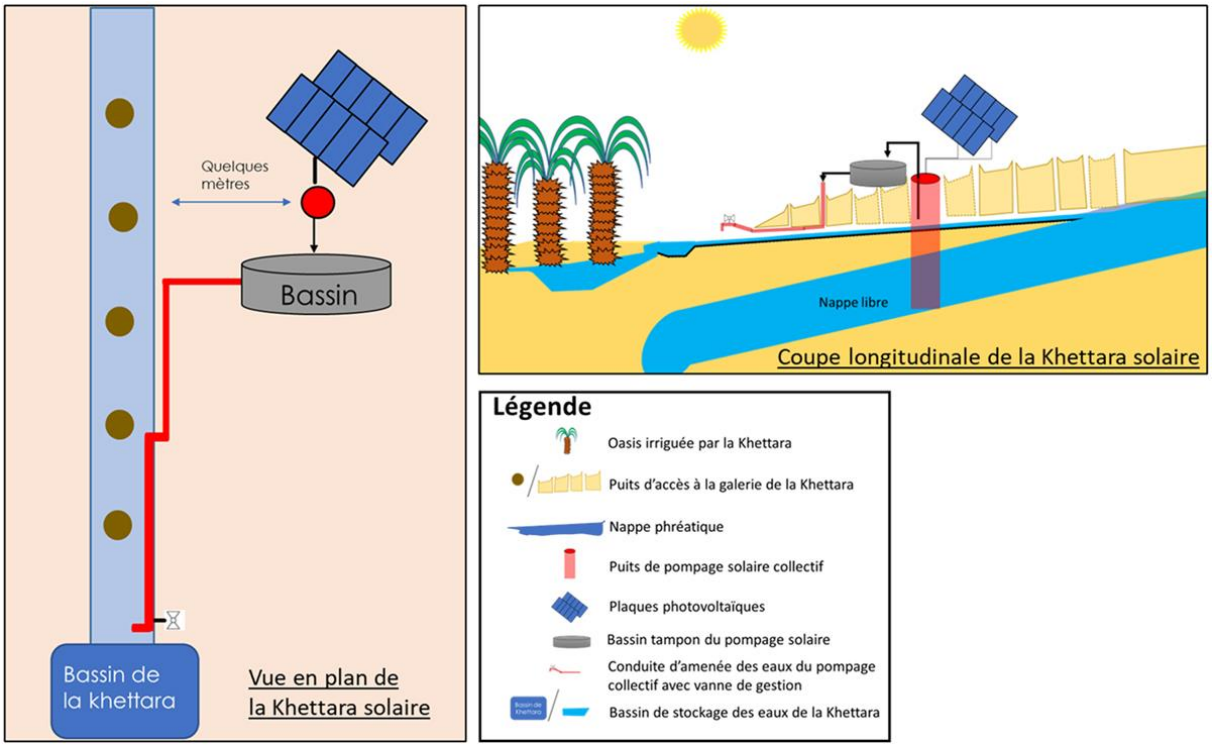

Figure 22. Schéma de la khettara solaire avec stockage d'eau.

3.3.3.2 Ajustement des tours d'eau

Les règles de gestion des khettaras solaires dépendent de la présence ou non d'un bassin qui assure le stockage de l'eau pompée le jour et sa régulation, de manière à renforcer la khettara avec un débit quasi constant 24 h/24. Lorsque le bassin est présent, l'eau pompée est associée directement à l'eau de la khettara. Les droits d'eau et les règles de partage des eaux de la khettara sont alors maintenus. En revanche, en l'absence d'un bassin, le renforcement de la khettara n'a lieu qu'en période diurne et les règles de gestion subissent des adaptations, voire une refonte complète. À titre d'exemple, après l'installation du dispositif solaire par l'État, les droits d'eau de la khettara Ait My Mamoun, autrefois systématiquement attribués aux propriétaires, même absentéistes, ont été restreints aux agriculteurs

résidant en permanence dans l'oasis. Après son tarissement, la khettara (ouvrage et règles de gestion) a été remplacée par un nouveau mode de mobilisation et de gestion de l'eau géré par une association locale. À Izilf, les tours d'eau ont été adaptés différemment : les droits d'eau ancestraux calés sur des périodes de 24 h ont été maintenus. Cependant, pour que tous les irrigants bénéficient de l'eau de pompage diurne, chaque irrigant se voit allouer une période d'irrigation le jour, puis une autre période la nuit, en alternance à chaque tour d'eau.

3.3.3.3 Financements

Les agriculteurs des cinq khettaras solaires avec bassins de Tizougaghine ont développé des méthodes et des techniques différentes pour payer les frais de creusement et d'équipement des puits en pompes électriques, de mise en place des bassins et d'acquisition des conduites d'eau et des panneaux photovoltaïques (Tab. 3). Pour mobiliser les moyens financiers nécessaires, ces agriculteurs ont dû vendre un terrain collectif associé à la khettara, payer une redevance au prorata de la durée d'irrigation de chaque ayant droit et/ou modifier le tour d'eau conjugué à la location de l'eau de la khettara aux irrigants.

La modification du tour d'eau d'une khettara est une méthode ancestrale adoptée à l'unanimité par les ayants droit de la khettara pour pallier les contraintes financières et/ou organisationnelles liées à leur khettara. En effet, le tour d'eau d'une khettara peut être prolongé d'une ou deux journées supplémentaires pour répondre à un intérêt collectif. Ces journées additionnelles d'accès à l'eau d'irrigation sont accordées avec une contrepartie financière à tous les irrigants (y compris ceux qui n'ont pas de droit d'eau). Il s'agit d'une location de l'eau de la khettara, dont le montant et les locataires peuvent changer chaque année. L'argent récupéré à partir de cette location est utilisé pour les travaux d'entretien et de réfection de la khettara. C'est ainsi que les ayants droit d'une khettara peuvent modifier le tour d'eau et louer l'eau de la khettara afin de financer un projet de pompage collectif.

L'imposition de la redevance peut être associée à des nouvelles règles de gestion matérialisées par l'installation d'une vanne située au niveau de la jonction entre les eaux issues du pompage collectif et celles drainées par gravité. Cette vanne permet de conditionner l'accès à l'eau du pompage par le paiement de la redevance équivalente au droit d'eau de chaque ayant droit et permet d'inciter les agriculteurs à adhérer au projet (Fig. 22 et Tab. 3). En somme, l'eau apportée par pompage est perçue et gérée comme une nouvelle ressource. Ces règles de gestion permettent de superposer l'eau anciennement mobilisée par la khettara à la « nouvelle » eau pompée. La vanne mise en place pour séparer les deux eaux reflète l'interaction entre la ressource en eau, l'infrastructure et les règles de gestion.

3.4 Discussion et conclusion

Dans un contexte de baisse généralisée des niveaux piézométriques et de transition vers l'énergie solaire pour alimenter les forages individuels dans les oasis traditionnelles et les extensions, les communautés oasiennes ayants droit des khettaras ont fait le choix de les renforcer par le pompage solaire. Cette « khettara solaire » associe la partie aval du système existant de la khettara dans ses dimensions technique (ouvrage de transport et canaux de distribution) et institutionnelle (règles de gestion) à un dispositif de pompage solaire à l'amont, ce qui correspond souvent à un abandon de l'ouvrage traditionnel de mobilisation de l'eau, mais avec un maintien de l'organisation sociale autour de la ressource en eau souterraine. Dans un contexte de baisse continue de la nappe, l'installation de pompes solaires permet de sauver l'accès collectif à l'eau à court terme, et de participer à moindre frais à la course vers l'eau souterraine, mais ne garantira pas leur survie à long terme, si l'utilisation de l'eau souterraine n'est pas régulée dans la région.

La khettara solaire s'inscrit dans la continuité de la logique de la khettara traditionnelle puisqu'elle se base sur une mobilisation de l'eau souterraine, en fournissant une énergie perçue comme gratuite (gravitaire et maintenant solaire). Les règles de gestion et les droits d'eau liés à la khettara peuvent être maintenus si un bassin de stockage et de régulation est mis en place pour alimenter l'oasis avec un débit constant, comme pour la khettara traditionnelle. Cependant, dans la plupart des cas, la « nouvelle » ressource en eau nécessite une adaptation des règles existantes, par exemple en séparant par une vanne l'eau provenant du pompage, destinée à ceux ayant contribué à la mise en place du projet, de l'eau provenant de la khettara par la galerie souterraine.

Akrich et al. (1988) affirment qu'une innovation réussie est le résultat d'un travail de traduction permettant de concevoir une technologie adaptée aux besoins des usagers, accompagnée par la mise en place d'un réseau sociotechnique permettant de fournir un appui technique pour maintenir et adapter le dispositif technique. La conception de la khettara solaire a été effectuée par les usagers eux-mêmes à partir d'exemples de dispositifs solaires individuels dans les alentours. Elle combine ingénieusement le système (technique et social) de distribution de la khettara existante, quitte à modifier certaines règles, un système de pompage solaire permettant de renforcer la ressource en eau d'irrigation existante à travers une énergie « gratuite », et un système de stockage et de transport (conduite) permettant de mieux organiser la distribution tout en diminuant les besoins d'entretien de la khettara.

Nos résultats confirment l'hypothèse de Bisson (1992) sur l'association entre la khettara et la motopompe qui permet d'atténuer la peine des hommes, d'économiser leur temps et d'irriguer les

terrains qui étaient condamnés à l'abandon suite à l'abaissement de la galerie et du niveau piézométrique. Ainsi, on peut affirmer que la khettara est un système bien vivant, qui connaît des interventions sur son dispositif technique et des adaptions de ses règles de gestion pour continuer à desservir les oasis en eau (Faiz et Ruf, 2010). Les expériences inventoriées sur le terrain montrent que la robustesse du tissu social à l'intérieur de l'oasis, conjuguée à la capacité des agriculteurs à mobiliser des fonds, sont des conditions nécessaires à l'émergence de la khettara solaire et au maintien de la gestion collective de l'eau souterraine. Depuis l'expérience d'Anounizem en 2013, qui a su récupérer un fonds étranger, aucun collectif d'agriculteurs de Ferkla n'a pu mettre en place de khettara solaire avec stockage d'eau jusqu'en 2020. La difficulté à mobiliser des fonds explique la lenteur de l'émergence des khettaras solaires qui, faute de bassins de stockage, se sont limitées à un apport en eau pendant la journée et à une adaptation des règles de gestion de la ressource pendant cette période.

En outre, on peut comprendre qu'un accès collectif et partagé à l'eau souterraine incite à avoir conscience de la rareté de la ressource. Les irrigants des oasis continuent ainsi à irriguer de manière sobre, contrairement à ceux des extensions qui ont un accès à l'eau individuel (un seul agriculteur dans une extension a à sa disposition le même débit de forage que tout un collectif de khettara). Cependant, le pompage solaire des khettaras contribue à la baisse du niveau piézométrique de la nappe. Les communautés des khettaras ont ainsi rejoint la course à l'accès à la nappe, dans un contexte présaharien où les prélèvements dépassent la capacité de renouvellement des aquifères et où la recharge de ces aquifères est condamnée à la baisse en raison des changements climatiques (Hssaisoune et al., 2020).

Ce choix cornélien révèle la difficulté d'une gestion durable des eaux souterraines. L'exemple des khettaras pourrait inspirer des pratiques plus durables dans la région, notamment un accès collectif et réglementé à l'eau souterraine et une irrigation sobre, « plus économe en eau, centrée sur la sécurisation de la production agricole et contribuant à une plus grande sobriété » (Ayphassorho et al., 2022). La mise en place de règles d'accès et d'exploitation des eaux souterraines s'imposant à tous s'avère une condition nécessaire pour atteindre cet objectif.

À l'échelle du bassin versant, on constate une consommation de l'eau dépassant le volume annuel renouvelé, comme en témoigne la baisse généralisée des nappes. Cela compromet à terme toute forme d'agriculture et de vie à l'aval du bassin versant. On observe des tentatives locales pour y faire face : recharge artificielle de la nappe par différents agriculteurs et collectifs ; multiplication des forages, ainsi que leur approfondissement ; diminution des superficies cultivées ; et, comme nous l'avons montré, pompage solaire pour renforcer les khettaras. D'autres agriculteurs, de plus en plus

nombreux, n'ont pas d'autre choix que d'abandonner leurs terres. Des règles d'utilisation de l'eau à l'échelle locale devraient donc être accompagnées par des règles d'allocation à plus grande échelle pour assurer la durabilité de l'agriculture dans cette zone oasienne.

Chapitre 4

Repenser la gestion de l'eau à l'échelle territoriale dans les oasis du Maroc : le cas de Ferkla

Ce chapitre a été soumis sous forme d'article scientifique à la revue Alternatives Rurales :

Yassine Khardi, Zeine Zein Taleb, Amar Imache, Marcel Kuper, Sami Bouarfa, Ali Hammani, Guillaume Lacombe, Abdelilah Taky. Penser la gestion de l'eau à l'échelle territoriale dans les oasis du Maroc : le cas de Ferkla. Alternatives Rurales

Chapitre 4 : Repenser la gestion de l'eau à l'échelle territoriale dans les oasis du Maroc : le cas de Ferkla

Dans les deux chapitres précédents, nous avons analysé deux innovations de mobilisation de l'eau d'irrigation entreprises respectivement dans les oasis traditionnelles et dans une exploitation agricole initialement basée sur les eaux souterraines. Par conséquent, ces analyses ont révélé la présence d'une course généralisée vers l'eau à l'échelle du bassin versant Todgha. Nous avons illustré, à travers les analyses de la khettara solaire et du captage des crues à l'échelle de l'exploitation agricole, la présence des facteurs locaux et régionaux (e.g. augmentation des prélèvements des eaux de surface et souterraines en amont du bassin) qui contribuent à la baisse piézométrique à l'aval du bassin. Nous avons également observé des tentatives locales pour faire face à la diminution du potentiel en eau disponible en l'occurrence i/ le captage des eaux de crues par différents agriculteurs et collectifs, ii/ l'approfondissement et la multiplication des forages, iii/ la diminution des superficies cultivées et iv/ le pompage solaire pour renforcer les khettaras.

Dans ce contexte de course généralisée à l'eau souterraine, nous avons conduit une réflexion collective sur l'avenir de gestion de l'eau à l'échelle de Ferkla moyennant une démarche participative. Un panel mixte des acteurs a été impliqué pour dresser un état des lieux et un diagnostic basé sur des faits et pour ultimement coconstruire des solutions d'amélioration de la gestion de l'eau à l'échelle du territoire.

Ce chapitre explique comment l'approche participative a été construite et il apporte les principaux aboutissements et déductions desdits ateliers participatifs. L'état des lieux a permis d'extraire plusieurs indices démontrant la fermeture du bassin versant : relocalisation de l'usage de l'eau vers l'amont, déclin des niveaux piézométriques des nappes, conflits d'usages, etc. Face à ces enjeux, nombreuses sont les initiatives et les solutions pour améliorer la gestion de l'eau qui ont été soulevées par les participants. Celles-ci ont été mises en œuvre ou sont en cours de réflexion, mais elles restent localisées et tributaires d'interventions ailleurs dans le bassin versant. En guise de conclusion, la démarche participative argumente la nécessité d'inventer et de mettre en exergue un nouveau modèle de gouvernance de l'eau pour assurer la durabilité de la gestion des ressources en eau dans la zone oasienne.

4.1. Introduction

La gestion de l'eau dans les zones oasiennes au Maroc est face à un double défi. D'une part, il y a eu une augmentation très forte de la demande en eau dans un contexte de sécheresses répétitives, diminuant les apports d'eau. En effet, de nombreuses extensions agricoles ont vu le jour, basées principalement sur l'exploitation de l'eau souterraine par pompage. En parallèle, la demande en eau d'autres secteurs (eau potable, industries) a augmenté, accentuant la pression sur les ressources en eau. On assiste donc à une course effrénée vers les eaux de surface et souterraine dans les zones oasiennes (Khardi et al. 2023).

D'autre part, l'organisation de l'allocation et la mobilisation de l'eau se sont complexifiées ces dernières décennies. Les exploitations agricoles qui se sont développées moyennant le pompage des eaux souterraines représentent une forme d'individualisation de l'accès et de gestion des eaux souterraines contrairement aux oasis traditionnelles où les agriculteurs ont maintenu une maitrise d'eau collective suivant les *Orf* (Ait Hamza, 1999), tout en l'adaptant au contexte actuel (Khardi et al., 2023). Par ailleurs, l'Etat a progressivement pris le contrôle des eaux de surface moyennant des barrages gérés par les agences de bassin hydraulique (ABH). Cela a remis en question des modes de gestion communautaires, qui avaient dans le passé permis de veiller sur la distribution de l'eau ou encore d'organiser l'interdiction de forage dans des zones de captation des khettaras (Lightfoot, 1996 ; Haddache, 2009). Pour pallier à ces complexités, le Maroc a mise en exergue la gestion participative de l'eau, en particulier par la création des contrats de gestion participative (Dionnet et al., 2020). En 2022, les premiers processus de contrats de nappe en zone oasienne ont vu le jour pour les nappes de Meski-Boudnib et de la plaine de Feija (Zagora)[14].

Face à l'augmentation de la demande en eau et aux changements de ses modes de gestion, cet article vise à contribuer à une réflexion sur la gestion de l'eau en agriculture en territoire oasien. Basé sur un processus participatif impliquant les différents acteurs concernés par la gestion de l'eau dans la zone de Ferkla (Drâa-Tafilalet), l'article a pour objectif de comprendre et d'analyser les connaissances et les perceptions d'amélioration des acteurs locaux au sujet de la gouvernance de l'eau.

[14] Aujourd'hui Le Maroc, le 29/1/2022. Sadiki et Baraka signent à Errachidia le contrat de gestion participative de la nappe de Meski-Boudnib. Aujourdhui Maroc. https://aujourdhui.ma/actualite/sadiki-et-baraka-signent-a-errachidia-le-contrat-de-gestion-participative-de-la-nappe-de-meski-boudnib (accessed 6.27.23).

4.2. Zone d'étude

Le processus participatif s'est déroulé dans la zone de Ferkla dans la région de Drâa-Tafilalet. Cette zone s'étale sur une superficie d'environ 1 000 km^2 et regroupe trois communes territoriales à savoir : Ferkla El Oulia, le centre urbain de Tinejdad et Ferkla Es-soufla. Le territoire de Ferkla se trouve à l'aval du bassin versant Todgha délimité par deux chaines de montagne ; le Haut-Atlas au nord et l'Anti-Atlas au Sud. La pluviométrie moyenne annuelle à l'échelle de ce bassin est inférieure à 130 mm et les écoulements de surface n'atteignent Ferkla qu'après des averses importantes en amont. Les oasis de la zone sont principalement irriguées de manière collective par les khettaras et/ou l'épandage des eaux de crues. Les oasis irriguées par les khettaras s'étalent sur une superficie d'environ 450 ha. Des exploitations agricoles individuelles basées sur le pompage se sont développées à côté des oasis (Figure 23). Les premières exploitations agricoles individuelles ont vu le jour dans la zone de El-Bour (zone auparavant réservée à la production céréalière par épandage des eaux de crues) dans les années 1980. Les stations de pompage recensées par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole -Tafilalet (OMRVA-Tf) en 2021 sont d'environ 415 unités. Ainsi, la superficie irriguée à l'échelle de Ferkla a augmenté d'environ 1 600 ha entre 1984 et 2021 passant d'environ 1 580 ha à 3 730 ha (Khardi et al., 2023). Certaines exploitations agricoles pompent l'eau depuis les aquifères qui alimentent les khettaras.

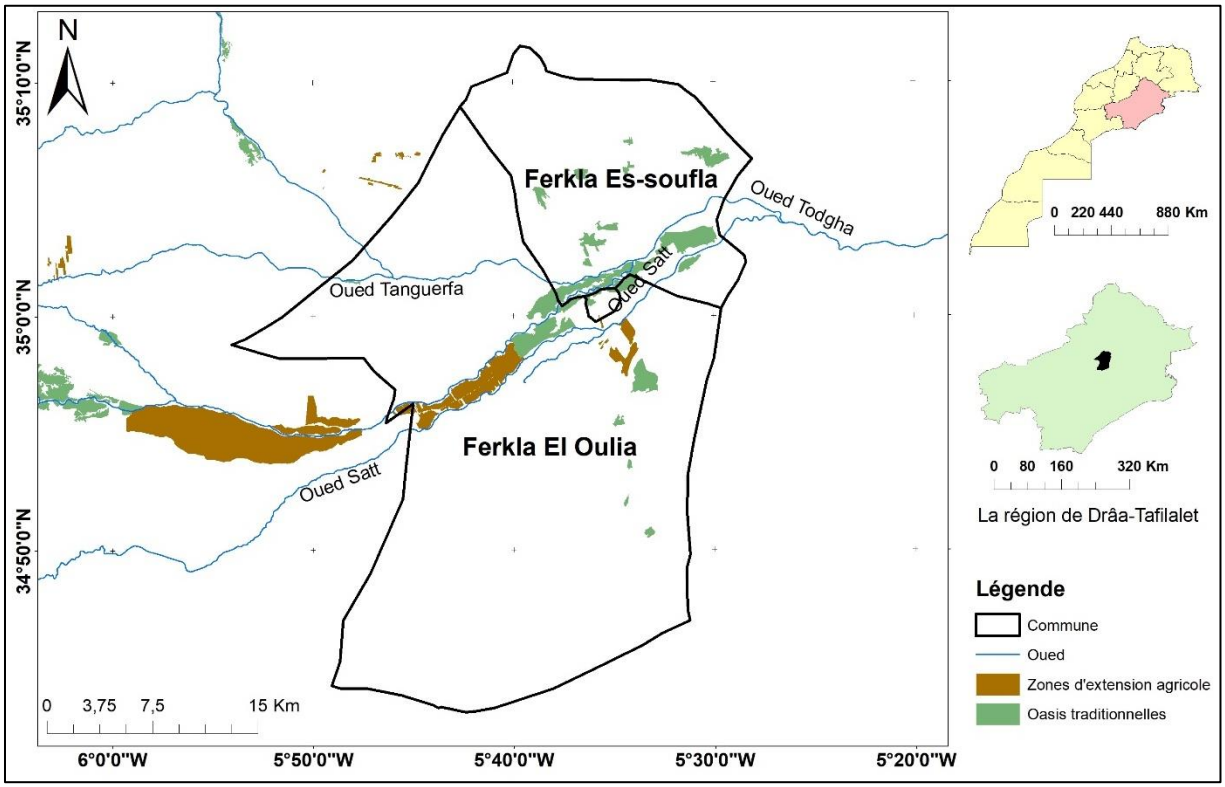

Figure 23. Carte de la zone de Ferkla

4.3. Méthodologie

Le processus participatif avait comme objectif de réunir un panel mixte d'acteurs qui exploitent ou gèrent la ressource en eau dans le territoire étudié afin de coconstruire des solutions consensuelles sur la gestion et l'exploitation de l'eau : agriculteurs, représentants institutionnels, membres des associations des irrigants et acteurs associatifs. On note que ce processus a été initié et mené dans le cadre d'une thèse de doctorat. Pour concevoir et enrichir nos ateliers participatifs, nous nous sommes inspirées des approches déployées par Faysse et al. (2014) et Ameur et al. (2015), qui ont entrepris des processus de concertation sur une ressource en eau surexploitée dans des contextes semi-arides. Plusieurs visites et/ou discussions ont eu lieu sur terrain avant l'organisation et en marge des ateliers participatifs afin de mieux connaitre le territoire et les différentes pratiques entreprises pour pallier au manque d'eau d'irrigation et afin d'instaurer un climat de confiance avec les acteurs. Avant de réunir un panel mixte des acteurs liés à la gestion de l'eau dans ce territoire pour la première fois, deux ateliers de préparation avec des agriculteurs ont eu lieu. Le premier atelier de préparation a été destiné aux agriculteurs des oasis où la gestion de l'eau d'irrigation est organisée de manière collective, et le deuxième aux agriculteurs des extensions agricoles qui ont tous un accès individuel à l'eau souterraine. Ces ateliers visaient à mettre l'accent sur les logiques propres aux agriculteurs de chaque groupe pour leur permettre de structurer leurs idées pour les ateliers multi-acteurs. A la fin des ateliers de préparation, les agriculteurs ont joué le rôle de représentants des établissement étatiques. Ils se sont « mis dans la peau » des institutionnels afin de connaître leurs missions et leurs moyens et pour renforcer le lien de confiance entre l'ensemble des parties prenantes (Baldwin and Ross, 2012).

Pour amener les acteurs impliqués dans la concertation à coconstruire des solutions, nous les avons réunis dans trois ateliers multi-acteurs (Figure 24) pour dresser l'état des lieux et le diagnostic participatif de leur territoire moyennant un arbre à problème (Dionnet et al., 2020). En plus des deux catégories d'agriculteurs, nous avons mobilisé des acteurs institutionnels (ORMVA-TF ; Agence Nationale pour Développement des Zones Oasiennes et de l'Arganier (ANDZOA), Commune de Ferkla Essoufla et Agence de Bassin Hydraulique Guir-Ziz-Rhéris (ABH-GZR)) ce qui a permis d'apporter les connaissances techniques et juridiques sur la problématique de l'eau. Finalement, le rôle de la recherche a été mis en avant à travers la production de connaissances et l'apport des éléments de réflexion sur l'avenir du territoire, et par l'organisation du processus participatif. Les objectifs des ateliers étaient de : i) établir des liens de confiance entre l'ensemble des acteurs ; ii) créer une atmosphère de concertation fondée sur des faits ; iii) croiser des regards et des perceptions au sujet de la gestion de l'eau dans leurs territoires ; et iv) coconstruire des solutions sur la base d'un état des lieux et d'un diagnostic collectif. Nous avons mobilisé plusieurs outils de facilitation et de concertation en l'occurrence les actions de brise-glace, les dessins individuels et collectifs du territoire sur des

supports vierges, la conception collective de l'arbre à problème de la question de l'eau et l'échelle de consensus[15].

L'ensemble des ateliers de terrain a été animé en arabe pour faciliter l'expression de tous les acteurs. Le lieu où se sont déroulé les ateliers a été soigneusement choisi en vue de garder une neutralité pour les agriculteurs et le personnel des institutions publiques. Les ateliers participatifs menés étaient basés sur la symétrie entre l'ensemble des participants. Cette symétrie stipule que tous les participants ont le même poids et se trouvent sur le même pied d'égalité. Delville (2011) montre que l'absence d'une approche basée sur la symétrie entre les « développeurs » et les « développés » dans les projets de développement induit des problèmes méthodologiques et des interprétations discutables. A la fin de chaque atelier, nous avons demandé aux participants d'évaluer l'organisation et le déroulement des ateliers et de souligner les points à améliorer dans les ateliers futurs. Cette évaluation a été faite de manière anonyme. Ces ateliers ont eu lieu entre février et mai 2023. 9 agriculteurs des anciennes oasis et 8 agriculteurs des extensions agricoles ont respectivement bénéficié des ateliers de préparation. Les trois ateliers multi-acteurs ont connu la participation de 4 acteurs institutionnels (1 représentant par institution étatique), de 3 agriculteurs de la zone d'extension agricole et de 8 agriculteurs des anciennes oasis dont 2 femmes. Certains agriculteurs peuvent appartenir à des associations de développement locales, des associations des usagers de l'eau agricole, ou des coopératives.

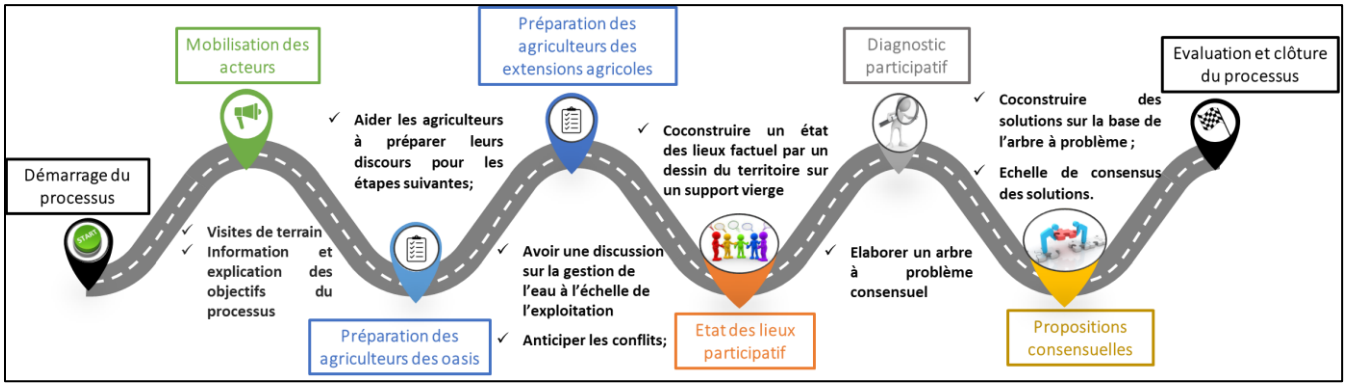

Figure 24. Schéma des étapes principales du processus participatif

[15] Ces outils sont expliqués et détaillés dans le guide de concertation territoriale et de facilitation et le guide d'orientation pour une gestion participative et contractuelle de l'eau au Maroc accessibles en ligne (http://www.lisode.com/nos-publications/).

4.3. Résultats

4.3.1. Une démarche symétrique au service d'une réflexion collective sur un nouveau modèle de gestion de l'eau

Une charte collective a été coconstruite à la fin de l'atelier de l'état des lieux où le panel mixte des acteurs a été réuni pour la première fois afin d'organiser et de cadrer les ateliers d'après (tableau 4). Lors de cet atelier d'état des lieux, les participants ont été amené à travailler en groupe et par conséquent leurs connaissances et leurs visions ont été croisées. De ce fait, ils se sont mis d'accord sur la nécessité de respecter les propositions et les idées d'autrui, d'éviter l'interrompre les autres, de respecter l'horaire de démarrage des ateliers et de prendre en considération les résultats des ateliers dans l'avenir.

Tableau 4. La charte établie avec les participants pour guider et organiser le processus participatif

La charte du processus participatif sur la gestion de l'eau au Ferkla
• S'engager à être présent dans toutes les étapes du processus participatif ; • Respecter les avis ou les idées des autres participants ; • Ecouter les interventions d'autrui ; • Respecter l'heure de l'atelier ; • Prendre en compte les résultats des ateliers

Au final, l'ensemble des résultats obtenus notamment l'état des lieux, le diagnostic et les solutions résultent d'une co-construction collective et d'une discussion avec tous les intervenants mobilisés dans les ateliers.

4.3.2. Des ateliers participatifs qui révèlent la fermeture du bassin versant :

Lors des ateliers de l'état des lieux et du diagnostic participatif, plusieurs problèmes en lien avec la situation hydrique actuelle des oasis ont été évoquées (figure 25). Parmi les problèmes évoqués, on note le manque et l'irrégularité des précipitations, la surexploitation de la nappe, la baisse des niveaux piézométrique, la multiplication des forages illégaux et les problèmes de salinité. Ces problèmes ont été classés collectivement en quatre groupes homogènes (figure 25). A ces problèmes s'ajoute la méconnaissance du potentiel réellement existant des eaux souterraines de la zone. Les problèmes soulevés sont typiquement les symptômes d'un bassin versant fermé : « *Lorsque l'offre en eau n'est pas suffisante pour satisfaire la demande en termes de qualité et de quantité d'eau dans le bassin et à l'embouchure, pendant une partie ou la totalité de l'année, on dit que les bassins sont en train de se fermer* » (Molle et al., 2008 : 589).

Certains participants considèrent que leurs oasis sont impactées par une situation d'anarchie causée par le développement des puits et des forages individuels. Une oasienne a annoncé : « *à cause de la multiplication des puits, notre oasis n'est plus verte comme auparavant* ». Par ailleurs, les jeux de rôle ont permis de cerner la perception des agriculteurs vis-à-vis les eaux souterraines. Ils expriment la nécessité de partager une ressource qui ne peut jamais être accaparé par des individus, mais en même temps ils rendent compte de la difficulté du partage d'une ressource loin de la surface : « *Les ressources souterraines sont un don divin, personne ne peut les monopoliser…ces eaux ne peuvent pas être réparties comme les eaux d'un oued ou d'une séguia, chacun prend ce que lui a été alloué par Dieu* ».

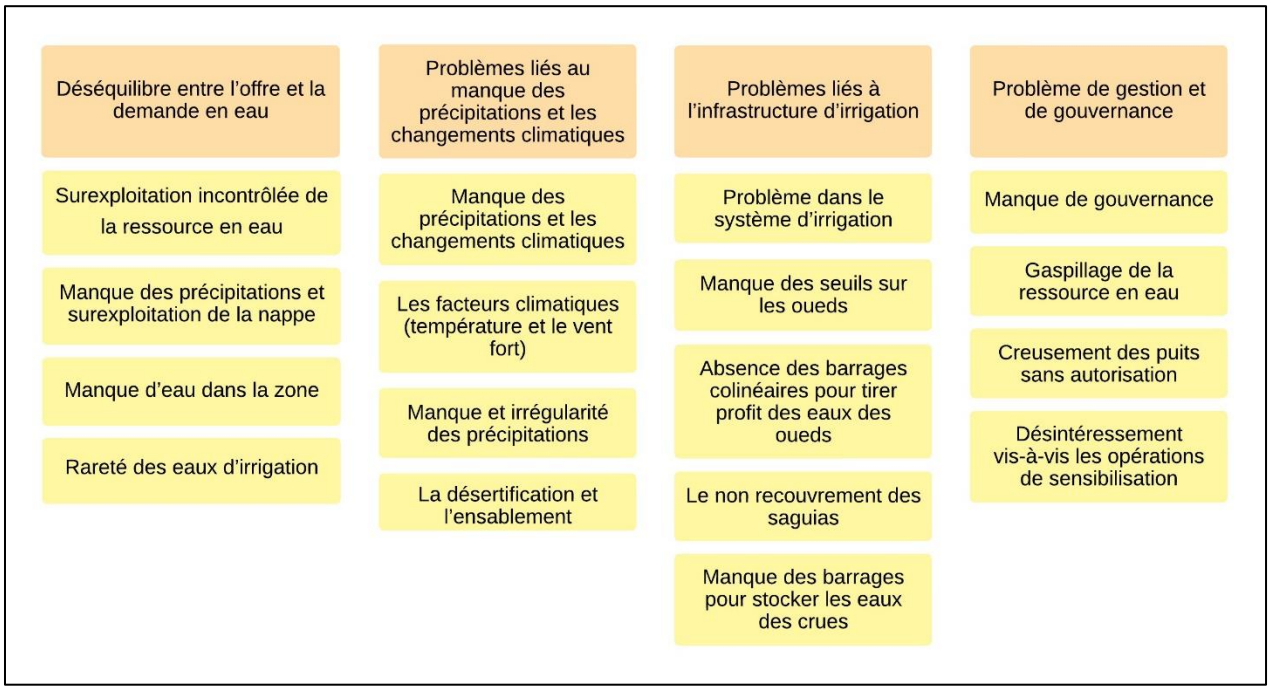

Figure 25. Problèmes liés à l'eau dans la zone inventoriée lors de l'atelier du diagnostic participatif

4.3.3. Un cheminement depuis les problèmes d'infrastructures aux problèmes de gouvernance et de gestion de l'eau :

Lors des ateliers de préparation des agriculteurs, les agriculteurs des oasis ont soulevé plusieurs problèmes liés à l'eau : i) surexploitation de la nappe par le pompage à énergie solaire, ii) creusement illégal des puits et des forages, iii) faible exploitation et valorisation des terres agricoles, iv) réseau d'irrigation par les eaux de crues insuffisamment aménagé et v) absence des puits et des forages collectifs. Ils indiquent ainsi que les activités agricoles dans les oasis sont menacées par une multiplication de puits et forages permettant un accès individuel à l'eau souterraine. Pour maintenir leur accès à l'eau, ils proposent que l'État investisse dans des forages collectifs au profit des oasiens.

Quant aux agriculteurs des extensions agricoles, ils affirment un manque généralisé d'eau et une méconnaissance des besoins réelles des palmiers dattiers et des techniques d'économie d'eau à

l'échelle de leurs exploitations. D'après ces agriculteurs, la solution face à cette situation de déficit en eau souterraine est de construire des grands et des petits barrages à usage agricole. « *S'il y avait un barrage, on aurait bénéficié des eaux de crues toute l'année pour irriguer nos exploitations agricoles* » déclare un agriculteur de la zone d'extension 'El-bour'. La réalisation d'un barrage à leurs yeux équivaut donc à la création d'une nouvelle ressource avec de l'eau disponible toute l'année.

De manière générale, les agriculteurs des oasis et des extensions agricoles affirment la régression de l'offre en eau d'irrigation. Ils ont tous suggéré que la mise en place des ouvrages et des infrastructures d'irrigation résoudrait les problèmes d'eau dans leurs oasis et exploitations agricoles. D'un côté, les agriculteurs des oasis sont à la recherche des ouvrages d'irrigation collective comme des seuils de recharge de la nappe et d'épandage des eaux de crues, des séguias et des forages collectifs. De l'autre côté, les agriculteurs des extensions agricoles souhaitent bénéficier des eaux de surface moyennant des barrages afin de pallier au manque d'eau souterraine.

Pendant l'atelier de diagnostic participatif, les problèmes annoncés par l'ensemble des participants, à la fois par les agriculteurs des oasis et des extensions agricoles, ont été classés dans un arbre à problème autour du constat central d'un « déséquilibre entre l'offre en eau et la demande ». Quatre problèmes principaux ont été sélectionnés consensuellement comme étant les causes majeures de ce constat. Ces problèmes sont le manque de précipitations et le changement climatique, les problèmes de gestion et de gouvernance, le manque généralisé d'infrastructures d'irrigation et d'autres problèmes divers (figure 26).

Certains participants ont souligné l'importance et la nécessité de se focaliser sur les problèmes de gestion et de gouvernance de l'eau. « *Les problèmes de gestion et de gouvernance responsabilisent tout le monde, l'Etat et les usagers de l'eau* » annonce un agriculteur d'une exploitation agricole. Les différents problèmes ont donc été attribués à différents acteurs : les administrations et des établissements étatiques ; les exploitants de la ressource en eau ; des problèmes de gestion à responsabilité partagée entre l'administration et les usagers de la ressource en eau. Le choix de développer ces problèmes de gestion et de gouvernance ne reflète en aucun cas un délaissement ou un changement de perception vis-à-vis l'importance du manque d'infrastructures d'irrigation aux yeux des agriculteurs. Il s'agit d'une transition du débat sur l'eau depuis l'échelle locale, c'est-à-dire l'oasis et exploitation agricole (ou extensions agricoles) vers l'échelle du territoire. Par exemple, pour les oasiens le sur-pompage dans les extensions agricoles a occasionné le déclin du débit des khettaras. En d'autres termes, une réallocation de l'eau des oasis vers les extensions serait en cours (Figure 26).

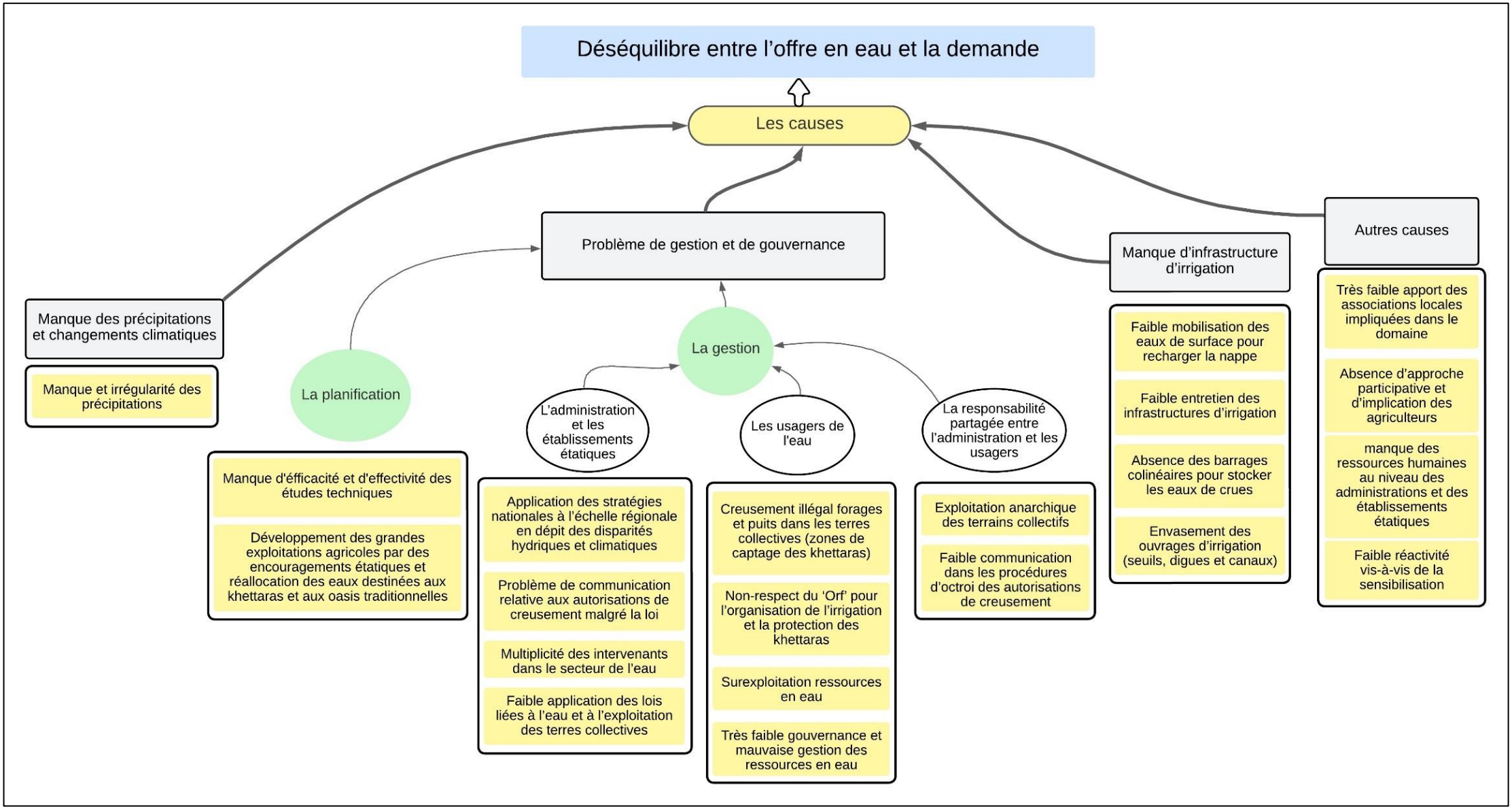

Figure 26. Arbre à problème du constat « déséquilibre entre l'offre eau disponible et la demande

4.3.4. Présence d'une multitude de tentatives pour faire face au manque d'eau

Les visites de terrains et les discussions avec les participants pendant et en marge des ateliers participatifs ont permis d'identifier une multitude d'initiatives pour faire face au manque d'eau d'irrigation dans la zone de Ferkla. Ces tentatives sont généralement mises en place de manière individuelle ou dans des petits collectifs. Plusieurs agriculteurs exercent le captage des eaux de crues ou des eaux pluviales pour la recharge de la nappe et l'irrigation de leurs parcelles (figure 27c).

D'autres agriculteurs s'organisent de manière collective pour renforcer l'apport en eau des khettaras par pompage solaire (figure 27a ; Khardi et al., 2023). Cependant, nous avons remarqué que l'emplacement des forages exploités par pompage peut être modifié pour aller chercher la nappe vers l'amont afin de pallier à la baisse du potentiel en eau souterraine. Une autre stratégie concerne la réduction de la superficie irriguée, se concentrer sur l'irrigation du palmier dattier, ou encore multiplier ou approfondir ls forages et les puits.

A la fin des ateliers participatifs, une discussion avec quelques participants a permis de mettre en lumière une expérience imminente d'organisation collective des agriculteurs des extensions agricoles. Ces agriculteurs, qui exploitaient les eaux souterraines individuellement, cherchent actuellement à instaurer des règles pour gérer et exploiter collectivement un canal d'épandage de crues installé par l'Etat (figure 27b).



a) Assemblage entre le système de khettara et le pompage par énergie solaire (photo prise dans la zone de captage de la khettara)

b) Instauration des règles de gestion pour un canal d'épandage des eaux de crues qui traversent des exploitations agricoles

c) Captage individuel des eaux de crues pour la recharge de la nappe et l'irrigation à l'échelle de l'exploitation agricole

Figure 27. Photos des tentatives pour renforcer l'offre en eau dans les oasis

4.3.5. Pour une implication de la population locale dans toutes les décisions et les projets liés à l'eau dans la zone

Pendant les ateliers, les participants ont eu l'occasion de travailler en groupe pour aboutir à des résultats consensuels et collectifs (figure 28). Ils ont également dépassé les tentatives individuelles pour proposer la généralisation de plusieurs solutions et propositions collectives à l'échelle de tout le territoire. Parmi les propositions, on note la mise en place des forages collectifs dans les zones d'extensions, la négociation des parts d'eau souterraine et la mise en place des compteurs à l'échelle des forages et puits individuels et une réinstauration innovante des droits et des lois coutumières de l'eau - El-Orf - à l'échelle de tout le territoire (Tableau 5). En effet, les participants ont proposé d'instaurer une gestion sociale de l'eau et des terres en reconsidérant le rôle des Jemâas et de rénover les procédures juridiques et les règles de gestion ancestrale des droits d'eau pour répartir l'eau selon les superficies cultivées. Les participants ont également proposé d'impliquer les « Nayb » des terrains collectifs (e.g. représentants de populations auprès de l'autorité locale) pour faciliter la communication avec les populations locales (tableau 5).



Figure 28. Etape de Dessin sur des supports vierges en sous-groupes par les participants lors de l'atelier de l'état des lieux participatif moyennant.

L'une des propositions soulevées pendant la co-construction des solutions est l'implication de la population locale (agriculteurs et riverains) dans toutes les décisions et les projets liés à l'eau dans le territoire. D'un côté, les participants ont évoqué la non prise en compte du savoir local et des besoins de la population lors de la conception et de la mise en place de certains ouvrages hydrauliques (e.g. connaissance des zones avec des potentiels d'infiltration depuis l'oued importants, éloignement entre ces ouvrages et les collectifs des agriculteurs qui peuvent à la fois bénéficier de l'effet de ces ouvrages et d'assurer leurs travaux d'entretien). D'un autre côté, le diagnostic participatif a mis le point sur les limites des études techniques standards qui sont souvent transposées depuis d'autres contextes non-

oasiens (e.g. encouragement de l'extension agricole basée sur le pompage des eaux souterraines moyennant des subventions étatiques dans ce contexte oasien). D'après les participants, ces études ne prennent pas en compte la vision des agriculteurs et les spécificités du territoire oasien.

En somme, les solutions coconstruites peuvent être classées entre : i) des solutions relatives à la gestion avec différents niveaux de responsabilité (de l'Etat, des usagers et partagée entre l'Etat les agriculteurs et associations) ii) des propositions d'amélioration de l'infrastructures d'irrigation iii) des solutions liées à la gestion de la demande iv) des solutions en lien avec le foncier irrigué. (Tableau 5).

Tableau 5. L'*échelle de consensus de quelques solutions proposées par les participants*

Solutions proposées	Echelle de consensus (11 participants ont participé à cette activité)			
	Je porte	J'appuie	Je peux vivre avec	Je mets mon véto
Solutions relatives à la gestion de la ressource en eau				
Apporter des solutions innovations pour améliorer la gestion ancestrale des droits d'eau (« Aster ») en se basant sur la participation des agriculteurs,	7	0	0	0
Implication des « Nayb » des terrains collectifs pour faciliter la communication avec les populations des Ksars et utiliser des points de diffusions de l'information (Ecole, Mosquée…) et / ou utiliser les réseaux de sociaux	4	5	0	0
Considérer l'eau (de surface et souterraine) comme un bien commun et agir sur cette base	2	5	0	0
Adaptation des AUEA avec les spécificités sociales de la zone et prendre en compte le « Orf »	1	3	1	0
Application et adaptation des lois sur l'eau (renforcement des actions de la police de l'eau…)	2	2	1	0
Des propositions d'amélioration de l'infrastructures d'irrigation				
Implication de l'Etat dans les travaux d'entretiens des grands ouvrages hydrauliques (Couts d'entretien très élevé pour la population)	3	8	0	0
Implication de la population locale dans les études techniques primaires de réalisation des ouvrages hydrauliques ;	2	6	2	0
Prise d'initiative par les agriculteurs individuellement ou collectivement pour entretenir les ouvrages hydrauliques	4	5	0	0
Construction des seuils de recharge de la nappe, barrage et digue de dérivation selon le besoin et les spécificités de la zone ;	3	5	0	0
Adopter des approches innovantes pour résoudre le problème d'envasement des ouvrages de recharge notamment l'implication de la commune pour exploiter et valoriser la vase	2	5	0	0
Implication de la population lors de la réalisation des ouvrages hydrauliques et assurer une gestion collective de ces ouvrages ;	2	5	0	0

Des solutions liées à la gestion de la demande				
Arrêter les cultures consommatrices en eau et se baser essentiellement sur le palmier dattier en agriculture ;	4	4	1	0
Mise en place des compteurs à l'échelle des exploitations agricoles et apporter une dotation d'eau gratuite aux agriculteurs basée sur une étude. Une tarification de l'eau est applicable en cas de dépassement de la dotation gratuite	3	5	1	0
Arrêter l'extension des superficies agricoles	0	6	1	0
Mise en place des forages collectifs équipés par des compteurs dans les zones d'extensions agricoles ;	1	4	1	0
Solution en lien avec le foncier irrigué				
Mise en place d'une gestion sociale de l'eau et des terres ; rénovation des procédures juridiques pour la répartition de l'eau selon les superficies cultivées ;	1	5	0	0

4.4. Discussion et conclusion

Le processus participatif montre qu'en dépit des efforts institutionnels et organisationnels existants, les oasis du Maroc connaissent des difficultés et des contraintes liées à la gouvernance de l'eau qui mènent, d'après le panel mixte des acteurs mobilisés, à un déséquilibre considérable entre l'offre en eau et ses usages. Les solutions mises en place par les agriculteurs de manière individuelle ou en petit collectif permettent de renforcer l'offre en eau voire pallier au manque d'eau localement sans tenir compte des autres usages de l'eau à l'échelle du bassin versant. Les tentatives menées jusqu'à présent manquent d'une vision d'ensemble sur tout le bassin versant et reflètent une course effrénée vers les eaux à l'échelle du territoire oasien.

Dans les premiers ateliers, les participants affirmaient l'existence d'une situation d'anarchie, entraînant un déclin de la nappe, une exclusion de certains agriculteurs, et *in fine* un sentiment d'insécurité et incertitude pour l'avenir du territoire. Lors du dernier atelier, ils ont proposé des solutions collectives à généraliser sur tout le territoire. En outre, la rénovation des procédures juridiques et des règles ancestrales des droits d'eau qui ne peut être atteinte qu'avec une reconsidération du rôle des *Jemâas* ont été évoquées par les participants. Ainsi, le processus participatif a été une occasion de croisement des regards entre les différents usagers de l'eau du territoire et de changement d'angle d'analyse des agriculteurs depuis un discours autours de l'infrastructure d'irrigation vers un discours de gestion de l'eau à l'échelle du territoire. De manière générale, la gouvernance de l'eau invite à dépasser l'approche purement technique de la gestion de l'eau pour prendre en compte les facteurs humains et environnementaux (Bakker and Morinville, 2013).

L'ensemble des propositions coconstruites dans les ateliers participatifs suggèrent la nécessité de concevoir et de mettre en place un nouveau modèle de gouvernance de l'eau dans le territoire oasien. En effet, la gestion communautaire (e.g. d'une khettara ou d'un réseau d'épandage des eaux de crues) assure une gestion très localisée de l'eau à l'échelle d'un bassin. Cette gestion est impactée par les autres décisions prises dans le bassin notamment le pompage depuis la nappe alimentant ces oasis ou la construction d'un barrage à leurs amonts. De l'autre côté, la gestion centralisée s'affronte au manque des outils et du capital humain pour assurer l'exploitation de la ressource suivant les règles et les lois établis (e.g. lutter contre le pompage illicite, interdire le pompage dans les zones de captages des khettaras, assurer le bon fonctionnement des ouvrages d'épandage des eaux de crues et de recharge de la nappe). Ainsi, la gestion concertée de la ressource en eau qui repositionne les usagers de l'eau en l'occurrence les Jemâas dans l'arbitrage et la gestion de l'eau à l'échelle du territoire s'avère une alternative au modèle actuel de gestion des eaux dans les oasis -centralisé à l'échelle du bassin et à la fois communautaire à l'échelle locale- qui a montré ses limites.

En effet, la gestion participative propose un modèle de gestion intermédiaire (Dionnet et al., 2020). Ce modèle devrait être basé sur la concertation et l'implication des usagers locaux comme étant des partenaires dans la gestion de la ressource en eau. Par ailleurs, leurs savoir locaux (connaissances sur l'hydrogéologie de la zone, les règles d'arbitrage et de partage de l'eau) devraient être reconnus et valorisés. L'implication des acteurs locaux (les agriculteurs et la société civile) dans la prise de décision et leur responsabilisation reflètent la transition d'une gestion centralisée à une gestion concertée des ressources en eaux ce qui s'inscrit dans le concept de gouvernance de l'eau au sens large (Sehring, 2009).

Pour évoluer collectivement vers un nouveau modèle de gouvernance de l'eau dans le contexte oasien, l'Etat -à travers ses institutions- pourrait assurer le rôle de stabilisateur et/ou accélérateur des projets collectifs basés sur la concertation surtout que le cadre institutionnel et juridiques, les outils et étapes nécessaires pour entreprendre la démarche participative sont élaborés et documentés au Maroc.

Chapitre 5

Conclusion générale

Chapitre 5 : Conclusion générale

A l'issue de ce travail de thèse où nous avons essayé de cerner et d'analyser le contexte hydrologique et institutionnel dans les oasis du Maroc, il a été conclu que la gestion de l'eau dans ce territoire confronte deux défis. Premièrement, la demande en eau est en augmentation pour le développement de l'activité agricole (extensions du palmier dattier), l'approvisionnement en eau potable (liée à l'amélioration du niveau de vie et l'accroissement de la population) et d'autres activités économiques (tourisme, industrie minière) dans ce contexte aride à faibles ressources en eau. Deuxièmement, la gestion des ressources en eau a connu plusieurs changements : i) le développement du pompage individuel dans les extensions agricoles fait concurrence à la gestion communautaire des eaux d'irrigation dans les oasis ; ii) l'installation des grands barrages pour sécuriser l'approvisionnement en eau potable représente une prise de contrôle progressive sur les eaux de surface par l'Etat et il prive directement et indirectement les oasis irriguées par épandage des eaux de crues et les oasis basées sur les khettaras des eaux.

La thèse part de l'hypothèse que *les innovations de mobilisation des ressources en eau pour l'irrigation qui sont considérées comme des bonnes pratiques -par certains acteurs associatifs et de développement, chercheurs et des agriculteurs- peuvent perturber les flux d'eau à l'échelle du territoire oasien*. Elle avait comme objectif d'étudier et de comprendre deux innovations de mobilisation des eaux d'irrigation présentes dans le territoire de Todgha-Ferkla (Maroc) et d'engager une réflexion territoriale sur la gestion de l'eau d'irrigation moyennant un processus participatif.

Afin d'aboutir à l'objectif central de la thèse, la question de recherche est formulée comme suit : **Comment les innovations techniques de mobilisation des eaux d'irrigation changent-elles les flux d'eau et sa gestion dans un territoire oasien ?** et trois objectifs spécifiques ont été fixés à savoir :

- ✓ Analyser la double finalité d'un dispositif de captage des eaux de crues : une première fonction de recharge de la nappe souterraine par infiltration et une seconde fonction de stockage d'eau pour l'irrigation de surface à l'échelle d'une exploitation agricole oasienne.
- ✓ Comprendre les motivations et les arrangements qui ont favorisé l'émergence du dispositif associant le système des khettaras au pompage par énergie solaire dans les anciennes oasis.
- ✓ Conduire une réflexion territoriale moyennant une approche participative autour de la gouvernance de l'eau à l'échelle du territoire.

En l'absence d'une connaissance suffisante des différents flux d'eau à l'échelle du bassin versant (e.g. les précipitations, les écoulements de surface et le potentiel en eaux souterraines réellement disponible), cette thèse s'est fixée comme objectif l'analyse des dispositifs locaux (i.e. ; à l'échelle

d'une exploitation agricole et d'une oasis) de mobilisation de l'eau d'irrigation afin de comprendre leurs impacts sur les flux d'eau dans ce bassin versant présaharien. L'approche déployée combine : i) des mesures physiques de terrain pour observer les fluctuations des niveaux d'eau suite au captage des eaux de crues, ii) des calculs des bilans hydriques et une modélisation hydrogéologique de l'infiltration du bassin de captage pour objectiver les différentes modifications des flux d'eau qui surviennent; iii) des enquêtes de terrain pour comprendre les règles de gestion des khettaras solaires, iv) une analyse des images satellitaires pour chiffrer l'évolution des superficies irriguées, v) l'animation et la facilitation d'un processus participatif pour conduire une réflexion territoriale sur la gestion de l'eau.

Premièrement un dispositif de mesure a été mis en place au niveau d'une exploitation agricole où les eaux de crues sont captées pour caractériser les modifications des flux d'eau qui se produisent. A ce niveau on note que les événements de crues sont très rares dans ce territoire oasien. Pendant deux années de mesures, 6 événements de crues ont eu lieu au total. Après la première année de mesure, 3 crues ont été enregistrées et analysées. Les mesures concernaient le niveau d'eau dans le bassin et les niveaux piézométriques d'un puits au milieu dudit bassin et deux forages respectivement à 30m et à 360m de la rive gauche dudit bassin. Il s'est avéré que les points de mesure les plus proches du bassin de captage des eaux de crues ont des réactions similaires en matière de l'évolution du niveau d'eau par rapport à celui du bassin. En revanche, les fluctuations du niveau piézométrique au forage qui est à plus de 360m de ce bassin soulevaient des doutes qui ne pouvaient pas être directement expliquées par l'infiltration depuis le bassin. Ainsi, on a déployé la modélisation analytique pour appréhender ces fluctuations piézométriques très rares dans le temps. On affirme que la modélisation analytique de la recharge de la nappe apporte des éléments de réponse pour mieux comprendre les flux d'eau dans des milieux assez complexes : i) méconnaissance de l'hydrogéologie de la zone ; ii) présence de différentes causes de la recharge de la nappe (Oued, bassin de captage des crues, impacts des exploitations et zones mitoyennes et retour d'irrigation).

Cependant, notre analyse s'est limitée au suivi des processus physiques d'infiltration et de pompage depuis le bassin de captage des eaux de crues. Pour comprendre les flux d'eau d'irrigation des palmiers dattiers dans cette exploitation agricole, des enquêtes ont été menées avec l'agriculteur pour comprendre ses pratiques d'irrigation et des bilans d'eau dans le sol ont été calculés. Nous n'avons pas mesuré la teneur en eau au niveau de la zone racinaire. Ces mesures pourraient apporter une connaissance plus fine des flux d'eau qui rechargent la nappe par retour d'irrigation.

Quant à la Khettara solaire, la démarche scientifique s'est focalisée sur la compréhension des motivations externes et des arrangements internes qui ont favorisé l'émergence de la khettara solaire

moyennant des enquêtes de terrain et l'analyse des images satellitaires. Il s'avère aussi pertinent d'analyser le fonctionnement hydraulique de la khettara solaire pour distinguer entre les flux d'eau mobilisés par la galerie drainante et par pompage solaire et afin de confronter l'offre en eau disponible aux besoins d'irrigation dans ces oasis.

Le choix de comprendre les enjeux liés à l'eau en analysant les innovations de mobilisation de l'eau d'irrigation observées dans les oasis a permis d'apporter plusieurs éléments de compréhension sur les modifications des flux d'eau à l'échelle locale et régionale. En revanche, nombreuses sont les perspectives de recherche qui permettent de comprendre les changements des flux d'eau et de leur gestion dans les oasis et qui méritent d'être approfondies.

En effet, le captage collectif des eaux de crues pour l'irrigation est une pratique ancestrale qui existe toujours dans les anciennes oasis ; cette pratique a été récemment adoptée par des agriculteurs des extensions agricoles individuelles qui essayent de se réorganiser en collectif pour s'affranchir du manque d'eau. Premièrement, l'impact de l'irrigation par les eaux de crues chargées en sédiments sur le sol et sur les plantes devrait être analysé. Deuxièmement, l'organisation sociale autour de ces eaux notamment leur gestion et l'entretien des infrastructures d'irrigation mérite d'être cernée. Troisièmement l'impact cumulé du captage des eaux de crues sur l'hydrologie et l'hydrogéologie du bassin versant mérite d'être évalué.

De surcroit, il s'avère pertinent de développer des techniques efficaces pour extraire et exploiter la vase décantée au niveau des digues d'épandage des eaux de crues, des canaux d'irrigation et des seuils de recharge de la nappe pour les valoriser (en agriculture ou autre secteur). Enfin, les pratiques d'irrigation à l'échelle des exploitations agricoles et à l'échelle des anciennes oasis méritent d'être analysées.

La thèse conclut que les innovations étudiées apportent des solutions limitées dans l'espace et dans le temps et elles contribuent à la fermeture progressive du bassin vu la surexploitation de la ressource souterraine et la création d'un déséquilibre entre l'amont et l'aval du bassin versant. Les crues et les eaux souterraines sont de plus en plus captées – à priori pour l'irrigation- à l'amont ce qui entraine une baisse des apports et de la recharge de la nappe à l'aval et par conséquent un rabattement des niveaux piézométriques. En d'autres termes, les innovations identifiées et analysées visent principalement à mobiliser l'eau à des fins d'irrigation ; il s'agit de ce fait d'une réallocation des ressources en eau dans une perspective d'extension de la culture du palmier dattier et les agriculteurs à l'amont du bassin sont toujours avantagés. Cette réallocation est cependant implicite et n'est pas prise en considération dans la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant.

Les tentatives menées par les agriculteurs de manière individuelle ou par de petits collectifs se focalisent essentiellement sur le développement local de l'offre en eau d'irrigation et elles restent tributaires des autres actions à l'échelle du bassin versant (e.g. construction d'un barrage ou dérivation de l'eau en amont ; multiplication des pompages à leurs voisinage). La réflexion territoriale a démontré la nécessité d'évoluer collectivement vers un nouveau modèle de gouvernance des eaux dans les oasis pour dépasser les tentatives individuelles et pour impliquer l'ensemble des acteurs à savoir l'Etat à travers ses différentes institutions (ORMVAs, ANDZOA et ABH) et les usagers de l'eau dans la gestion des ressources en eau.

En somme, les aboutissements de la thèse montrent que les innovations apportées dans ce bassin versant contribuent à la modification des flux d'eau de manière locale voire régionale (e.g. dans une exploitation agricole, pour une nappe alimentant les khettaras) et par conséquent confirment l'hypothèse de départ de ce travail de recherche.

Le captage des eaux de crues à des fins agricoles : quels changements et quelles limites ?

Les agriculteurs des extensions agricoles cherchent actuellement à mobiliser l'eau des crues. Le dispositif de captage des crues que l'un de ces agriculteurs a installé à l'échelle de son exploitation agricole a deux finalités opposées : d'une part il devrait favoriser l'infiltration pour recharger la nappe et d'autre part il sert concrètement à stocker l'eau pour l'irrigation de l'exploitation, ce qui nécessite plutôt une imperméabilisation du fond du bassin.

Selon notre analyse, la recharge effective de la nappe moyennant ce dispositif s'avère très limitée en volume vue l'hétérogénéité de l'hydrogéologie de la zone. Les observations de terrain qui sont appuyées par la modélisation analytique montrent qu'à partir d'une distance de 360m, l'effet depuis le bassin n'a plus d'impact sur la recharge de l'aquifère. Les eaux infiltrées moyennant ce dispositif auraient percolé vers des aquifères plus profonds ou elles étaient interceptées dans des zones moins fracturées de l'aquifère (Guihéneuf et *al.*, 2014).

Au début de la période d'observation de ce dispositif, l'agriculteur a planté des palmiers dattiers au fond du bassin de captage des eaux de crues et il a arrêté les opérations d'extraction des vases depuis ledit bassin. L'envasement du bassin après chaque crue a réduit au même temps ses capacités de stockage et d'infiltration pour recharger la nappe. Les calculs du bilan hydrique à l'échelle du bassin ont montré que la proportion des volumes d'eau pompée pour l'irrigation par rapport aux eaux infiltrées passe du simple au triple le long des 5 crues analysées. L'évaporation et l'évapotranspiration des palmiers représentent moins de 6% des volumes d'eau captée dans le bassin pour les 5 événements de crues analysés. Ainsi, le pompage direct depuis ce bassin pour irriguer les palmiers dattiers compense toute augmentation de l'évaporation et assure un bénéfice direct des crues.

Le suivi du niveau de la nappe phréatique par un piézomètre qui se trouve à 360 m du bassin a montré une réaction de la nappe après les deux premières crues. Moyennant la modélisation analytique et le bilan hydrique dans le sol, nous avons montré qu'une irrigation prolongée dans le temps suite à l'arrivée de plusieurs crues rapprochées dans le temps peut recharger la nappe par percolation profonde des eaux d'irrigation.

Les dispositifs de mobilisation des eaux de crues individuelles permettent de substituer occasionnellement les eaux souterraines dans ce climat aride. En contrepartie, leur multiplication changerait considérablement les flux d'eau à l'échelle du bassin et elle pourrait condamner la recharge de la nappe à l'échelle du bassin versant. De surcroit, le captage individuel des eaux de crues reste tributaire de la position de l'exploitation agricole par rapport au réseau hydrographique et de la capacité de l'agriculteur à financer l'installation et l'entretien de son dispositif par ses moyens propres.

<u>La Khettara solaire ; un choix cornélien dans un contexte de course vers les eaux souterraines</u>

Les oasis irriguées par les khettaras connaissent une régression importante des débits d'eau d'irrigation. Le pompage pour l'irrigation des exploitations agricoles et pour l'alimentation en eau potable combiné à la régression des flux d'eau rechargeant la nappe sont à l'origine du tarissement des khettaras. Face à cette situation, certains collectifs d'irrigants utilisant les khettaras ont décidé de rejoindre la course aux eaux souterraines pour continuer à survivre. Ils ont associé leur système ancestral de captage de l'eau souterraine à un dispositif de pompage par énergie solaire alimentant la khettara à partir de puits. Ils ont adapté leurs règles de gestion pour donner naissance à un dispositif que nous appelons la « khettara solaire ».

Notre recherche a montré que l'introduction du pompage et de l'irrigation localisée dans cette zone oasienne ont d'un côté contribué au développement des extensions agricoles et d'un autre côté ont inspiré les collectifs des khettaras. Au départ, le pompage par énergie solaire a été perçu comme une menace pour la khettara et il est maintenant perçu comme une innovation inévitable pour s'adapter à la baisse accélérée des niveaux piézométriques faisant que ce système traditionnel ne peut pas suivre. Cette innovation a le mérite de maintenir des règles de gestion collective de l'eau souterraine.

Quant aux règles de gestion de l'eau d'irrigation, certains collectifs des irrigants ont dû ajuster leurs tours d'eau pour s'adapter à la disponibilité de l'eau qui est pompée par énergie solaire en période diurne. D'autres collectifs ont adapté leurs règles de gestion en séparant les eaux drainées par la khettara et celles pompées par énergie solaire et injectées dans la Khettara. Par ailleurs, ces collectifs se sont inspirés des méthodes ancestrales et ils ont mené des arrangements internes ou externes (e.g. financements de l'Etat et des organismes à buts non-lucratifs) pour financer leurs khettaras solaires.

En somme, l'association entre le système des khettaras et le pompage par énergie solaire illustre les interactions entre la ressource en eau, l'infrastructure et les règles de gestion. Suite à une régression du débit d'irrigation, les collectifs oasiens ont intervenu sur leur infrastructure de captage de l'eau et leurs règles de gestion pour sauvegarder leurs accès collectifs aux eaux souterraines. Cette association entre une technique moderne de pompage et un système ancestral d'irrigation confirme que l'acceptabilité et la faisabilité d'une innovation ne sont pas seulement techniques mais aussi sociales (Akrich ; 1988). En revanche, la khettara solaire contribue à la baisse piézométrique et à l'abandon des anciennes galeries drainantes des khettaras. En outre, elle ne garantirait pas la survie de ces oasis à long terme si l'accès aux eaux souterraines n'est pas arbitré à l'échelle du bassin versant.

Vers un nouveau modèle de gouvernance des eaux dans les oasis du Maroc

Les observations de terrain et l'analyse des deux dispositifs techniques identifiés montrent que le territoire Todgha-Ferkla connait une course généralisée vers les eaux de surface et souterraines. Pour les agriculteurs, la quête de la ressource en eau de surface et souterraine pour l'irrigation prédomine. Ils ne prennent pas en considération les autres usages de l'eau ou les répercussions sur l'environnement (e.g. augmentation de la salinité de l'eau) à l'échelle du bassin versant. La khettara solaire traduit une adhésion collective à la course effrénée aux eaux souterraines. En cas de leur multiplication, les agriculteurs des extensions agricoles individuelles qui captent les eaux de crues priveraient les autres usagers à l'aval du bassin versant des eaux de crues et minimiseraient la recharge naturelle de la nappe à travers le lit de l'oued. En somme, ces tentatives menées par les agriculteurs de manière individuelle ou par petits collectifs permettent de s'affranchir du manque d'eau localement mais elles ne sont pas coordonnées ou arbitrées à l'échelle du bassin versant.

Face à ces défis, on a conduit une réflexion territoriale autour de la gestion des ressources en eau moyennant une démarche participative dans le dessein de dégager des pistes d'action à l'échelle de territoire de Ferkla. Des agriculteurs des extensions agricoles et des anciennes oasis, des représentants institutionnels, des acteurs associatifs et des représentants communaux ont été tous impliqués dans cette réflexion. L'objectif de cette démarche participative est d'établir un échange et une collaboration entre ces parties prenantes. La recherche scientifique qui vise à produire les connaissances et apporter des éléments de réflexion sur l'avenir du territoire a joué un rôle majeur dans l'initiation et l'organisation de cette démarche participative.

L'approche participative est mise en œuvre à travers trois ateliers où les participants ont été amenés à : i) dresser un état des lieux des ressources en eau basé sur des faits, ii) réaliser un diagnostic partagé de la situation hydrique dans leur territoire et finalement iii) coconstruire des solutions pour améliorer

la gouvernance de l'eau. Cette méthodologie progressive encourage une compréhension collective des enjeux et des solutions potentielles. Il s'est avéré nécessaire de partir graduellement depuis l'intégration des intérêts individuels, la valorisation des connaissances individuelles des participants, l'établissement d'un climat de confiance et d'échange basé sur la symétrie entre les participants afin d'atteindre l'intérêt collectif à savoir la co-construction des solutions pour une meilleure gouvernance de l'eau à l'échelle du territoire.

Les agriculteurs des anciennes oasis et des extensions agricoles ont d'abord été mobilisés séparément à travers deux ateliers de préparation avant de réunir l'ensemble des acteurs pour la première fois. Pendant ces ateliers de préparation, les agriculteurs ont confirmé la baisse continue de l'offre en eau d'irrigation. Ils ont aussi proposé de mettre en place plusieurs infrastructures et ouvrages d'irrigation (e.g. pompage solaire collectif dans les anciennes oasis et des barrages pour les exploitations agricoles) pour pallier au manque d'eau. Le diagnostic participatif témoigne d'un cheminement de la part des agriculteurs impliqués dans le processus partant du focus sur les problèmes d'infrastructures pour finalement converger vers une discussion sur les problèmes de gouvernance et de gestion de l'eau, où chacun peut jouer un rôle pour les dépasser. Ce cheminement ne reflète pas pour autant un changement de perception vis-à-vis de l'importance des infrastructures d'irrigation de la part de ces agriculteurs. Le changement d'échelle pour le débat portant jusque-là sur l'oasis ou l'exploitation agricole ; vers l'échelle du territoire, a permis à certains agriculteurs de proposer de se focaliser sur les problèmes de gestion et de gouvernance de l'eau, vu qu'elles impliquent toutes les parties prenantes (l'Etat et les usagers).

L'atelier portant sur l'état des lieux a été l'occasion de croiser les connaissances de l'ensemble des participants sur leur territoire et d'établir un climat de confiance et une charte morale autour des modalités d'interactions pour la suite du processus. Lors de l'atelier de diagnostic partagé, les participants ont validé plusieurs problèmes que nous avons structuré sous forme d'arbre à problèmes autour d'un constat unanime « l'existence d'un déséquilibre entre l'offre en eau et la demande ». Les problèmes énumérés démontrent l'état de fermeture du bassin versant notamment la baisse piézométrique, les conflits d'usage, la multiplication des forages et les problèmes de salinité du sol. Le dernier atelier de co-construction des solutions a été une occasion porteuse pour dépasser les visions individuelles et aller vers des solutions et des propositions collectives qui peuvent être bénéfiques à l'ensemble du territoire et ainsi faire face au manque d'eau. Les participants ont souligné la nécessité d'impliquer les oasiens dans l'ensemble des actions et des décisions liées à l'eau dont dépend la viabilité de leur territoire. En somme, la réflexion territoriale suggère de concevoir et de mettre en place un nouveau modèle de gouvernance de l'eau dans le territoire oasien où le savoir local et les besoins de la population locales sont valorisés et pris en considération. Cette approche reflète une

prise de conscience de l'importance de la durabilité et de la nécessité à long terme d'une approche plus holistique de la gestion de l'eau.

A l'échelle du territoire oasien marocain, on constate des tentatives et des initiatives étatiques récentes pour gérer la demande en eau en l'occurrence les contrats de la nappe de l'axe Meski Boudnib de la nappe Faija à Zagora, des arrêtés provinciaux pour réguler la culture de pastèques à Zagora et Errachidia et dernièrement l'initiative oasis durable déclarée lors du premier congrès international des oasis et des palmiers dattiers à Ouarzazate en mai 2023.

Afin d'améliorer la gestion des ressources en eau et durabiliser les activités anthropiques dans les oasis marocaines, on recommande de :

- **Améliorer la connaissance de la ressource en eau réellement disponible**

A vrai dire, le potentiel en eau disponible dans plusieurs aquifères (comme à l'Anti-Atlas) et les prélèvements par pompage ne sont pas suffisamment connus. De surcroit, les volumes d'eau de crues apportés et prélevés pour l'irrigation ne sont pas encore chiffrés. On propose ainsi d'améliorer les connaissances sur l'état de la ressource en eau disponible et son évolution future qui peut être potentiellement altérée par les changements climatiques afin d'améliorer sa gestion.

- **Maitriser la demande en eau à travers les bonnes pratiques d'irrigation et la limitation des surfaces irriguées**

Afin de durabiliser l'agriculture irriguée dans la région oasienne, les prélèvements d'eau pour l'irrigation (depuis les nappes ou les oueds) peuvent encore être réduits moyennant des bonnes pratiques et techniques économes d'eau. Ces prélèvements peuvent aussi être maitrisés par la limitation des surfaces irriguées.

- **Développer un modèle de gouvernance de l'eau adapté au contexte oasien où la population locale est impliquée et responsabilisée**

La réflexion territoriale entreprise a montré les limites du modèle actuel de gestion de l'eau dans les oasis. Les participants au processus participatif ont soulevé la présence de plusieurs intervenants étatiques qui opèrent indépendamment sur le terrain et la non prise en compte des spécificités de la région, des besoins réels de la population et de leur savoir local. On propose de repenser collectivement (Etat, usagers, société civile et chercheurs) le modèle actuel de gestion de l'eau dans le dessein d'élaborer un nouveau modèle de gestion basée sur la concertation territoriale. La population oasienne devrait être impliquée et responsabilisée dans tous les projets et les actions liés à la ressource en eau dont dépend la viabilité de leur territoire.

Ce modèle qui est censé être axé sur une approche territoriale pour la gestion de l'eau devrait prévoir un cadre adéquat de concertation et de dialogue entre tous les acteurs. L'ANDZOA pourrait jouer un rôle fondamental dans l'élaboration, la coordination et l'instauration de ce nouveau modèle.

Enfin, les travaux de recherche développés dans la présente thèse peuvent être complétés par d'autres perspectives de recherche. Un système de comptabilité de l'eau à l'échelle des régions oasiennes devrait être développé afin de chiffrer les stocks d'eau existants et leurs flux et d'identifier les opportunités d'une gestion optimale et durable des ressources en eau. L'impact des ouvrages de recharge de la nappe installés par l'Etat sur les lits des oueds devrait être objectivé. Les prélèvements des eaux de crues pour l'irrigation moyennant les digues d'épandage des eaux de crues devraient être évalués.

Activités scientifiques

Activités scientifiques

Productions scientifiques dans le cadre de la thèse

Khardi, Y., Lacombe, G., Kuper, M., Taky, A., Bouarfa, S., Hammani, A., 2023. Pomper ou disparaître : le dilemme du renforcement des khettaras par le pompage solaire dans les oasis du Maroc. Cah. Agric. 32, 1. https://doi.org/10.1051/cagri/2022030

Khardi Y, Lacombe G, Dewandel B, Taky A, Maréchal JC, Hammani A, Bouarfa S. Managed groundwater recharge at the farm scale in pre-Saharan Morocco. Special Issue: IAHS2022 – Hydrological sciences in the Anthropocene: Past and future of open, inclusive, innovative, and society-interfacing approaches. https://doi.org/10.5194/piahs-100-1-2023 *(accepté, Prêt pour publication)*

Khardi Y., Zein Taleb Z., Imache A., Kuper M., Bouarfa S., Hammani A., Lacombe G., Taky A.. Penser la gestion de l'eau à l'échelle territoriale dans les oasis du Maroc : le cas de Ferkla. Alternatives Rurales *(Soumis, en cours de révision par les relecteurs)*

Khardi Y., Lacombe G., Dewandel B., Hammani A., Taky A., and Bouarfa S.. Conjunctive use of floodwater harvesting for managed aquifer recharge and irrigation on a date palm farm in Morocco. Irrigation and Drainage *(Soumis, en cours de révision par les relecteurs)*

Séminaires et journées doctoriales :

1. Participation au séminaire de restitution du projet COSTEA (du 21 au 25 novembre 2022)
2. Participation aux doctoriales de l'école doctorale GAIA (Université de Montpellier) le 08 juin 2022
3. Participation au congrès scientifique de l'Association Internationale des Sciences Hydrologique (AISH, 2022)
4. Participations aux séminaires annuels du projet MASSIRE :
    a. Le 09 et le 10 avril 2020 ;
    b. Le 09 et le 10 novembre 2020 ;
    c. Le 06 et le 07 décembre 2021.

Congrès scientifiques

1. Communication orale au congrès scientifique de l'Association Internationale des Sciences Hydrologique (AISH, 2022)
   Lien utile : https://meetingorganizer.copernicus.org/IAHS2022/IAHS2022-188.html
2. Participation au congrès international des oasis et du palmier dattier (Ouarzazate, mai 2023)

Autres activités scientifiques

- Atelier d'écriture scientifique en Anglais animé par Daphne Goodfellow. Du 20-23 juin 2022, Moulay Driss Zarhoun (Meknès, Maroc)
- Atelier de restitution des activités du COSTEA au Maroc (Rabat, Mars 2023)
- TP modélisation hydrogéologique au profit des étudiants de la 3ème année cycle d'ingénieur en Génie Rural de l'IAV Hassan-II

Références bibliographiques

Références bibliographiques

ABHGZR, Agence du basin hyraulique Guir Ziz Rhéris, 2019, Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau

Adato M; 1987; Runoff Agriculture for Arid and Semi-Arid Lands. Prospects based on Research at the Desert Runoff Farms in the Negev Desert of Israel; Desert Runoff Farms Unit.

Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéris, Etude de délimitation des périmétres de sauvegarde et d'interdiction des têtes des khettaras au niveau de la province d'errachidia, Rapport de la mission 3, 2014.

Agence Japonaise de coopération internationale. 2005. Étude de développement du projet de développement des communautés rurales à travers la réhabilitation des khettaras dans les régions semi-arides de l'Est Sud-Atlasique au royaume du Maroc Recueil des données, 343 p. [Google Scholar]

Ahmadi, H., Nazari Samani, A., Malekian, A., 2010. The Qanat: A Living History in Iran, in: Schneier-Madanes, G., Courel, M.-F. (Eds.), Water and Sustainability in Arid Regions: Bridging the Gap Between Physical and Social Sciences. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 125–138. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2776-4_8

Aït Hamza, M. (1999), Mobilité socio-spatiale et développement local au Sud de l'Atlas marocain (Dadès-Toudgha), Thèse de doctorat d'Etat, FLSH. Université Mohammed V – Agdal, Rabat.

Akrich M, Callon M, Latour B. 1988. À quoi tient le succès des innovations ? 1 : L'art de l'intéressement ; 2 : Le choix des porte-parole. In: Gérer et comprendre. Annales des mines. Paris (France) : Éditions ESKA, 11-12: 4–17 & 14–29. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00081741. [Google Scholar]

Allaoui, S., Elouali, M., Kabiri, L., Jaakou, A., 2018. Ne pas gaspiller l'eau de pluie, s'organiser pour exploiter les eaux de crues dans l'oasis de Tinejdad | RADDO.

Al-Ismaily, H., Probert, D., 1998. Water-resource facilities and management strategy for Oman. Appl. Energy 61, 125–146.

Ameur, F., Quarouch, H., Dionnet, M., Lejars, C., Kuper, M., 2015. Outiller un débat sur le rôle des jeunes agriculteurs dans une agriculture en transition dans le Saïss (Maroc). Cah. Agric. 24, 363–371. https://doi.org/10.1684/agr.2015.0786

ANDZOA, 2016. Atelier de démarrage du PACCZO | L'Agence Nationale pour le Développement des Zones Oasiennes et de l'Arganier [WWW Document],. URL http://andzoa.ma/fr/2016/01/26/atelier-de-demarrage-du-pacczo/ (accessed 6.26.23).

Arshad, M., Guillaume, J.H.A., Ross, A., 2014. Assessing the Feasibility of Managed Aquifer Recharge for Irrigation under Uncertainty. Water 6, 2748–2769. https://doi.org/10.3390/w6092748

Association Anounizem pour le Développement. 2014. [2022/04/12]. https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=pfbid06NHX6Dt8BTQdVLxzKnZm5nLwPNXZ6j3a3WD1KcNS2pmxeuEfdWHUe4SJivpeMts2l&id=534845203221099. [Google Scholar]

Ayphassorho H, Sallenave M, Bertrand N, Mitteault F, Rollin D. 2022. Quelles perspectives pour l'eau et l'agriculture d'ici à 2050 dans le contexte du changement climatique ? Annales des Mines Responsabilité et environnement 106(2): 81–84. https://doi.org/10.3917/re1.106.0081. [CrossRef] [Google Scholar]

Bakker, K., Morinville, C., 2013. The governance dimensions of water security: a review. Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci. 371, 20130116. https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0116

Baldwin, C., Ross, H., 2012. Bridging Troubled Waters: Applying Consensus-Building Techniques to Water Planning. Soc. Nat. Resour. 25, 217–234. https://doi.org/10.1080/08941920.2011.578120

Beckers, B., Schütt, B., 2013. The elaborate floodwater harvesting system of ancient Resafa in Syria – Construction and reliability. J. Arid Environ. 96, 31–47. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.04.004

Benouniche, M., Kuper, M., Hammani, A., 2014. Mener le goutte à goutte à l'économie d'eau: ambition réaliste ou poursuite d'une chimère? Altern. Rural.
Bensaâd Ali, 2011. L'eau et ses enjeux au Sahara, Hommes et sociétés. Paris Aix-en-Provence: Karthala IREMAM.
Berking, J., 2018. Water Harvesting in Drylands - Water Knowledge from the Past for our Present and Future.
Bisson J. 1992. Les foggaras du Sahara algérien : déclin ou renouveau. In : Balland D, ed. Les eaux cachées. Études géographiques sur les galeries drainantes souterraines, pp. 7–26. [Google Scholar]
Bisson J. 2003. Le Sahara : mythes et réalités d'un désert convoité. Paris (France) : L'Harmattan, 479 p. [Google Scholar]
Boisson, A., Baïsset, M., Alazard, M., Perrin, J., Villesseche, D., Dewandel, B., Kloppmann, W., Chandra, S., Picot-Colbeaux, G., Sarah, S., Ahmed, S., Maréchal, J.C., 2014. Comparison of surface and groundwater balance approaches in the evaluation of managed aquifer recharge structures: Case of a percolation tank in a crystalline aquifer in India. J. Hydrol. 519, 1620–1633. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.022
Bouaziz, A., Hammani, A., Kuper, M., 2018. Les oasis en Afrique du Nord : dynamiques territoriales et durabilité des systèmes de production agricole. Cah. Agric. 27, 14001. https://doi.org/10.1051/cagri/2017063
Bouwer, H., 1996. Issues in artificial recharge. Water Sci. Technol., Wastewater Reclamation and Reuse 1995 33, 381–390. https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00441-6
Brodie, R., Sundaram, B., Tottenham, R., Hostetler, S., Ransley, T., 2007. An Overview of Tools for Assessing Groundwater-Surface Water Connectivity.
Bruand, A., Duval, O., Cousin, I., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO: Une première proposition combianant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. Étude Gest. Sols.
Casanova, J., Cagnimel, M., Devau, N., Pettenati, M., 2013. Recharge artificielle des eaux souterraines : état de l'art et perspectives 227.
Comptabilité de l'eau | Mieux connaître l'eau: vers un accès plus équitable et plus durable aux ressources naturelles - KnoWat | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [WWW Document], n.d. URL https://www.fao.org/in-action/knowat/comptabilite-de-leau/fr/ (accessed 8.7.23).
COSTEA, 2020. Prévenir la dégradation et la surexploitation des eaux souterraines. https://www.comite-costea.fr/production/prevenir-la-degradation-et-la-surexploitation-des-eaux-souterraines/
de Haas, H., n.d. Gestion d'eau dans les oasis marocaines, migrations et le rôle de l'état: crise ou transformation? L'exemple du Todgha-Ferkla 15.
Del Vecchio, K., 2020. Gestion des eaux souterraines au Maroc : Entre priorités du développement agricole et préoccupations environnementales [WWW Document]. COSTEA. URL https://www.comite-costea.fr/production/gestion-des-eaux-souterraines-au-maroc-entre-priorites-du-developpement-agricole-et-preoccupations-environnementales/ (accessed 7.20.23).
Delville, P.L., 2011. Pour une anthropologie symétrique entre « développeurs » et « développés ». Cah. D'études Afr. 51, 491–509. https://doi.org/10.4000/etudesafricaines.16752
Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C., Krishnamurthy, N.S., 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. J. Hydrol., Hydro-ecological functioning of the Pang and Lambourn catchments, UK 330, 260–284. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026
Dewandel, B., Lanini, S., Hakoun, V., Caballero, Y., Maréchal, J.-C., 2021. Artificial recharge of aquifers and pumping: transient analytical solutions for hydraulic head and impact on streamflow rate based on the spatial superposition method. Hydrogeol. J. 29, 1009. https://doi.org/10.1007/s10040-020-02294-9

Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R.D.G., Jain, R.C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B.R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., Rossetto, R., Shamrukh, M., Pavelic, P., Murray, E., Ross, A., Bonilla Valverde, J.P., Palma Nava, A., Ansems, N., Posavec, K., Ha, K., Martin, R., Sapiano, M., 2019. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. Hydrogeol. J. 27, 1–30. https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z

Dione A. 2012. Analyse de la durabilité des dynamiques d'extension des systèmes oasiens du Tafilalet, Sud-Est du Maroc. Master of Science Natura « Acteurs du Développement Rural » ; IRC Montpellier SupAgro, Montpellier, France, 122 p. [Google Scholar]

Dionnet, M., Imache, A., Barbe, A., Chaouni, M., Berjamy, B., Haering, M., Fririka, A., 2020. Guide d'orientation pour une gestion participative et contractuelle de l'eau au Maroc. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30843.95527

El Khoumsi , Intercations hydriques palmier dattier-nappe phréatique et leurs impacts sur l'évolution des palmeraies : - cas des oasis de Tafilalet (Maroc), 203 pp, ISBN : 978-9981-801-81-3, 2017

El Meknassi Yousoufi, E., Hammani, A., Kuper, M., Bouarfa, S., Vallée, D., 2023. Water accounting in the Berrechid plain (Morocco): A process approach. Irrig. Drain. n/a. https://doi.org/10.1002/ird.2858

Faiz ME, Ruf T. 2010. An introduction to the Khettara in Morocco: Two contrasting cases. In: Schneier-Madanes G, Courel MF, eds. Water and sustainability in arid regions: Bridging the gap between physical and social sciences. Dordrecht (The Netherlands): Springer, pp. 151–163. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2776-4_10. [Google Scholar]

FAO, 2020. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2020: Relever le défi de l'eau dans l'agriculture, The State of Food and Agriculture (SOFA). FAO, Rome, Italy. https://doi.org/10.4060/cb1447fr

Faraj C, Janah S. 2020. Potentiel de développement du pompage solaire dans la région de Toudgha. 181 p. [Google Scholar]

Fassi, D., 2017. Les oasis du Monde, carrefour des civilisations et modèle fondamental de durabilité. Cah. Agric. 26, 46001. https://doi.org/10.1051/cagri/2017037

Faysse, N., Rinaudo, J.-D., Bento, S., Richard-Ferroudji, A., Errahj, M., Varanda, M., Imache, A., Dionnet, M., Rollin, D., Garin, P., Kuper, M., Maton, L., Montginoul, M., 2014. Participatory analysis for adaptation to climate change in Mediterranean agricultural systems: possible choices in process design. Reg. Environ. Change 14, 57–70. https://doi.org/10.1007/s10113-012-0362-x

Fofack, R., Kuper, M., Petit, O., 2015. Hybridation Des Règles D'accès À L'eau Souterraine Dans Le Saiss (maroc): Entre Anarchie Et Léviathan? Études Rural. 127–149.

Foucault, M., 1977. Discipline and punish: the birth of the prison, 1st American ed. ed. Pantheon Books, New York.

Gee, G.W., Hillel, D., 1988. Groundwater recharge in arid regions: Review and critique of estimation methods. Hydrol. Process. 2, 255–266. https://doi.org/10.1002/hyp.3360020306

Ghodbani T, Dari O, Bellal SA, Hadeid M. 2017. Entre perte de savoirs locaux et changement social : les défis et les enjeux de la réhabilitation des foggaras dans le Touat, Sahara algérien. Autrepart 81(1): 91–114. https://doi.org/10.3917/autr.081.0091. [Google Scholar]

Gleick, P.H., Christian-Smith, J., Cooley, H., 2011. Water-use efficiency and productivity: rethinking the basin approach. Water Int. 36, 784–798. https://doi.org/10.1080/02508060.2011.631873

Godwin, I.A., Reba, M.L., Leslie, D.L., Adams, R.F., Rigby, J.R., 2022. Feasibility of farm-scale infiltration galleries for managed aquifer recharge in an agricultural alluvial aquifer of Northeast Arkansas. Agric. Water Manag. 264, 107531. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107531

Guihéneuf, N., Boisson, A., Bour, O., Dewandel, B., Perrin, J., Dausse, A., Viossanges, M., Chandra, S., Ahmed, S., Maréchal, J.C., 2014. Groundwater flows in weathered crystalline rocks: Impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity. J. Hydrol. 511, 320–334. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.061

Haddache, M., 2009. Savoirs hydrauliques et mutations socioéconomiques dans l'oasis de Toudgha (Sud-Est, Maroc) 12.
Hantush, M.S., 1967. Growth and decay of groundwater-mounds in response to uniform percolation. Water Resour. Res. 3, 227–234. https://doi.org/10.1029/WR003i001p00227
Hardin, G., 1968. La tragédie des communs, Science, 13 décembre 1968, vol. 162
Hashemi, H., Berndtsson, R., Kompani-Zare, M., Persson, M., 2013. Natural vs. artificial groundwater recharge, quantification through inverse modeling. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 637–650. https://doi.org/10.5194/hess-17-637-2013
Hssaisoune M, Bouchaou L, Sifeddine A, Bouimetarhan I, Chehbouni A. 2020. Moroccan groundwater resources and evolution with global climate changes. Geosciences 10(2): 81. https://doi.org/10.3390/geosciences10020081. [CrossRef] [Google Scholar]
Idda S, Bonté B, Kuper M, Mansour H. 2021. Revealing the foggara as a living irrigation system through an institutional analysis: Evidence from Oases in the Algerian Sahara. International Journal of the Commons 15(1): 431–448. https://doi.org/10.5334/ijc.1128. [CrossRef] [Google Scholar]
Idda, S., Bonté, B., Mansour, H., Bellal, S.-A., Kuper, M., 2017. Monument historique ou système bien vivant ? Les foggaras des oasis du Touat (Algérie) et leur réalimentation en eau par pompage. Cah. Agric. 26, 55007. https://doi.org/10.1051/cagri/2017049
Janssen, M.A., Anderies, J.M., Ostrom, E., 2007. Robustness of Social-Ecological Systems to Spatial and Temporal Variability. Soc. Nat. Resour. 20, 307–322. https://doi.org/10.1080/08941920601161320
JICA (2005). Agence Japonaise de Coopération Internationale. L'Etude de Dévelopment du Projet de Dévelopment des Communautes Rurales à Travers la Réhabilitation des Khettaras dans les Régions Semi-Arides de l'Est-Sud Atlastique au Royaume du Maroc. Nippon Giken, Nippon Koei, July 2005.
Johannsen IM, Hengst JC, Goll A, Höllermann B, Diekkrüger B. 2016. Future of water supply and demand in the Middle Drâa Valley, Morocco, under climate and land use change. Water 8(8): 313. https://doi.org/10.3390/w8080313. [Google Scholar]
Jouve P. 2012. Les oasis du Maghreb, des agro-écosystèmes de plus en plus menacés. Comment renforcer leur durabilité ? Le Courrier de l'environnement de l'INRA 62(62): 113–122. [Google Scholar]
Kendy, E., Gérard-Marchant, P., Walter, M.T., Zhang, Y., Liu, C., Steenhuis, T.S., 2003. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain. Hydrol. Process. 17, 2011–2031. https://doi.org/10.1002/hyp.1240
Khardi Y, Lacombe G, Dewandel B, Taky A, Maréchal JC, Hammani A, Bouarfa S. 2023b. Managed groundwater recharge at the farm scale in pre-Saharan Morocco. Special Issue: IAHS2022 – Hydrological sciences in the Anthropocene: Past and future of open, inclusive, innovative, and society-interfacing approaches. https://doi.org/10.5194/piahs-100-1-2023
Khardi Y, Lacombe G, Kuper M, Taky A, Bouarfa S, Hammani A. 2023a. Pomper ou disparaître : le dilemme du renforcement des khettaras par le pompage solaire dans les oasis du Maroc. Cah. Agric. 32: 1. https://doi.org/10.1051/cagri/2022030
Kuper, M., Ameur, F., Hammani, A., 2017. Unraveling the enduring paradox of increased pressure on groundwater through efficient drip irrigation. pp. 85–104. https://doi.org/10.4324/9781315537146-6
Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., 2021. Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers—guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. Hydrogeol. J. https://doi.org/10.1007/s10040-021-02339-7
Larousse, É., n.d. Définitions : oasis - Dictionnaire de français Larousse [WWW Document]. URL https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/oasis/55333 (accessed 7.14.23).
Lightfoot, D.R., 1996. Moroccan khettara: Traditional irrigation and progressive desiccation. Geoforum 27, 261–273. https://doi.org/10.1016/0016-7185(96)00008-5

Maréchal, J.C., Dewandel, B., Ahmed, S., Galeazzi, L., Zaidi, F.K., 2006. Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture. J. Hydrol. 329, 281–293. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.022
Margat, J., 2008. Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde. Coédition UNESCO BRGM 52.
Margat, J., van der Gun, J., 2013. Groundwater around the World: A Geographic Synopsis. CRC Press.
MASSIRE, Initiative privée de recharge artificielle de la nappe phréatique à partir des eaux de crue, n.d. . Web 20 Dir. URL https://massire.net/repertoire-des-innovations/initiative-privee-de-recharge-artificielle-de-la-nappe-phreatique-a-partir-des-eaux-de-crue/ (accessed 7.21.23).
MASSIRE, Processus Multi-Acteurs, 2023. . Massire. URL https://massire.net/processus-multi-acteurs/ (accessed 7.21.23).
Molle, F., Wester, P., Hirsch, P., Jensen, J., Murray-Rust, H., Paranjpye, V., Pollard, S., van der Zaag, P., 2008. River basin development and management. Chapter 16, in: Water for Food Water for Life. Earthscan, Londen, pp. 585–624.
Msume, A.P., Mwale, F.D., Castelli, G., 2022. Inventory and drivers of the adoption of flood-based farming systems in South-Eastern Africa: Insights from Malawi*. Irrig. Drain. 71, 521–533. https://doi.org/10.1002/ird.2664
Nathan, R., Evans, R., 2011. Groundwater and surface water connectivity, in: Hussey, K., Grafton, R.Q. (Eds.), Water Resources Planning and Management. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 46–67. https://doi.org/10.1017/CBO9780511974304.006
Obertreis, J., Moss, T., Mollinga, P., Bichsel, C., 2016. Water, Infrastructure and Political Rule: Introduction to the Special Issue. Water Altern. 9, 168–181.
Office national de l'électricité et de l'eau potable Branche-Eau. 2018. Étude de délimitation des périmètres des captages d'AEP de Goulmima, Tinejdad, Mellab, et Ksours avoisinants, 136 p. [Google Scholar]
Office régional de mise en valeur agricole du Tafilalet (ORMVA-Tf), Caractérisation et cartographie des sols du périmètre Goulmima-Tinjdad province d'Errachidia, 1987
Office régional de mise en valeur agricole du Tafilalet (ORMVA-Tf), PLAN STRATEGIQUE DES EAUX 2020, 57, 2020.
Office régional de mise en valeur agricole du Tafilalet. 2021. Monographie de la zone d'action de la subdivision de Goulmima, 10 p. [Google Scholar]
OneWater : l'eau comme un bien commun [WWW Document], 2022. . INRAE Institutionnel. URL https://www.inrae.fr/actualites/onewater-leau-bien-commun (accessed 7.21.23).
Oosterbaan R. J. 1984. Modern interferences in traditional water resources in Baluchistan. Water International 9(3): 106-111.
Ostrom, E., 1992. Crafting Institutions for Self-Governing Irrigation Systems.
Oulidi HJ, Benaabidate L, Löwner R, Fryar AE. 2008. Management strategies of water resources in the arid zone of South-Eastern Morocco. In: Zereini F, Hötzl H, eds. Climatic changes and water resources in the Middle East and North Africa. Berlin, Heidelberg (Germany): Springer, pp. 227–238. https://doi.org/110.1007/978-3-540-85047-2_17. [CrossRef] [Google Scholar]
Perry, C., 2007. Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations. Irrig. Drain. 56, 367–378. https://doi.org/10.1002/ird.323
Petit, O., Dumont, A., Leyronas, S., Ballin, Q., Bouarfa, S., Faysse, N., Kuper, M., Molle, F., Alcazar, C., Durand, E., Ghoudi, R., Hubert, A., Le Visage, S., Messaoudi, I., Montginoul, M., Ndao, S., Ferroudji, A.R., Rinaudo, J.-D., Trottier, J., Aubriot, O., Elloumi, M., Boisson, M., Fofack-Garcia, R., Maurel, F., Rojat, D., Romagny, B., Salgues, E., 2021. Learning from the past to build the future governance of groundwater use in agriculture. Water Int. 46, 1037–1059. https://doi.org/10.1080/02508060.2021.2006948
Pool, S., Francés, F., Garcia-Prats, A., Puertes, C., Pulido-Velazquez, M., Sanchis-Ibor, C., Schirmer, M., Yang, H., Jiménez-Martínez, J., 2021. Hydrological Modeling of the Effect of the Transition From Flood to Drip Irrigation on Groundwater Recharge Using Multi-Objective Calibration. Water Resour. Res. 57, e2021WR029677. https://doi.org/10.1029/2021WR029677

Renevot G. 2006. Analyse comparative des pratiques d'irrigation du palmier dattier dans différents systèmes oasiens du Tafilalet, Maroc | RADDO. [2022/03/20]. https://www.raddo.org/Publications/Analyse-comparative-des-pratiques-d-irrigation-du-palmier-dattier-dans-differents-systemes-oasiens-du-Tafilalet-Maroc. [Google Scholar]

Riou, Ch., 1971. EVAPORATION EN BAC ET EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE: Expression de l'évaporation d'une petite nappe d'eau en fonction des données sous abri. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Bull. 16, 53–65. https://doi.org/10.1080/02626667109493048

Roberts, E.B., 2007. Managing Invention and Innovation. Res.-Technol. Manag. 50, 35–54. https://doi.org/10.1080/08956308.2007.11657418

Sabri, A., Bouaziz, A., Hammani, A., Kuper, M., Douaik, A., Badraoui, M., 2017. Effet de l'irrigation déficitaire contrôlée sur la croissance et le développement foliaire du palmier dattier (Phoenix dactylifera L.). Cah. Agric. 26, 55005. https://doi.org/10.1051/cagri/2017033

Saidani AM, Kuper M, Hamamouche FM, Benmihoub A. 2022. Reinventing the wheel: adapting a traditional circular irrigation system to 'modern' agricultural extensions in Algeria's Sahara. New Medit, 21 (5): 35-53

Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeol. J. 10, 18–39. https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2

Schlager, E., Blomquist, W., Tang, S.Y., 1994. Mobile Flows, Storage, and Self-Organized Institutions for Governing Common-Pool Resources. Land Econ. 70, 294–317.

Seckler, D.W., 1996. The New Era of Water Resources Management: From "dry" to "wet" Water Savings. IWMI.

Sedra, M.H., 2003. Le palmier dattier base de la mise en valeur des oasis au Maroc : techniques phoenicicoles et création d'oasis, [WWW Document], INRA, https://www.inra.org.ma/sites/default/files/publications/ouvrages/palmierdattier.pdf, (accessed 2.1.23), 265pp, ISBN : 9981-1994-3-5

Sehring, J., 2009. Path Dependencies and Institutional Bricolage in Post-Soviet Water Governance. Water Altern. 2.

Seiler, K.-P., Gat, J.R., 2007. Groundwater Recharge from Run-Off, Infiltration and Percolation, Water Science and Technology Library. Springer Netherlands, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5306-1

Sghaier, M. (2010). Etude de la Gouvernance des Ressources Naturelles dans les Oasis: Cas des Oasis en Tunisie (International Union for Conservation of Nature), pp.69.

Shah, T., Burke, J., Villholth, K.G., Angelica, M., Custodio, E., Daibes, F., Hoogesteger, J., Giordano, M., Girman, J., Gun, J. van der, Kendy, E., Kijne, J.W., Llamas, R., Masiyandima, M., Margat, J., Marin, L., Peck, J., Rozelle, S., Sharma, B.R., Vincent, L., Wang, J., 2007. Groundwater: a global assessment of scale and significance.

Shiklomanov, I.A., 1993. chapter 2 : World Fresh Water Resources, Peter H. Gleick. ed. OXFORD UNIVERSITY PRESS, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security.

Soni, P., Dashora, Y., Maheshwari, B., Dillon, P., Singh, P., Kumar, A., 2020. Managed Aquifer Recharge at a Farm Level: Evaluating the Performance of Direct Well Recharge Structures. Water 12, 1069. https://doi.org/10.3390/w12041069

Svendsen, M., Murray-Rust, D.H., Harmancıoğlu, N., Alpaslan, N., 2001. Governing closing basins: the case of the Gediz River in Turkey. Irrig. River Basin Manag. Options Gov. Inst., CABI Books 193–213. https://doi.org/10.1079/9780851996721.0193

Swyngedouw, E., 2015. Preface, in: Swyngedouw, E. (Ed.), Liquid Power: Contested Hydro-Modernities in Twentieth-Century Spain. The MIT Press, p. 0. https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262029032.002.0007

Taylor, R.G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Beek, R.V., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T.R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M.F.P., Macdonald, A., Fan, Y., Maxwell, R.M., Yechieli, Y., Gurdak, J.J., Allen, D.M.,

Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P.J.F., Holman, I., Treidel, H., 2013. Ground water and climate change. Nat. Clim. Change 3, 322–329. https://doi.org/10.1038/nclimate1744
Todd, D.K., Mays, L.W., 2004. Groundwater Hydrology. John Wiley & Sons.
UNESCO, 2018. Oasis du Sud Marocain Biosphere Reserve, Morocco [WWW Document]. UNESCO. URL https://en.unesco.org/biosphere/arab-states/oasis-sud-marocain (accessed 7.17.23).
UNESCO, 2022. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2022 : eaux souterraines, rendre visible l'invisible; résumé - UNESCO Bibliothèque Numérique [WWW Document]. URL https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_fre (accessed 7.11.23).
von Korff, Y., d'Aquino, P., Daniell, K.A., Bijlsma, R., 2010. Designing Participation Processes for Water Management and Beyond. Ecol. Soc. 15, art1. https://doi.org/10.5751/ES-03329-150301
Wang, B., Jin, M., Nimmo, J.R., Yang, L., Wang, W., 2008. Estimating groundwater recharge in Hebei Plain, China under varying land use practices using tritium and bromide tracers. J. Hydrol. 356, 209–222. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.011
Warner, J., Molden, D., Chehata, M., Sunada, D.K., 1989. MATHEMATICAL ANALYSIS OF ARTIFICIAL RECHARGE FROM BASINS1. https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.1989.TB03077.X
Water Resources Division. 1977. Ressources en Eau Du MAROC Tome III: Hydrogéologie Bassin versant [WWW Document], Scribd, https://fr.scribd.com/document/494028246/ Ressources-en-Eau-Du-MAROC-Tome-III (last access: 4 May 2022), 1977.
Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., Alley, W.M., 1998. Ground water and surface water: A single resource (USGS Numbered Series No. 1139), Ground water and surface water: A single resource, Circular. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/cir1139
Wittfogel, K.A., 1957. Oriental despotism: a comparative study of total power.
Wuilleumier, A., Seguin, J.J., 2008. Réalimentation artificielle des aquifères en France, Une synthèse. BRGM/RP-55063-FR. Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM, 120.
Xu, C.-Y., Chen, D., 2005. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. Hydrol. Process. 19, 3717–3734. https://doi.org/10.1002/hyp.5853
Zhou, X., Zhang, Y., Sheng, Z., Manevski, K., Andersen, M.N., Han, S., Li, H., Yang, Y., 2021. Did water-saving irrigation protect water resources over the past 40 years? A global analysis based on water accounting framework. Agric. Water Manag. 249, 106793. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106793
Zhu, C., 2000. Estimate of recharge from radiocarbon dating of groundwater and numerical flow and transport modeling. Water Resour. Res. 36, 2607–2620. https://doi.org/10.1029/2000WR900172

Annexes

Fiche d'enquête « Khettara »

Enquête N° : /_____/ Date : /____/ /02/ /2021/

Identification de la khettara : Nom : _____

Nom et Numéro de téléphone de la personne contactée _____

➢ **Données sur les ayants droit et l'usagers de la khettara**

- Localisation : _____

- le nombre des ayants droits de la Khettara ……

- la fréquence du tour d'eau _____

- la durée du tour d'eau _____

- manière d'organisation autour de la khettara :

❑Association d'irrigants (AUEA) ❑Jmâa ❑Association ……

- Si oui, quelles sont les avantages de l'appartenance à cette organisation ?

❑comment vous vous Organisez en interne pour des travaux d'entretien

⇨ Et quelle est la fréquence

……
……

❑Interface institutionnelle avec quel qui (établissement étatique & ONG, préciser les organismes)

……
……

Les travaux d'entretien de cette khettara (préciser les dates, fréquences et par qui)

……

……

La superficie irriguée à partir de cette khettara (unité de mesure)

- Maximale …….. Minimale ……

➔ Comment vous vous adaptez (quota et organisation)

……
……
……

- les épisodes de fonctionnement et sécheresses de la khettara

……
……

➢ Données sur l'eau mobilisée par khettara

➔ Mesure du débit par la méthode du flotteur

- ⇨ Largeur ……. Hauteur d'eau……
- ⇨ Vitesse mesurée sur une longueur de 10m

Essai	Durée	Vitesse
1		
2		
3		
4		
5		
Moyenne		

Y-a-il des puits à côté de la khettara (proche des puits de captage) ❑Oui ❑Non

Si oui : (prise des Coordonnées GPS)

Puits (réf GPS)	Nombre d'heure de fonctionnement /jours	Nombre jours fonctionnement / fréquence	Débits	Dates d'installation	Profondeur	Individuel / collectif	Si individue (vente d'eau & a-t-il des terres dans l'oasis)

- ❖ Leurs nombre…… ;
- ❖ Avez-vous constaté l'impact de puits sur la khettara ❑Oui ❑Non

……

➢ Données sur l'assolement de l'oasis de la khettara

Quelles sont les cultures que vous pratiquées et sur quelles superficies : (approximation)

Culture	Superficie _____Ou____ Espacement _____Ou _____Nombre d'arbre
Palmier dattier	
Olivier	
Amandier	
Figuier	
Luzerne	
Maraichage	
Les Céréales	

Autres : ……..

La lame dans le bassin d'irrigation d'eau à chaque irrigation par submersion

- Khettara …….
- Pompage ……

Evolution de l'assolement (culture annuel vs salinité)

⇨ Avez-vous changé les cultures annuelles au fil des années
❑Oui ❑Non

Si oui
……
……

Caractérisation du mode d'irrigation & taille des parcelles

Irrigation séparé ou collectif des cultures
……
……

Evolution des rendements aux fils des années (relations volumes d'eau et la production agricole)

Culture/ Années	Palmier dattier	Olivier	Amandier	Figuier	Luzerne	Maraichage	Les Céréales

Partie socio-économique

➔L'implication des jeunes dans les travaux d'entretien et envers l'agriculture oasienne

……

➔Emigration & déménagement des gens

……

➔Travail saisonnier

……

➔Prix de vente des dattes et rentabilité

……

➔Activités en parallèle et sources de revenue

……

➔Valeurs de la terre

……

Tableau 1 : organisation du processus participatif

Durée de préparation	Durée de l'activité	Etape	Objectifs	Participants	Outils	Moyens/préparation
3 ans	15j	Analyse du contexte	Identification des acteurs et des enjeux, Définition d'un cadre de concertation	Equipe du PMA recharge ;	Enquêtes de terrain, Bibliographie, Entretiens avec les organismes étatiques locaux, Formation à la facilitation par Lisode,	
1,5 mois	15j	Mobilisation	Information et explication des objectifs du processus	Toutes les parties prenantes	Appels téléphoniques ; Ecrits officiels et fax ; Discussions directes	
1 mois	½ j	Atelier de mise à niveau des agriculteurs des oasis	Aider les agriculteurs à préparer leurs discours pour les étapes suivantes, Fixer un vocabulaire commun ; Anticiper les conflits	Les agriculteurs des oasis,	- Extraction des problèmes liés à la gestion de l'eau et sélection du problème majeur ; -Arbre à problème à partir du problème prioritaire sélectionné. -Jeu de rôle (agriculteur oasis vs agriculteurs des exploitations ; agriculteurs khettaras vs ONEE)	Maison de la culture-Tinejdad
	½ j	Atelier de préparation des agriculteurs des exploitations et des périmètres de recasement	Avoir une discussion sur la gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation, Anticiper les conflits	Les agriculteurs des exploitations agricoles en dehors de l'oasis	-Brainstorming des problèmes liés au développement de l'exploitation agricole -Classification et catégorisation des problèmes ; - Extraction et discussion des solutions correspondantes ; -Jeu de rôle (agriculteur des extensions vs agriculteurs des oasis ; agriculteurs extensions vs ORMVA-Tf)	Maison de la culture-Tinejdad
	1j	Etat des lieux	Coconstruire un état des lieux factuel		-Contrat moral ; -représentation de la zone par des cartes (à dessiner par les participants) ;	

				Panel mixte des acteurs territoriaux	-Dessins individuels du territoire par les participants -La cartographie participative du territoire sur un support vierge en deux sous-groupes ; - Restitution collective des dessins sur une carte de la zone par le facilitateur ;	Maison de la culture-Tinejdad
1 mois	1j	Diagnostic participatif	Coconstruire l'arbre à problème « déséquilibre entre l'offre et la demande »		-Elaboration d'un arbre à problème consensuel ;	

Photos du protocole expérimentale de suivi du captage des eaux de crues à l'échelle de l'exploitation agricole



Photo du levé topographique des points de mesure piézométrique



Photo d'une mesure manuelle du niveau piézométrique et de la qualité de l'eau



Photo de l'opération de récupération des données d'une sonde installée dans un forage

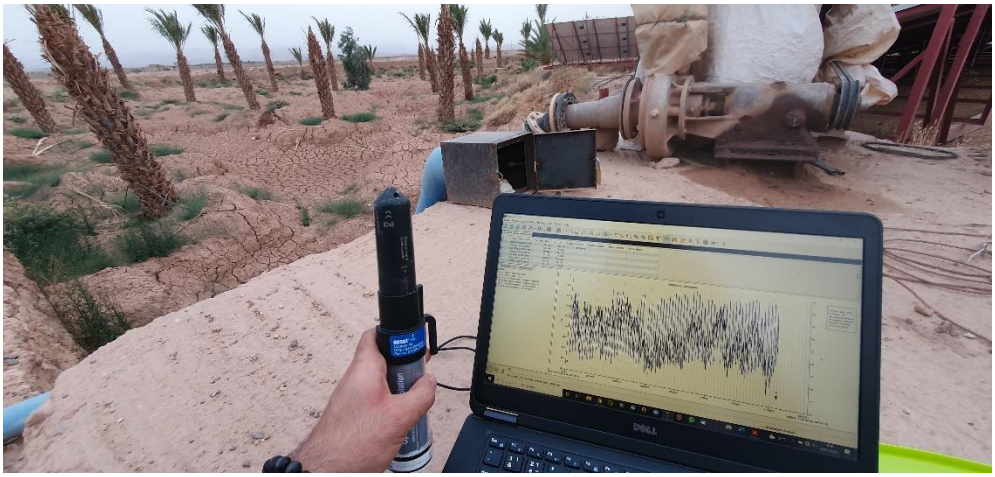

Photo de l'opération de récupération des données de la sonde installée dans le bassin de captage des eaux de crues