

## DOSSIER D'HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES

Titre :

Les ressources en eau souterraine et leurs évolutions : enrichissement des approches hydrogéologiques par la pratique interdisciplinaire

Sylvain Massuel

Chargé de recherche IRD

*Unité Mixte de Recherche Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages  
(INRAe-CIRAD-IRD-L'Institut Agro-AgroParisTech)*

avril 2022

*Soutenue le 5 juin 2023  
devant le jury composé de :*

<i>Olivia Aubriot</i>	<i>Chargée de recherche, CNRS-CESAH, membre</i>
<i>Christophe Cudennec</i>	<i>Professeur des universités, Institut Agro Rennes-Angers, rapporteur</i>
<i>Yanni Gunnell</i>	<i>Professeur des universités, UL Lyon 2, rapporteur</i>
<i>Patrick Lachassagne</i>	<i>Directeur de recherche, IRD-HSM, membre</i>
<i>Valérie Plagnes</i>	<i>Professeure des universités, Sorbonne université, présidente</i>



---

## Résumé

---

Ce dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches fait le point sur mon parcours scientifique en retracant près de 20 ans de recherche en hydrogéologie. J'y décris et analyse mes principaux travaux à la lumière d'une expérience acquise sur des terrains très divers et au sein d'organismes de recherche aux objectifs et pratiques bien différenciés. M'intéressant initialement aux évolutions des ressources en eau souterraine en zones semi-arides et méditerranéennes, mes contributions à la communauté scientifique sont multiples. Il m'a semblé nécessaire d'insister sur les plus originales qui consistent au développement de nouvelles méthodes simples d'observation et d'approches interdisciplinaires pour concevoir les relations eau-sociétés.

Je fais ressortir au fil de mon analyse la progression méthodologique continue dans ma manière d'appréhender les évolutions des stocks d'eau dans les aquifères. Initialement biophysiques et hydrocentrées, mes approches s'orientent désormais vers le croisement des outils et des regards disciplinaires pour mieux comprendre les moteurs de ces évolutions dont les fondements principaux ne sont pas d'ordre exclusivement hydrologique.

Partant des relations surface-souterrain au sud-ouest du Niger, mes travaux sur la recharge des aquifères m'ont conduit à étudier la recharge artificielle via les petits barrages en Inde et en Tunisie et à développer une méthode alternative de jaugeage de ces petits réservoirs. Sur ces deux terrains, l'évolution des ressources en eau est indissociable des prélèvements, que j'ai étudiés d'abord sous un angle quantitatif avec la modélisation hydrogéologique et en développant une méthode de mesure directe des pompages. Puis, le questionnement conjoint avec les sciences humaines et sociales m'ont conduit à considérer les prélèvements de façon plus qualitative, et a abouti à des questionnements sur les fondements du discours de surexploitation en Tunisie. Ce cheminement a été jalonné d'étapes fondatrices, se traduisant certes par des frustrations et des inconforts liés à ma posture et à la portée de mes résultats de recherche, mais aussi par de nouvelles perspectives explorées dans le cadre des collaborations qui ont changé radicalement l'orientation de mes interprétations.

J'ai d'abord mis en évidence le rôle des modifications en surface et des phénomènes d'infiltration profonde encore ignorés pour expliquer la hausse des réserves souterraines au Niger. J'ai ensuite pris conscience, en Inde et Tunisie, que les décisions de gestion relevaient aussi du contexte économique, politique et social et expliquaient les stratégies de développement de la recharge artificielle. J'ai montré que l'estimation des volumes de recharge pouvait différer sensiblement de la ressource renouvelable, ayant des conséquences notoires sur les recommandations de gestion telles que produites par la seule approche hydrologique. Prenant conscience des distances possibles entre les logiques hydrologiques et les faits sociaux, j'ai alors interrogé la notion de durabilité des prélèvements qui résultaient de processus décisionnels complexes. J'ai réalisé l'absence, dans mes approches, des logiques sociales liées aux différents acteurs et à leur rapport avec la ressource. En associant à la réflexivité sur mes propres démarches la reconstitution historique des situations de gestion observées, j'ai pu repenser les problèmes relatifs à l'usage ou à la gestion de l'eau de manière disciplinairement plus distanciée. Ma production de connaissance s'en est trouvée finalement mieux ciblée, ce que je conçois comme une avancée dans mes approches en hydrogéologie. J'ai enfin formalisé le rôle joué par la pratique d'une interdisciplinarité élargie et la négociation entre disciplines dans le processus de construction d'un regard sociohydrologique qui représente une position complémentaire aux autres approches proposées dans ma communauté scientifique traitant des questions de gestion de l'eau.

Mon projet de recherche actuel correspond à une réorientation contextuelle de la Méditerranée vers l'Asie du Sud Est et plus spécifiquement le Cambodge. Je transpose et projette, sur un terrain

encore à l'aune de ses grands choix de développement et de gestion des ressources en eau, mes expériences acquises dans des contextes où l'état des réserves souterraines est le résultat de processus biophysiques combinés à une construction historique complexe.

## SOMMAIRE

<b>PARTIE 1 - CURRICULUM VITAE.....</b>	<b>7</b>
<b>1 - SYNTHESE DU PARCOURS PROFESSIONNEL (LABORATOIRES ET COLLABORATIONS)</b>	<b>8</b>
1.1 - 2001-2005 THESE DE DOCTORAT .....	8
1.2 - 2005-2006 POST-DOCTORAT .....	9
1.3 - 2006-2008 POST-DOCTORAT .....	9
1.4 - 2008-2011 CHERCHEUR .....	10
1.5 - DEPUIS 2011 CHERCHEUR.....	10
<b>2 - SYNTHESE DES PUBLICATIONS INDEXEES (MARS 2022)</b>	<b>12</b>
<b>3 - ENSEIGNEMENT ET DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE</b>	<b>17</b>
<b>4 - ENCADREMENT D'ETUDIANTS EN RECHERCHE ET ENJEUX</b>	<b>17</b>
<b>PARTIE 2 - ANALYSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE – PRISE EN COMPTE DES DIMENSIONS SOCIALES DE L'EAU EN HYDROGEOLOGIE ET CONTRIBUTION DISCIPLINAIRE.....</b>	<b>20</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>20</b>
1.1. CHEMINEMENT METHODOLOGIQUE .....	20
1.2. ETUDIER L'EVOLUTION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE .....	20
<b>2. RECHARGE DES AQUIFERES ET CHANGEMENTS GLOBAUX</b>	<b>22</b>
2.1. « IMPACT ANTHROPIQUE » ET HAUSSE « PARADOXE » DES RESERVES SOUTERRAINES AU SAHEL.....	22
2.2. DECLOISONNER LES APPROCHES DE SURFACE ET SOUTERRAINE.....	24
2.3. CARACTERISATION DES PROCESSUS D'INFILTRATION PROFONDE .....	25
2.4. RECHARGE ARTIFICIELLE .....	27
<b>3. PRELEVEMENTS, RESERVE ET DURABILITE</b>	<b>29</b>
3.1. ESTIMER LA DURABILITE DES PRELEVEMENTS SOUTERRAINS .....	29
3.2. ESTIMER LES PRELEVEMENTS SOUTERRAINS .....	32
3.3. RESERVE ET SUREXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES .....	36
<b>4. SYNTHESE REFLEXIVE : INTEGRATION INTERDISCIPLINAIRE DES DIMENSIONS SOCIALES DE L'EAU ET ENRICHISSEMENT DISCIPLINAIRE</b>	<b>41</b>
4.1. PRATIQUE DE L'INTERDISCIPLINARITE .....	41
4.2. DU CYCLE HYDROLOGIQUE AUX SOCIO-HYDROSYSTEMES .....	42
4.3. CONTRIBUTION A DE NOUVELLES APPROCHES POUR APPREHENDER LES RELATIONS EAU-SOCIETES ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE .....	44
<b>PARTIE 3 - PROJET DE RECHERCHE : EVOLUTION DES RESERVES EN EAU SOUTERRAINE ET COEVOLUTIONS EAU-SOCIETES.....</b>	<b>46</b>

<b>1 - CONTEXTE, ENJEUX ET OBJECTIFS</b>	<b>46</b>
1.1 - EVOLUTION DES PLAINES INONDABLES .....	46
1.2 - LES CHANGEMENTS DANS LA ZONE COTIERE .....	47
<b>2 - EVOLUTION DES RESERVES EN EAU SOUTERRAINE ET COEVOLUTIONS EAU-SOCIETES EN ASIE DU SUD EST</b>	<b>49</b>
2.1 - OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET METHODOLOGIQUES .....	49
2.2 - EXPLIQUER LES PROCESSUS HYDRO(GEO)LOGIQUES DE LA PLAINE INONDABLE DU BASSAC ET ETABLIR LES LIENS AVEC LES PRATIQUES AGRICOLES ET L'EXPOSOME .....	49
2.3 - EVOLUTION DES RESERVES EN EAU SOUTERRAINE DANS LA ZONE COTIERE DE SIHANOUKVILLE .....	50
2.4 - CONSTRUCTION INTERDISCIPLINAIRE .....	51
<b>3 - MOYENS ET PARTENARIATS</b>	<b>51</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>53</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>59</b>

*Je déclare avoir respecté, dans la conception et la rédaction de ce mémoire d'HDR, les valeurs et principes d'intégrité scientifique destinés à garantir le caractère honnête et scientifiquement rigoureux de tout travail de recherche, visés à l'article L.211-2 du Code de la recherche et énoncés par la Charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et la Charte d'intégrité scientifique de l'Université de Montpellier. Je m'engage à les promouvoir dans le cadre de mes activités futures d'encadrement de recherche.*

---

## PARTIE 2 - ANALYSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE – PRISE EN COMPTE DES DIMENSIONS SOCIALES DE L'EAU EN HYDROGEOLOGIE ET CONTRIBUTION DISCIPLINAIRE

---

### 1. INTRODUCTION

#### 1.1. Cheminement méthodologique

Le fil conducteur de mes travaux de recherche est la caractérisation de l'évolution à long terme des ressources en eau souterraine dans de multiples contextes. Le point le plus saillant qui ressort de l'analyse de ces travaux est la progression méthodologique continue dans la manière d'appréhender ces évolutions. J'ai élargi progressivement mes points de vue initialement hydrocentrés, c'est-à-dire focalisés sur les processus physiques gouvernant les flux hydriques. J'ai ensuite progressivement réalisé qu'il était nécessaire de considérer des perspectives bien au-delà de l'hydrologie pour comprendre les moteurs de ces évolutions, qui mobilisent en fait un ensemble de dynamiques et d'interactions dont les fondements principaux ne sont pas exclusivement hydrologiques. Mes activités se sont alors naturellement concentrées sur les manières de parvenir à cet élargissement disciplinaire pour enrichir les interprétations hydrogéologiques. L'adaptation de mes approches est issue essentiellement d'un travail approfondi mettant en œuvre le croisement des disciplines et des points de vue par la pratique d'une interdisciplinarité élargie aux sciences humaines et sociales.

Dans ce dossier d'HDR, je m'attache à identifier cette progression méthodologique et à montrer en quoi elle représente une contribution disciplinaire pour l'hydrogéologie et plus généralement pour les questions de gestion de l'eau au Sud. Dans un premier temps, je réinterprète certains de mes premiers travaux de recherche, entrevoyant déjà des relations majeures avec les sociétés. Puis, je présente l'enrichissement des analyses disciplinaires par l'ouverture à d'autres disciplines de plus en plus éloignées thématiquement. Cela pour parvenir *in fine* à une compréhension plus holistique des situations en lien avec l'évolution des réserves en eau tout en montrant comment ces connaissances améliorent l'appréhension des systèmes hydrologiques et leurs représentations.

#### 1.2. Etudier l'évolution des ressources en eau souterraine

Les niveaux et les flux d'eau dans les aquifères, tout comme dans les réseaux hydrographiques, sont en ajustements continus, plus ou moins rapides, autour d'un état d'équilibre. De fait, à quelques exceptions près, les observations hydrologiques se font toujours sur des systèmes en transition. Comprendre une situation hydrologique nécessite par conséquent de toujours replacer les observations dans une perspective de temps plus ou moins long, afin d'identifier les fluctuations et les grandes tendances qui qualifient le caractère dynamique de l'hydrosphère.

Sous le terme « évolution », j'entends donc les variations relatives à la variabilité saisonnière jusqu'aux variations s'étalant sur plusieurs milliers d'années. Lorsque je m'intéresse à ces évolutions, je cherche à comprendre les origines des états observés à un moment donné et à déduire la part des différents déterminants, en identifiant les moteurs des changements et les mécanismes en jeu.

Le terme « ressources en eau » est plus générique, notamment du fait de son utilisation courante pour exprimer des notions parfois très différentes. J'ai volontairement gardé ce terme en titre pour décrire mes travaux, bien qu'il ne se réfère pas exactement à la définition entendue en hydrogéologie qui fait une distinction importante entre les concepts de ressource(s) et de réserve(s). Le dictionnaire d'hydrogéologie définit la réserve en eau souterraine comme le « *stock d'eau gravitaire contenu, à un moment donné, dans la zone saturée d'un réservoir aquifère défini* » (Castany et Margat, 1977). La ressource est la quantité d'eau naturellement sortante d'une nappe, son débit naturel. En exploitation des eaux souterraines, le concept de réserve se différencie clairement de celui de ressource. Schoeller

(1962) énonce que « *Lorsqu'on soustrait de l'eau d'une nappe à l'aide de puits ou de forages, on commence tout d'abord par puiser dans les réserves de la nappe. Seulement ensuite, on capte une partie du débit même de la nappe [...]. Il faut puiser non dans les réserves mais dans les ressources naturelles* ». Le rabattement d'une nappe non isolée entraîne potentiellement avec lui – par simple modification des gradients hydrauliques – un changement des flux entrants et/ou sortants depuis ou vers les composantes en connexion hydraulique. Un pompage n'affecte donc plus la variation du stock d'eau dans l'aquifère lorsque sa valeur tend vers la différence entre la variation des flux entrants et sortants induite par le pompage lui-même, cette variation étant appelée « capture » (soit le débit de la nappe). Castany et Margat complètent en précisant que « *Une réserve ne peut offrir qu'une ressource temporaire, dont le débit est fonction de la durée à laquelle on l'a rapporté* », en ajoutant que « *toute extraction d'eau en régime de non-équilibre est un prélèvement sur la réserve, c'est à dire sur l'eau emmagasinée à un instant donné, en l'état initial de la nappe du début de l'exploitation.* » Alors que la réserve résulte d'un équilibre entre recharge et décharge sur un temps donné (stock), la ressource est implicitement renouvelable et s'apparente à un flux (en opposition au stock). Castany (1968) distingue au sein de la réserve d'une nappe libre la partie variable ou « réserve régulatrice », représentée par le volume d'eau gravitaire situé entre les niveaux piezométriques minimaux et maximum observés sur une période donnée. La partie fixe, dont les volumes stockés dépendent de la géométrie de l'aquifère et de ses propriétés hydrodynamiques, est appelée réserve géologique. Le volume de la réserve régulatrice fluctue donc dans le temps en fonction des entrées et des sorties et peut être qualifié de renouvelable, de là venant probablement l'analogie souvent faite entre réserve et ressource au sens hydrogéologique. Cette analogie est d'autant plus intéressante, qu'elle est un des témoins directs de la vision quantitative de l'eau en hydrogéologie. Cette conception de ce qui fait ressource – décrétée ici par les hydrogéologues – corrobore également les arguments de Magrin et al. (2015) qui appréhendent les ressources « *comme des matières mises en valeur par des acteurs* » et par conséquent pour qui « *toute ressource est un construit social* ». On comprend donc aisément qu'avec le concept de ressource interviennent un ensemble de notions (par exemple l'accès, la valeur, le partage, l'appropriation, l'usage etc.) dont la compréhension des mécanismes va bien au-delà du champ de l'hydrogéologie. Cette simple constatation plaide à elle seule en faveur d'une réflexion sur ce qui fait effectivement « ressources en eau » dans les différents contextes étudiés.

Par ailleurs, objet d'étude relativement invisible, les eaux souterraines représenteraient environ 30% des volumes d'eau douce terrestre contre 1.3% pour les eaux de surface (Shiklomanov, 1993). Dans une période où aux fluctuations climatiques s'ajoutent des changements environnementaux sévères et une modification profonde du système climatique (GIEC, 2022), des conséquences sur les ressources en eau et les systèmes de productions agricoles sont certaines (CGIAR 2010), pesant toujours plus sévèrement sur des équilibres déjà précaires. Dans ce contexte, l'étude de l'évolution des volumes en eaux souterraines représente un intérêt majeur. Cela parce que les moyens de subsistance des populations des pays du Sud reposent en partie sur l'accès et l'exploitation des ressources en eau, de même que les stratégies de développement économiques (Bazzaz et Sombroek, 1996). La révolution verte indienne des années 1960 ou plus récemment le plan Maroc vert lancé en 2008, en sont des exemples emblématiques. Également parce qu'en comparaison avec les eaux de surface, l'évolution des volumes d'eau dans les aquifères est un marqueur extrêmement intégrateur des changements environnementaux, par l'amplitude des réactions et leur étalement dans le temps et l'espace (leur inertie). Un fleuve réagira rapidement à des variations climatiques ou environnementales sur son bassin versant, tandis que les niveaux d'eau dans les aquifères pourront être impactés avec plusieurs dizaines d'années de retard et porter les traces de ces changements sur plusieurs dizaines d'années voire bien au-delà. Les niveaux d'eau souterraine observés dans le présent sont généralement l'héritage d'une histoire complexe et d'interactions multiples. C'est pourquoi mes travaux cherchent à comprendre cet héritage qui permet d'éclairer le passé pour mieux comprendre le présent et envisager les évolutions futures possibles. C'est également le moyen de poser différemment certaines questions liées à la gestion de l'eau.

## 2. RECHARGE DES AQUIFERES ET CHANGEMENTS GLOBAUX

### 2.1. « Impact anthropique » et hausse « paradoxale » des réserves souterraines au Sahel

Ma première expérience de recherche s'intéressait aux dynamiques hydrologiques en zone sahélienne dans le but de comprendre l'évolution de la ressource en eau souterraine dans un contexte de changements environnementaux et climatiques marqués (ce que je qualifie ici sous le terme « changements globaux »). Il s'agissait de contribuer à séparer les effets de la variabilité naturelle des effets anthropiques et climatiques à plus long terme afin d'expliquer, et potentiellement prédire, les évolutions possibles des ressources.

La zone sahélienne représente un intérêt majeur pour étudier l'impact des changements globaux sur les hydrosystèmes. Concentrant environ 3% des ressources en eau et 30% de la population mondiale (UN, Environment Management Group, 2011), les zones semi-arides présentent des bilans hydrologiques qui reposent sur des variables aux amplitudes très faibles (avec seulement quelques millimètres par an) et donc extrêmement réactives et sensibles aux différents changements. Par rapport aux zones tempérées, les réactions des hydrosystèmes y sont rapides et contrastées. L'augmentation des débits des grands fleuves sahéliens en dépit de la baisse de la pluviométrie a été qualifiée de « paradoxe hydrologique sahélien » (Descroix et al. 2009) et constitue toujours aujourd'hui un phénomène emblématique cristallisant les interactions climat-Homme-milieu. Ce « paradoxe » s'exprime au sud-ouest du Niger sous la forme d'une augmentation à long terme depuis les années 50 des réserves de l'aquifère phréatique libre du Continental Terminal (Leduc et al., 2001 ; Favreau et al. 2002) malgré un déficit pluviométrique fortement marqué depuis les années 70 (Nicholson, 2001) jusqu'aux années récentes (Panthou et al. 2014 ; Sheen et al. 2017). Cette hausse piézométrique n'est pas une reconstitution des réserves suite à un effet conjoncturel de la sécheresse des années 70 et 80, mais bien un ajustement vers potentiellement un nouvel état d'équilibre issu de modifications durables des conditions de recharge de la nappe.

Mes premières investigations concernaient l'analyse des photographies aériennes anciennes qui montraient dans cette région une augmentation radicale des surfaces cultivées entre 1950 et 1992 (Figure 1a). La couverture de savane arborée naturelle qui occupait 84% des versants et 64% des vallées en 1950 ne représentait respectivement plus que 11% et 37% en 1992 (Leblanc et al., 2008). Les enquêtes de terrain que j'effectuais dans plusieurs villages confirmaient toutes un déboisement ayant eu lieu depuis les villages vers les plateaux, la bordure des plateaux ayant été atteinte dès le début des années 90. La nécessité de conquérir de nouvelles terres cultivables était en partie la conséquence de la forte croissance démographique et des sécheresses des années 70 et 80. A cela s'est ajoutée la diminution des rendements, causée par la dégradation des sols cultivés, nécessitant plus de surface pour une production équivalente. L'augmentation des besoins domestiques de bois de chauffe a également largement contribué à transformer la savane arborée naturelle en sols nus (Figure 1b). L'autre modification environnementale notable dans le paysage que je mettais en évidence était celle du réseau hydrographique. Elle se manifestait par l'extension des réseaux de drainage et la progression du nombre de mares dans tout le paysage. Les photographies aériennes anciennes du site révélaient un processus de naissance de nouvelles mares dans le paysage. Les discussions sur le terrain nous apprenaient que de nombreuses mares anciennes atteignaient depuis les années 90 des niveaux de remplissage jamais égalés de mémoire d'homme. Les calculs sur une zone de 120 km<sup>2</sup> montraient des densités de drainages multipliées par 2.5 entre 1950 et 1992 et une augmentation de l'ordre des drains principaux de 2 à 19 (système Shreve) sur la même période (Leblanc et al., 2008).

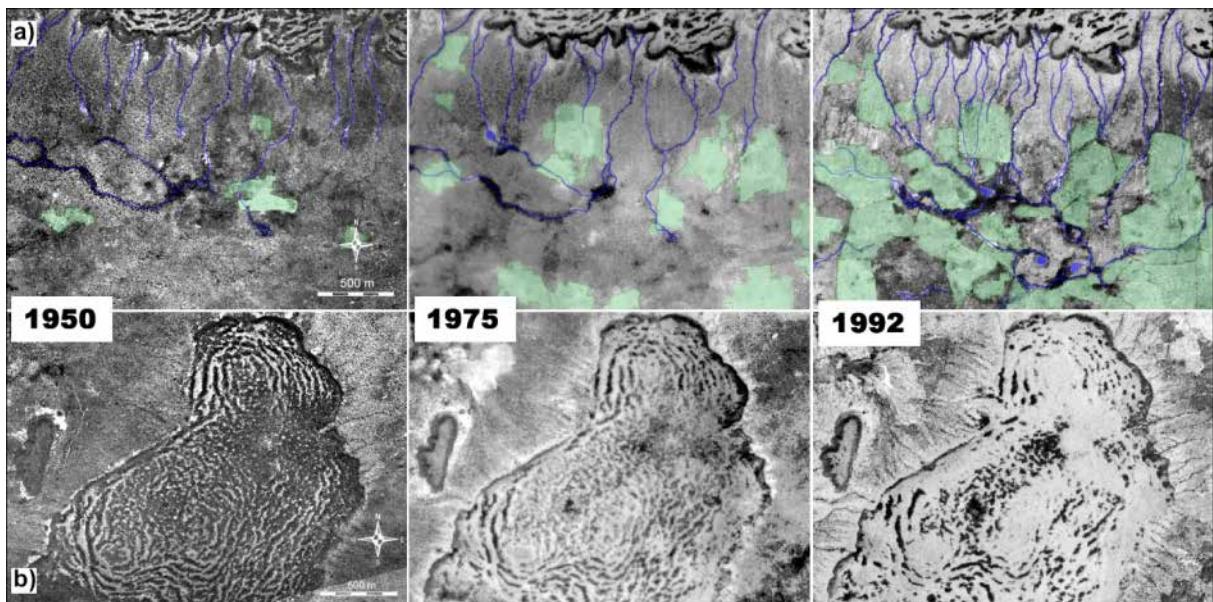


Figure 1: évolution de l'occupation du sol entre 1950, 1975 et 1992. a) progression des surfaces cultivées en vert et densification du réseau de drainage en bleu, à Koulouloudjé ; b) disparition de la brousse tigrée au profit des sols nus, Kafina plateau (clichés IGN). (D'après Massuel 2005, modifié dans Leblanc et al. 2008).

Dans cette région semi-aride, le ruissellement apparaît par refus à l'infiltration des eaux précipitées (ruissellement hortonien). Lorsque l'intensité des précipitations surpassé la capacité d'infiltration du sol, l'eau en excès se met en mouvement. En fonction de la nature du paysage, divers systèmes endoréiques d'extensions variées se développent sporadiquement. Le ruissellement ainsi accumulé temporairement permet une infiltration profonde vers la nappe (Figure 2). Ce phénomène de recharge indirecte (infiltration profonde après concentration et stockage du ruissellement de surface) a été mis en évidence et décrit à partir des fluctuations saisonnières de la piézométrie mesurée près des mares (p.ex. Favreau et al., 2009). Les crues sont suivies de la formation de dômes piézométriques locaux de quelques centaines de mètres de diamètre et de plusieurs mètres d'amplitude. Les modifications observées en surface induisent donc des changements sensibles de la recharge souterraine indirecte.

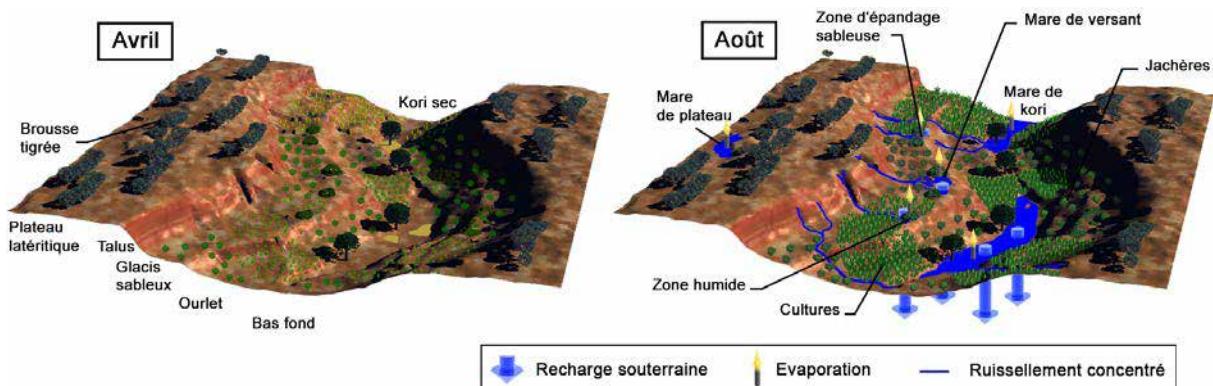


Figure 2: Ruissellement concentré et recharge profonde indirecte au sud-ouest Niger.

Ces premières investigations montraient déjà que les dynamiques hydrologiques étaient largement influencées par l'activité humaine. La sécheresse des années 70 et 80 avait initié des changements profonds dans les pratiques agricoles et l'occupation des territoires qui à leur tour avaient contribué à modifier durablement la ressource. Ce qui pouvait apparaître comme un paradoxe du point de vue hydro(géo)logique strictement quantitatif (i.e. moins de pluie et plus de recharge) n'en était plus un si l'on considérait les changements anthropiques de l'occupation du sol en lien avec les processus d'écoulement de surface et de recharge profonde.

## 2.2. Décloisonner les approches de surface et souterraine

Au moment de débuter mes travaux de thèse, les approches hydrologiques d'une part et hydrogéologiques d'autre part ne parvenaient pas à déterminer précisément les mécanismes expliquant la dynamique de la hausse piézométrique. S'il existait bien un consensus sur le fait que la hausse à long terme généralisée de la nappe résultait de l'accroissement de la recharge indirecte issue de l'augmentation du ruissellement, le désaccord portait plutôt sur les estimations quantitatives divergentes. Les approches souterraines proposaient des valeurs de la recharge récente (1992-1999) estimée entre 20 et 50 mm.an<sup>-1</sup> et de 1 à 5 mm.an<sup>-1</sup> pour la période ancienne (avant 1950-1960), soit une recharge multipliée par un facteur 10 en 50 ans (Leduc *et al.*, 2001 ; Favreau *et al.*, 2002). Les modèles hydrologiques existants simulaient une augmentation du ruissellement de 30% à 70% en conjuguant l'effet du changement du régime pluviométrique (période humide 1950-1969 contre période sèche 1970-1998) et les modifications environnementales entre 1950 et 1992 (Séguis *et al.*, 2004).

Les approches de surface concernaient cependant des petits bassins inférieurs à 2 km<sup>2</sup>, tandis que les approches souterraines étaient plus régionales, à l'échelle de la nappe. La représentativité des résultats étant différente, elle n'autorisait simplement pas leur comparaison. Séguis *et al.* (2004) avançaient également la possibilité d'une évolution du rendement des mares face à l'infiltration et une diminution des prélèvements par la végétation éradiquée des bas-fonds, là où la nappe est la plus proche de la surface. Une apparition de nouvelles mares pouvait expliquer une forte augmentation de la recharge tout en nécessitant un accroissement du ruissellement de moindre proportion et d'autres zones d'infiltration profonde pouvaient avoir été négligées.

Mes travaux de recherche de l'époque avaient pour objectif de relier les deux approches (de surface et souterraine) afin de tester la cohérence de nos hypothèses de recharge indirecte et progresser dans la compréhension des processus de réponse des réserves de la nappe aux évolutions en surface. Pour cela, je choisissais de mettre en œuvre l'extension de la modélisation de surface à toute la zone de recharge de la nappe, couplée à une modélisation de l'aquifère et simuler la dynamique de hausse observée.

Considérer conjointement les écoulements en surface et en souterrain s'avérait représenter une avancée méthodologique notable pour le développement d'un modèle capable de simuler le ruissellement de surface sur un ensemble de bassins endoréiques élémentaires délimités à partir de l'inventaire des points de recharge sur une zone de 5 000 km<sup>2</sup>. La modélisation distribuée des flux dans l'aquifère en réponse au forçage de la recharge par le ruissellement simulé me permettait d'utiliser les séries piézométriques collectées depuis plus d'une décennie comme variables de calage, ce que la qualité/quantité des données relatives au ruissellement de surface ne permettait pas d'envisager auparavant. J'ai ainsi développé un modèle à méso-échelle sur la base des résultats de la simulation du ruissellement sur un jeu restreint de bassins endoréiques élémentaires avec un modèle physique distribué. A partir des réseaux de mesure piézométriques, des données lithologiques et des mesures des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère j'ai implémenté un modèle numérique distribué de l'aquifère (Modflow, McDonald et Harbaugh, 1988), calé et validé en régime permanent sur les niveaux de la nappe supposée à l'équilibre avec les conditions extérieures précédant les grands changements environnementaux. Je simulais ensuite l'évolution de la nappe phréatique sur la période 1992-2003 en régime transitoire, forcée à chaque pas de temps par les conditions de recharge en surface telles que calculées par le modèle de ruissellement (Figure 3). La réalisation de ce forçage a nécessité l'établissement d'un compromis entre les échelles spécifiques des deux approches. Le modèle pluie-débit n'estimait les écoulements qu'au niveau des exutoires identifiés. Le modèle souterrain distribué ne pouvait prendre en compte que la recharge sur des mailles de 1 km<sup>2</sup>, les capacités de calcul et la densité spatiale des données disponibles sur l'aquifère limitant la résolution spatiale et temporelle. Le compromis consistait à agréger les écoulements événementiels sur les surfaces de quelques hectares en entrées journalières sur des mailles de 1km<sup>2</sup>.

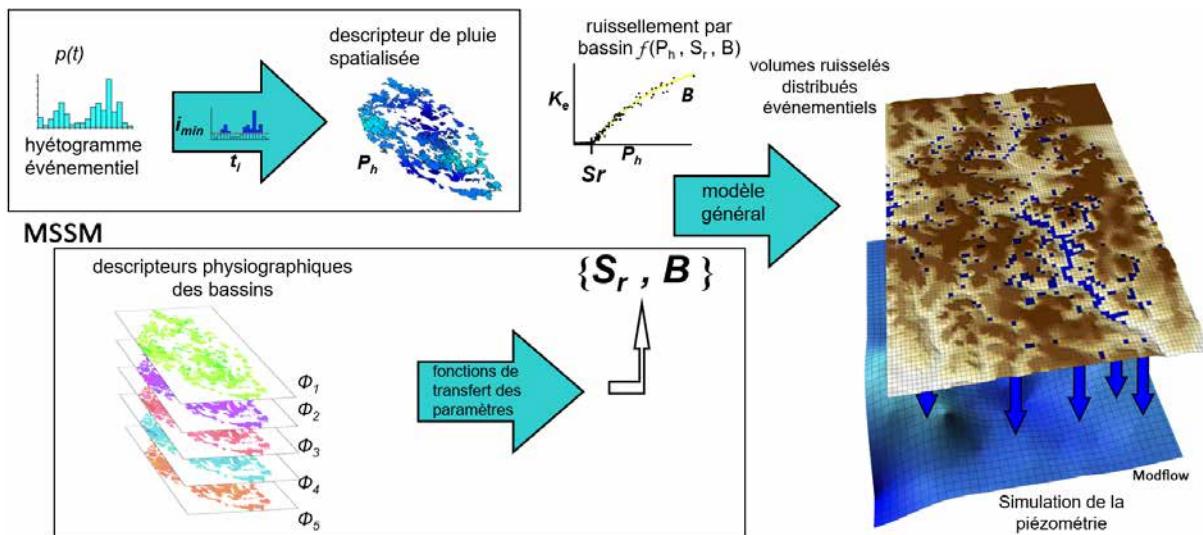


Figure 3 : Principe du modèle pluie-débit MSSM et du forçage de la recharge dans le modèle de nappe distribué sur la zone du Kori de Dantiandou au sud-ouest Niger (site AMMA).

J’arrivais ainsi à représenter la hausse générale de  $18 \text{ cm.an}^{-1}$  des niveaux de la nappe phréatique en conservant une gamme de paramètres hydrodynamiques acceptable d’après les mesures disponibles sur l’aquifère. Cependant les simulations ne parvenaient pas à représenter la variabilité inter-annuelle de la recharge de manière satisfaisante (Massuel et al., 2011).

L’approche conjointe surface-souterrain me permettait de faire coïncider les bilans hydrologiques et hydrogéologiques sans toutefois autoriser la représentation fine des dynamiques du système, ne validant donc que partiellement la régionalisation des écoulements de surface. L’approche a cependant apporté de nouvelles perspectives là où, séparément, chaque discipline se heurtait à des limites inhérentes aux spécificités des zones sahéliennes. Cette appréhension multidisciplinaire des phénomènes a constitué l’intérêt méthodologique principal de ce travail de recherche en ouvrant des pistes d’investigation majeures qui ont orienté mes travaux ultérieurs : la détermination des lacunes dans l’identification des zones de recharge de la nappe via la caractérisation des processus de l’infiltration profonde (Massuel et al., 2006), la détermination de l’impact sur la modélisation hydrologique de l’incertitude sur les champs de pluie (Vischel et al., 2009) et la nécessité de mieux contraindre les paramètres hydrodynamiques de l’aquifère phréatique (Boucher et al., 2012).

### 2.3. Caractérisation des processus d’infiltration profonde

Ces premiers résultats confirmaient l’intérêt de mettre en œuvre des approches conjointes pour faire progresser la connaissance du milieu. Ainsi, en complément de l’approche surface-souterrain, je mobilisais les techniques et concepts de la géophysique de sub-surface pour révéler une nouvelle part des processus de l’infiltration profonde sur une zone d’épandage sableuse d’un bassin versant élémentaire (zone typique de rupture de pente à mi-versant avec épandage de la ravine principale, Figure 2). Sur ce type de bassins, la modélisation hydrologique distribuée simulait une infiltration totale des volumes ruisselés depuis l’amont, sans qu’aucun écoulement ne franchisse les quelques centaines de mètres de canaux sableux anastomosés de la zone d’épandage (Cappelaere et al., 2003). A l’aplomb, la surface saturée étant située entre 32 et 41 m de profondeur, il restait à démontrer si l’infiltration était en mesure d’atteindre la nappe.

Je collaborais avec M. Descloiries (IRD, UMR-IGE), géophysicien s’intéressant aux questions de spatialisation des aquifères et de leurs modèles de recharge, pour conduire des expérimentations géophysiques de sub-surface s’appuyant sur les mesures de la conductivité électrique apparente du sol, paramètre très influencé par la nature du milieu, la teneur en eau et la minéralisation des eaux contenues dans les formations (Descloiries et al., 2003). J’ai ainsi réalisé une cartographie 2D étendue

de la conductivité du sol à différentes profondeurs et à différentes échelles à l'aide d'un conductivimètre électromagnétique (EM34). Se basant sur cette information spatialisée, nous avons effectué une coupe de conductivité électrique de la zone non saturée (panneau électrique) positionnée sur un axe montrant les meilleurs contrastes de conductivité d'après la carte 2D. Le long de cet axe, nous avons foré 8 sondages à la tarière manuelle jusqu'à 25 m de profondeur afin d'effectuer les prélèvements nécessaires aux analyses chimiques et les diagraphies électriques verticales pour l'inversion du panneau électrique.

Cette inversion montrait la présence d'une couche étendue plus conductrice entre 5 et 10 m sous la surface, interrompue à l'aplomb du passage des chenaux sableux. Les cartes 2D de résistivité indiquaient également que les faibles conductivités apparentes coïncidaient avec le passage des chevelus sableux en surface. Les diagraphies montraient que pour les forages situés au voisinage d'un chenal, la conductivité électrique restait toujours faible, alors que pour les autres, elle augmentait sensiblement dans une tranche située systématiquement entre 5 et 10 m de profondeur. Parallèlement, les mesures de conductivité électrolytique effectuées sur les prélevements de sols affichaient une forte corrélation avec la conductivité électrique mesurée en forage alors que les teneurs en eau restaient constantes. Les analyses de diffraction X et la granulométrie confirmaient l'homogénéité de la composition des dépôts sédimentaires silto-gréseux.

J'interprétais cette bande plus conductrice comme le témoin d'une couche où la solution du sol était relativement plus minéralisée. Sans présumer des mécanismes d'accumulation des électrolytes, cela signifiait que les eaux de surface ne percolaient pas au-delà de cette profondeur de 5 à 10 m et qu'un lessivage épisodique avait lieu à l'aplomb du réseau de drainage, emportant les solutés au moins au-delà de 25 m, et donc potentiellement jusqu'à la nappe. Les volumes concernés d'après la modélisation hydrologique auraient pu atteindre 24 000 m<sup>3</sup> par an sur la période 1992-2003, soit des ordres de grandeur comparables aux mares de vallées. Je montrais donc que ces zones représentaient des points supplémentaires de recharge souterraine à prendre en compte pour l'hydrogéologie.

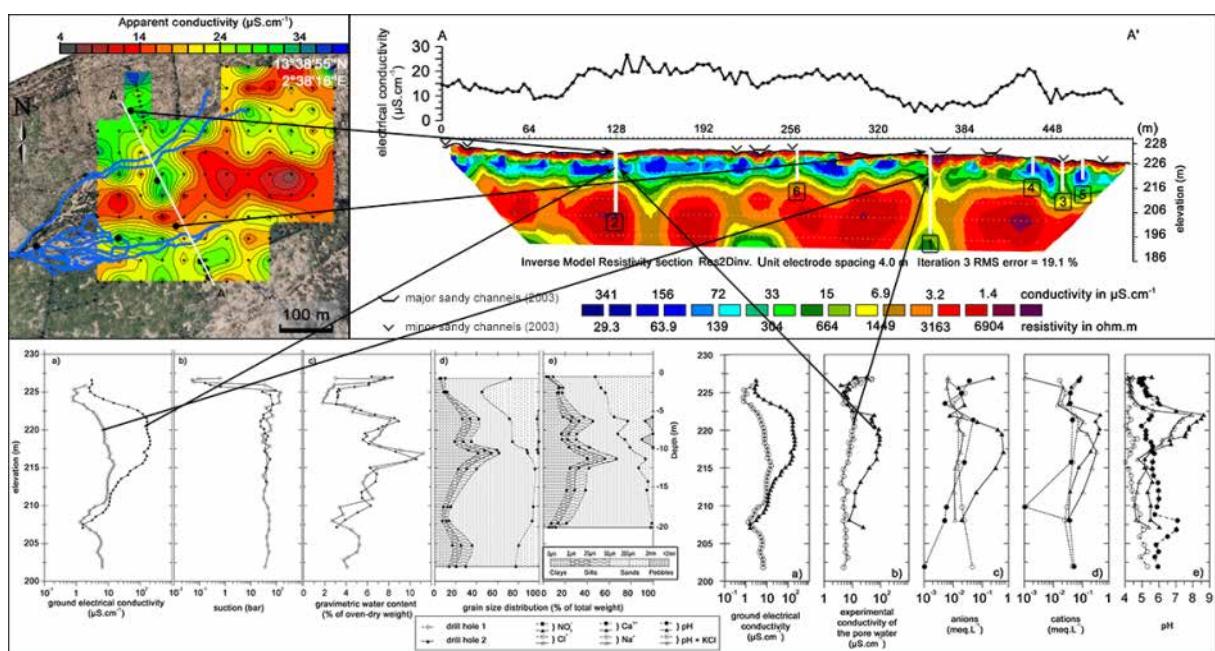


Figure 4 : En haut à gauche : cartographie de la conductivité électromagnétique sur la zone d'épandage du bassin de Wankama (SNO AMMA-Catch) ; en haut à droite : panneau électrique transversal au cône de déjection montrant la bande discontinue plus conductrice sous la surface ; en bas : diagraphies physiques et chimiques réalisées dans les forages 1 et 2. (D'après Massuel et al., 2006).

Cette expérience illustre tout l'intérêt pour la compréhension des processus hydro(géo)logiques de croiser un ensemble d'outils et de méthodes appartenant à des champs disciplinaires différents bien

qu'épistémologiquement proches. Pris indépendamment, chaque résultat issu des différentes approches ne permettait pas de lever les ambiguïtés d'interprétation, alors que leur mise en perspective rendait cette interprétation explicite, faisant progresser la compréhension du système.

#### 2.4. Recharge artificielle

Mes travaux sur le « paradoxe sahélien » avaient montré que les changements d'occupation du sol induits par l'activité humaine pouvaient largement influencer les processus de recharge indirecte des aquifères et modifier les bilans. Je m'interrogeais alors sur l'influence des multiples structures artificielles de collecte et de stockage du ruissellement, cherchant à comprendre si elles pouvaient contribuer sensiblement à la redistribution spatiale et temporelle de la recharge souterraine. En effet, les petites structures généralement construites en travers du lit des cours d'eau intermittents sont extrêmement répandues dans le monde, et en particulier dans les zones semi-arides (Downing, 2010). Parfois qualifiées de petits barrages ou de lacs collinaires, ces structures peuvent être construites pour remplir des objectifs multiples, avérés ou non, selon les contextes. On leur attribue généralement la capacité de constituer des réserves d'eau potable, favoriser la production agricole, réduire l'érosion et préserver les sols, écrêter les crues ou bien contribuer à la recharge artificielle des aquifères pour soutenir le niveau des nappes.

En Inde, depuis la révolution verte, le développement de l'agriculture irriguée et la mobilisation progressive de l'ensemble des ressources en eau de surface a poussé les gestionnaires à promouvoir l'exploitation des eaux souterraines (Shah, 2005). Devant la chute généralisée des niveaux des nappes qui a suivi, l'option de stimuler la recharge des aquifères en réhabilitant ou construisant des milliers de petits réservoirs a été retenue, en interdisant même parfois l'usage de ces réserves comme au Telangana (ex. Andhra Pradesh). Cette région d'Inde du Sud est largement constituée d'aquifères de socle. Issus de processus géomorphologiques d'altération et d'érosion en profondeur (Cf. §3.1), ces aquifères sont libres et peu profonds, occupant généralement les 20 premiers mètres sous la surface. En collaboration avec le CEFIRE<sup>24</sup> d'Hyderabad et le NGRI<sup>25</sup>, j'ai procédé à l'étude fine du bilan hydrologique d'un petit barrage représentatif pour mettre en évidence les processus d'échanges avec la nappe. Ce travail reposait sur le suivi des niveaux d'eau de la retenue, de la pluviométrie et de l'évaporation, ainsi que la réalisation d'une bathymétrie pour établir la relation entre la hauteur d'eau, la surface et le volume (courbes HSV). L'épaisseur du colmatage était déterminée par tomographie électrique et 3 forages étaient réalisés de façon à obtenir un profil d'observation en aval du réservoir avec suivi des niveaux piézométriques. En sus de cette instrumentation permanente, des visites régulières nous permettaient de mesurer la piézométrie dans le réseau de forages d'irrigation et la conductivité électrique de l'eau. De même, nous procédions à des prélèvements réguliers pour l'analyse des isotopes stables de l'eau ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) et des chlorures afin de croiser les résultats avec les données du bilan hydrologique. Les résultats montraient que l'efficience de la recharge ne dépassait pas 60% sur les 2 années d'observation, avec presque 40% de reprise évaporatoire. La modélisation numérique 2D montrait que les taux d'infiltration étaient très sensibles aux pompages proches du réservoir du fait de la continuité hydraulique de la nappe avec le plan d'eau. Le rayon d'influence de la recharge était extrêmement limité avec près de 80% des volumes infiltrés remobilisés par les puits dans les 100 premiers mètres autour du réservoir (Massuel et al., 2014).

<sup>24</sup> Centre Franco-Indien de Recherche sur les Eaux Souterraines

<sup>25</sup> National Geophysical Research Institute

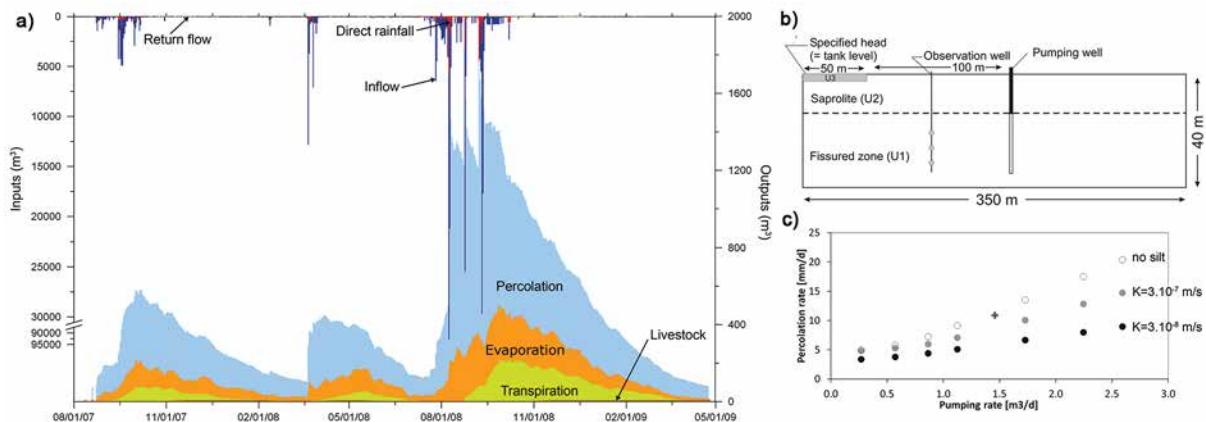


Figure 5 : a) Bilan hydrologique du réservoir artificiel (Sangapur, Inde), b) Représentation schématique du modèle numérique, c) relation entre le prélèvement total après 240 jours de pompage et le taux de percolation journalier moyen pour différentes conditions d'envasement. (D'après Massuel et al., 2014).

L'approche combinée surface et souterrain a permis l'accès à un ensemble de processus régissant la dynamique des écoulements de surface et les échanges entre les petits réservoirs et la nappe. Je comprenais cependant que la logique hydrologique n'était pas la seule à expliquer la situation observée vis-à-vis de la gestion. D'un point de vue hydrologique ces ouvrages ne permettaient pas une gestion optimale, provoquant des pertes par évaporation de près de 40% des eaux ruisselées rendues indisponibles en aval pour un gain discutable sur la réserve souterraine. Je recommandais alors de ne pas multiplier ces structures et d'en mobiliser la ressource en priorité en saison sèche afin de les vider le plus rapidement possible et limiter l'évapotranspiration. Ces recommandations étaient pourtant toutes relatives, sachant que ces objets remplissaient aussi d'autres fonctions que le simple stockage, comme le maintien d'un mode de mobilisation traditionnel ou la matérialisation de l'action publique, qui pesaient largement dans la justification des stratégies de gestion.

J'ai été confronté à des situations similaires en Tunisie centrale, où l'aménagement des bassins versants avait été une des priorités du gouvernement tunisien qui réalisait depuis plus de 40 ans des milliers de lacs collinaires et de banquettes antiérosives afin de ralentir le ruissellement et favoriser l'infiltration (Nasri et al., 2004). Les travaux de thèse d'A. Ogilvie auxquels j'ai participé analysaient conjointement le fonctionnement des retenues collinaires et l'organisation des sociétés riveraines, et ce, en lien avec les objectifs qui leur avaient été initialement attribués. Les volumes stockés dans les réservoirs collinaires étaient estimés en exploitant les images Landsat afin de déterminer les surfaces en eau auxquelles une relation générique entre la surface mouillée et le volume stocké était appliquée (courbes HSV). Ces relations caractéristiques, évoluant au gré du remplissage sédimentaire des retenues, sont une source d'incertitude notable dans les études de bilan hydrologique régional. C'est pourquoi nous avons développé plus tard, en collaboration avec D. Feurer (IRD, UMR Lisah) et A. Maaoui (CNCT<sup>26</sup>) une méthode simple pour la réalisation de modèles numériques de surface haute résolution du fond des lacs, basée sur l'acquisition d'images aériennes basse altitude traitées par photogrammétrie (Massuel et al., 2022). Les résultats obtenus par A. Ogilvie ont mis en évidence l'incohérence apparente entre la mise en valeur de la ressource pour l'agriculture irriguée et sa disponibilité hydrologique qui ne s'expliquait en fait qu'en considérant aussi l'action du gouvernement, les capacités d'initiative individuelles et collectives ou les différentes sources de conflits (Ogilvie et al., 2019). Les fonctions remplies par les ouvrages ne correspondaient que rarement avec les objectifs initiaux affichés par les planificateurs, qui étaient souvent reformulés après coup. Ainsi, des petits réservoirs se vidant rapidement devenaient des ouvrages pour la recharge souterraine artificielle tandis que ceux qui se colmataient rapidement devenaient destinés à protéger de l'envasement le grand barrage en aval et pour compléter l'irrigation.

<sup>26</sup> Centre national de cartographie et de télédétection, Tunisie

Cette expérience a largement remis en question ma façon d'approcher l'interprétation des stratégies de gestions des ressources en eau. Les différentes situations rencontrées autour des petits barrages démontraient clairement que la planification et les logiques de gestion relevaient amplement, voire majoritairement, des contextes économiques, politiques et sociaux. Les déterminants hydrologiques et environnementaux s'avéraient ne peser qu'accessoirement dans les décisions, ce qui commençait à balayer un certain nombre de mes préjugés, à commencer par l'idée que l'apport de connaissances hydro(géo)logiques, quelles qu'elles soient, aidait nécessairement à une meilleure gestion.

### **3. PRELEVEMENTS, RESERVE ET DURABILITE**

#### **3.1. Estimer la durabilité des prélèvements souterrains**

L'intégration des connaissances s'est avérée concluante pour faire correspondre l'évolution des bilans hydrologiques de surface et souterrains à large échelle au Sahel. Il était alors intéressant de mobiliser également cette approche dans un contexte où l'évolution concernait des usages multiples. Dans cette optique, mes travaux de recherche réalisés en Inde du Sud ont cherché à intégrer les interactions complexes entre les composantes hydrologiques dans l'espace et le temps pour fournir une évaluation de la ressource en eau souterraine durablement exploitable. Il s'agissait de montrer comment la modélisation numérique pouvait améliorer l'évaluation de la durabilité des eaux souterraines et d'en déterminer les implications possibles sur la gestion des ressources en eau.

Dans le bassin de la Musi (11 000 km<sup>2</sup>), l'un des principaux affluents du fleuve Krishna, situé dans le Telangana, le volume durablement exploitable des eaux souterraines était défini sur la base du bilan entre les entrées et les sorties des aquifères sur une période donnée (année hydrologique). Suivant ce principe, les prélèvements étaient considérés durables lorsqu'inférieurs ou égaux à la part fluctuante de la réserve en eau souterraine (réserve régulatrice). Cette fluctuation était assimilée à la recharge saisonnière, estimée en spatialisant les niveaux minimaux et maximaux saisonniers des puits mesurés par le Central Ground Water Board<sup>27</sup>, moyennant une certaine valeur de porosité globale équivalente<sup>28</sup>. Sur cette base, les bassins étaient classés en fonction de leur niveau d'abstraction de « sans risques » à « surexploités ». D'un point de vue hydrogéologique, il semblait nécessaire de faire reposer des stratégies d'allocation et des plans de gestion à long terme sur des estimations plus précises et plus conformes à ce que représente la ressource souterraine en exploitation (Cf. §1.2). Les volumes de recharge d'un aquifère ne sont pas les volumes durablement exploitables. Ces derniers sont relatifs aux débits de nappe et ces deux composantes peuvent différer sensiblement selon les situations. Bredehoeft et al. (1982, 2002) qualifiaient justement de « water budget myth » le fait d'assimiler ces deux grandeurs dans les approches « bilan » et précisaien que « *The size of a sustainable ground water development usually depends on how much of the discharge from the system can be "captured" by the development. Capture is independent of the recharge; it depends on the dynamic response of the aquifer system to the development* ». La capture met en jeu des interactions complexes et non linéaires entre les différents compartiments hydrologiques (aquifères connexes, rivières, canaux, lacs, atmosphère, plantes etc.) et correspond au volume d'eau extrait autorisant la conservation d'un stock défini dans l'aquifère associé à un certain niveau de nappe stabilisé sur le long terme.

Suivant ce raisonnement, mon approche sur le bassin du fleuve Musi a été de représenter les relations entre les différentes composantes hydrologiques au moyen de la modélisation des écoulements souterrains afin de calculer des bilans tenant compte des processus d'échanges de flux (approche « processus »). Je pouvais alors comparer la ressource simulée à la recharge saisonnière calibrée (approche « bilan »).

<sup>27</sup> Agence nationale indienne de référence chargée de fournir des données scientifiques pour la gestion, l'exploration, la surveillance, l'évaluation, l'augmentation et la régulation des ressources en eau souterraine.

<sup>28</sup> Water table fluctuation method (WTF) : méthode basée sur l'hypothèse qu'une élévation des niveaux piézométriques mesurés dans les puits est causée par l'addition de la recharge dans la nappe (Healy and Cook, 2002).

Depuis la révolution verte, le développement continu du bassin avait entraîné de profonds changements socio-environnementaux. En 2008, environ 120 000 ha de cultures étaient irrigués par les eaux souterraines. Le nombre de puits en service identifiés avait été multiplié par dix entre 1991 et 2001 pour dépasser 125 000 (Handbook of Statistics, 1991 à 2001). Les écoulements de surface en amont du bassin étaient régulés par deux barrages fournissant l'eau potable pour la ville d'Hyderabad. En 2000, 1160 petits réservoirs construits sur les cours d'eau saisonniers étaient répertoriés (Biggs, non publié). Mon analyse de plus de 60 séries chronologiques du niveau des eaux souterraines réparties dans tout le bassin (de 1989 à 2004) montrait une baisse générale à long terme de la nappe phréatique alors qu'aucun déficit pluviométrique significatif n'était observé sur cette période. J'estimais un taux moyen de baisse de  $0,18 \text{ m.an}^{-1}$  avec des maximums dans certaines zones allant jusqu'à  $0,40 \text{ m.a}^{-1}$  (Figure 6). Cette situation s'expliquait principalement par l'exploitation des eaux souterraines pour l'irrigation. Le bassin de la Musi était principalement composé de granites archéens recouverts par les trapps du Deccan dans sa limite orientale. Les réserves en eau souterraine étaient donc principalement représentées par des aquifères typiques des zones de socle, à savoir peu profonds, non confinés, et à la capacité de stockage relativement limitée (Wynd et al., 2004). Ces aquifères composites dérivent principalement des processus géomorphologiques d'altération et d'érosion en profondeur (Lachassagne et al., 2011) et peuvent être considérés comme des systèmes multicouches (Dewandel et al., 2006). En surface se trouve le manteau altéré non consolidé (saprolite ou régolithe), d'une épaisseur négligeable à plusieurs dizaines de mètres. Lorsqu'elle est saturée, cette couche constitue le réservoir de l'aquifère, sa fonction capacitive (Maréchal et al., 2006). Plus en profondeur se trouve une couche fracturée et altérée, généralement caractérisée par une densité de fractures qui diminue avec la profondeur (Wynd et al., 2004). Cette couche assure principalement la fonction conductrice de l'aquifère et est pompée par la plupart des forages. Ces deux couches reposent sur le socle sain qui n'est perméable que très localement, là où des fractures tectoniques perméables profondes sont présentes. En conséquence pour l'exploitation, les forages présentent généralement des profondeurs limites et leur débit tend à diminuer avec la profondeur en raison de la réduction de la densité des fractures (Figure 6b). La course à la profondeur est inutile. Le risque d'épuisement des réserves en cas d'année sèche est exacerbé dès que les niveaux des nappes sont maintenus sous la couche de saprolite, car la fonction capacitive de l'aquifère est alors très réduite et seule intervient la fonction conductrice. L'aquifère ne peut alors plus remplir son rôle tampon, principal avantage sur les eaux de surface en zone semi-aride. Réduit à la seule réserve régulatrice, il est soumis à des dynamiques semblables à celles des écoulements de surface, ne stockant et transférant rapidement que les volumes de recharge de la saison en cours.

Dans ce contexte, j'ai mis en œuvre un modèle hydrodynamique distribué (Modflow) au pas de temps mensuel, permettant de simuler en régime transitoire les niveaux piézométriques observés sur la période 1990-2004 (Massuel et al., 2013). Le modèle comportait deux couches représentant respectivement la saprolite et les granites fracturés-altérés dont le comportement hydrodynamique était assimilé à un milieu poreux équivalent (Figure 6c). Les simulations reconstituaient le déclin observé de la nappe phréatique pour une recharge moyenne interannuelle de  $1170 \text{ hm}^3.\text{an}^{-1}$  spatialement très hétérogène (Figure 6c), les prélèvements moyens interannuels étant estimés en entrée à  $1235 \text{ hm}^3.\text{an}^{-1}$ . J'ai ensuite déterminé les volumes durablement prélevables en ajustant itérativement dans le modèle le taux de prélèvement afin d'obtenir un stockage interannuel moyen constant dans l'aquifère, toutes choses égales par ailleurs. Cet ajustement tenait compte à chaque pas de temps des impacts sur la réserve des interactions entre les différentes composantes à travers les différents processus de transferts intégrés dans le modèle (infiltration par retour d'eau d'irrigation, écoulements de base, percolation depuis les retenues en surface, etc.). Le niveau de nappe de référence à maintenir sur le long terme était celui du début de la période d'observation (1990) et choisi de manière arbitraire. La valeur de ces prélèvements correspondait ainsi à la différence entre la variation des flux entrants et sortants induite par le maintien de ce niveau et s'établissait à  $1020 \text{ hm}^3.\text{an}^{-1}$ . Cette évaluation différait en fait de 13% de la recharge moyenne interannuelle ( $1170 \text{ hm}^3.\text{an}^{-1}$ ). Je concluais que pour s'approcher des prélèvements durables, le pompage

interannuel moyen des eaux souterraines devait être réduit de 18% selon l'approche « processus » et de seulement 5% selon l'approche « bilan ».

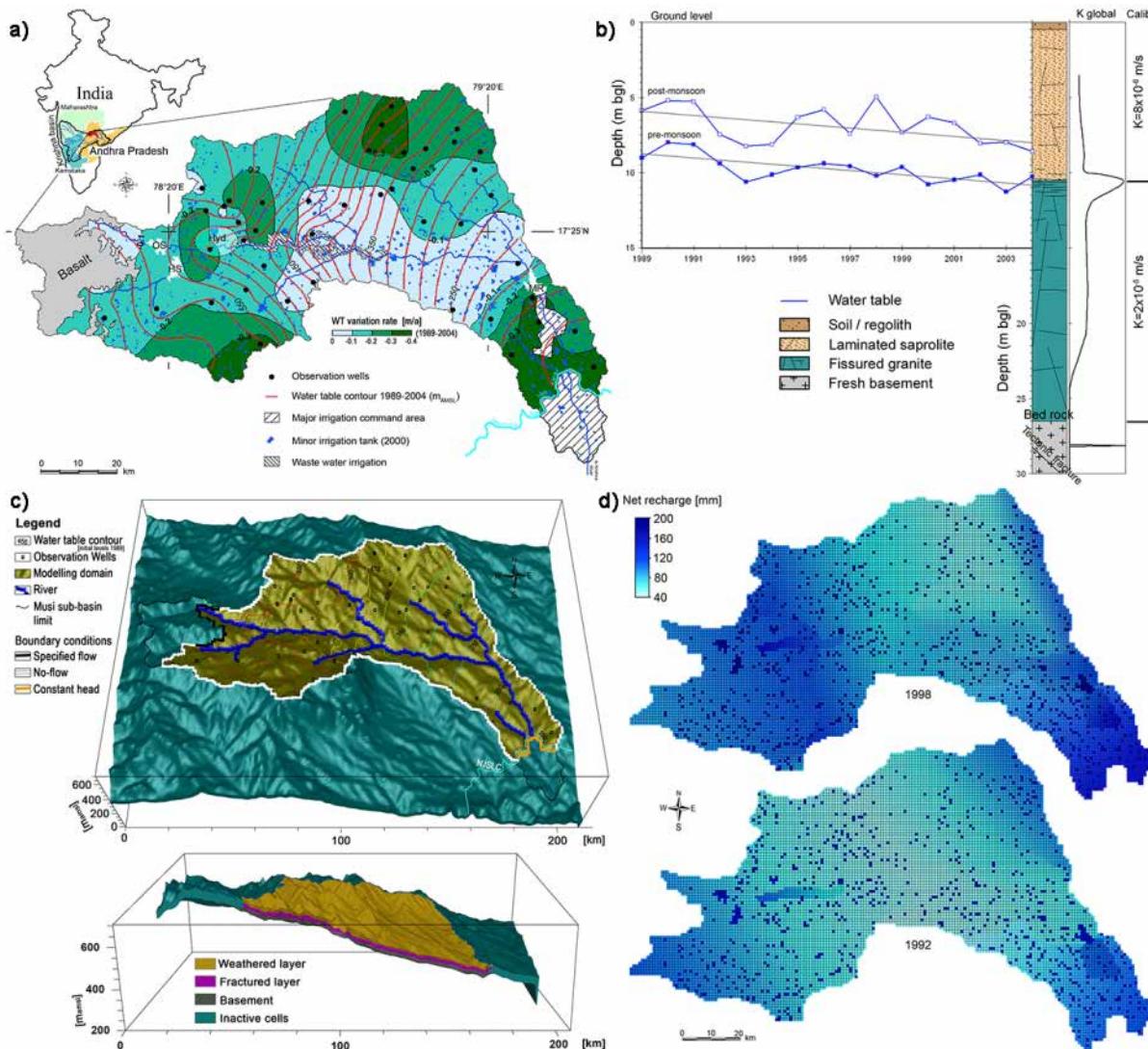


Figure 6 : a) Carte piézométrique moyenne et distribution spatiale des vitesses de baisse annuelle des niveaux d'eau souterraine dans le bassin du fleuve Musi, Inde ; b) Baisse moyenne des puits en comparaison de la structure schématique de l'aquifère et de la distribution des valeurs des coefficients de perméabilité ; c) Modèle souterrain de l'aquifère du bassin du fleuve Musi, conditions aux limites et coupe transversale ; d) Distribution spatiale de la recharge nette calculée en 1992 (minimum) et 1998 (maximum). (D'après Massuel et al., 2013, modifié).

Dans la logique des outils de simulation des systèmes d'approvisionnement en eau pour la planification opérationnelle (e.g. REALM ; Perera et al., 2005), ces deux estimations généreraient des différences notoires entre les recommandations à mettre en œuvre. Selon le modèle d'allocation, toutes les sources d'eau alternatives pour soutenir la demande en eau dans le bassin étaient déjà mobilisées. La seule option envisageable était de réduire la demande. La réduction des prélèvements en eau souterraine pouvait se faire par l'adaptation du système de culture à la disponibilité annuelle de l'eau. La proposition principale était le remplacement des cultures très consommatoires en eau, comme le riz qui dominait alors les surfaces irriguées (77% des surfaces totales irriguées). Les simulations annulaient les déficits si au moins 7% de la superficie de riz irrigué étaient remplacés par des cultures pluviales selon les estimations de l'approche « bilan », tandis qu'un remplacement de 10% des surfaces était nécessaire selon les estimations de l'approche « processus » (soit près de 8 000 ha supplémentaires à convertir). Par la même occasion, l'abandon de la culture du riz au profit de cultures

pluviales devait améliorer la productivité en eau en raison des coûts de production plus faibles et des rendements plus élevés par mètre cube de cultures sèches (George et al., 2011b).

Le terrain et les agriculteurs m'apprenaient par ailleurs que dans un contexte où l'accès à l'eau était peu contraignant et bon marché (coûts faibles des équipements, électricité subventionnée), la projection sur le temps long, et donc la durabilité, n'était pas une priorité comparée à d'autres contraintes plus immédiates. Les recommandations d'économies d'eau quelles qu'elles soient ne rencontraient que peu d'écho devant le besoin d'assurer des rendements minimaux et de limiter le risque de perte des cultures ou de garantir une qualité suffisante pour s'assurer un accès au marché. L'approche proposée pour mieux estimer les volumes prélevables de manière durable était scientifiquement satisfaisante, mais son intérêt ne franchissait guère les frontières de la communauté des sciences hydrologiques. La réflexion menée sur la durabilité de la ressource en eau éludait en fait une large part de ce qui définit cette durabilité, c'est-à-dire les logiques des différents acteurs qui elles-mêmes dépendent des contextes hydro(géo)logiques et environnementaux, mais aussi historiques, économiques, politiques ou sociaux. Et ces différentes logiques ne concevaient à l'évidence pas les mêmes échelles de temps (court terme *versus* temps long) et d'espace (communauté d'irrigants *versus* bassin versant).

### 3.2. Estimer les prélèvements souterrains

Les prélèvements souterrains représentent la partie de l'intervention humaine la plus visible parmi les activités « perturbant » le cycle hydrologique. C'est aussi l'une des variables les plus complexes à estimer dans les régions où le captage des eaux souterraines est fortement dominé par l'initiative privée, généralement de petites exploitations agricoles, avec de multiples puits dispersés dans le paysage. A l'échelle de petits territoires, les méthodes directes nécessitent de mettre en œuvre ou d'adapter des procédés contraignants et coûteux. L'installation d'équipements de surveillance tels que les compteurs d'eau est généralement mal accueillie par les agriculteurs, en particulier lorsque l'expérience dure longtemps. A l'échelle régionale, les méthodes sont indirectes. Par exemple, Ruid et al. (2004) assimilent les prélèvements à un terme de clôture du bilan hydrique et Martínez-Alfaro (2010) utilisent la méthode WTF (Healy et Cook, 2002). Liu et al. (2015) estiment les pompages en combinant l'analyse du signal piézométrique dans les puits observés (rabattement) et la modélisation de la fluctuation de la nappe. D'autres auteurs utilisent les outils de télédétection pour calculer la demande en eau des cultures fournie par les pompages (Hunink et al., 2015), parfois combinés à des approches de bilan hydrique (Ahmad et al., 2005 ; Zhu et al., 2009). Ces méthodes sont très intégratives, fournissent des images figées de situations évoluant parfois rapidement et ont en commun de se concentrer essentiellement sur la dimension comptable des prélèvements, avec pourtant l'ambition de prédire des tendances futures pour la gestion. Mon arrivée à l'IRD dans l'UMR G-EAU et mon affectation pour travailler sur le chantier tunisien de l'UMR, le bassin du Merguellil et la plaine de Kairouan en Tunisie centrale, correspond à une rupture dans ma façon de considérer ces approches. J'ai eu l'opportunité de partager le terrain avec une anthropologue de l'UMR, J. Riaux. Nos échanges répétés allaient me permettre une remise en question de mes points de vue d'hydrogéologue, à la lumière de mes expériences passées, mais aussi et surtout au travers de nos interrogations en cours.

Au Maghreb, l'agriculture irriguée soutenue par l'utilisation des eaux souterraines a progressivement remplacé les grands systèmes publics d'irrigation à partir des eaux de surface. Les eaux souterraines alimentent plus de 500 000 exploitations agricoles en Algérie, au Maroc et en Tunisie et les puits irriguent des zones en croissance continue estimées en 2016 à plus de 1,75 million d'hectares (Kuper et al., 2016). Le développement économique repose sur une exploitation minière des eaux souterraines avec une exploitation intensive croissante débutée il y a près de 40 ans questionnant le devenir de ce modèle dans un contexte où les réserves sont mal connues. En Tunisie, avant le protectorat français (1881), les puits traditionnels de la plaine de Kairouan alimentaient en eau le bétail et les usages domestiques des éleveurs nomades. Les travaux de reconnaissance topographique entrepris par l'armée française en 1898 avaient cartographié quelques centaines de puits. Les

exploitations coloniales ont ensuite commencé à exploiter plus intensivement les sources, les eaux de crue et les puits traditionnels pour irriguer de grandes exploitations. Après l'indépendance de 1957, le gouvernement tunisien a voulu mobiliser les ressources en eau de manière intensive mais rationnelle, notamment pour assurer la sécurité alimentaire, garantir les moyens de subsistance des populations rurales et stabiliser l'exode rural. Des institutions centralisées ont été créées et des stratégies nationales ont été mises en œuvre comme des systèmes d'irrigation collectifs alimentés par les eaux souterraines à travers des forages publics profonds (Le Gouven et al., 2009). Les incitations (subventions du gouvernement, projets de développement) pour développer l'accès individuel à l'eau et l'irrigation ont lancé dans les années 1980 l'ère de l'exploitation privée des eaux souterraines pour les exploitations individuelles. A partir de ce moment, l'Etat a commencé à perdre le contrôle sur l'exploitation des eaux souterraines (Riaux et al., 2016). Les autorités en charge de l'eau étaient tirailées entre la politique du laisser-faire visant à libérer le potentiel économique de l'agriculture et la nécessité d'assurer une utilisation durable des eaux souterraines. Dans la plaine de Kairouan, les forages et les pompages illicites se sont rapidement développés, tandis que les autorités ont tenté de maintenir un suivi de la situation en réalisant des inventaires des puits et en maintenant un réseau régional de surveillance des niveaux des nappes phréatiques. La nappe affichait alors une baisse générale continue moyenne d'environ 30 m depuis les années 1970 (Leduc et al., 2007). Les scénarios prospectifs pour les stratégies de planification des ressources en eau étaient ainsi essentiellement basés sur l'évolution du nombre de puits et des niveaux de la nappe phréatique.

Mes travaux sur l'aquifère de la plaine de Kairouan avaient pour but initial de déterminer plus précisément les prélèvements en utilisant des mesures directes. Pour contourner certaines contraintes liées à l'instrumentation, j'avais développé en Inde une méthode de mesure directe à faible coût, relativement précise et peu invasive, capable de déterminer la durée du pompage en suivant simplement la température du tuyau d'exhaure d'une pompe (Massuel et al., 2009). De petits thermistors enregistreurs autonomes issus de l'industrie agro-alimentaire étaient simplement fixés par un ruban adhésif à la surface du tuyau. Ils étaient discrets, facilement amovibles et généralement bien acceptés par les propriétaires. La reconstitution des volumes pompés entre 2013 et 2015 était donc basée sur cette méthode, avec un échantillon de 38 puits instrumentés choisis suivant l'analyse statistique de facteurs issus d'un inventaire récent qui détaillait plus de 900 puits sur les 2000 identifiés (capacité de la pompe, type d'énergie, profondeur totale du puits, profondeur de la nappe phréatique, débit instantané, etc.). Les puits étaient classés en groupes représentatifs des systèmes d'irrigation. Le volume moyen mensuel pompé du barycentre de chaque groupe était multiplié par le nombre de puits appartenant à chaque groupe afin d'obtenir un volume prélevé total régional pondéré. Il pouvait être comparé au volume prélevé total régional moyen issu de la multiplication du nombre de puits par le volume moyen pompé, respectivement 120 et 150  $\text{hm}^3.\text{an}^{-1}$  (Massuel et al., 2017).

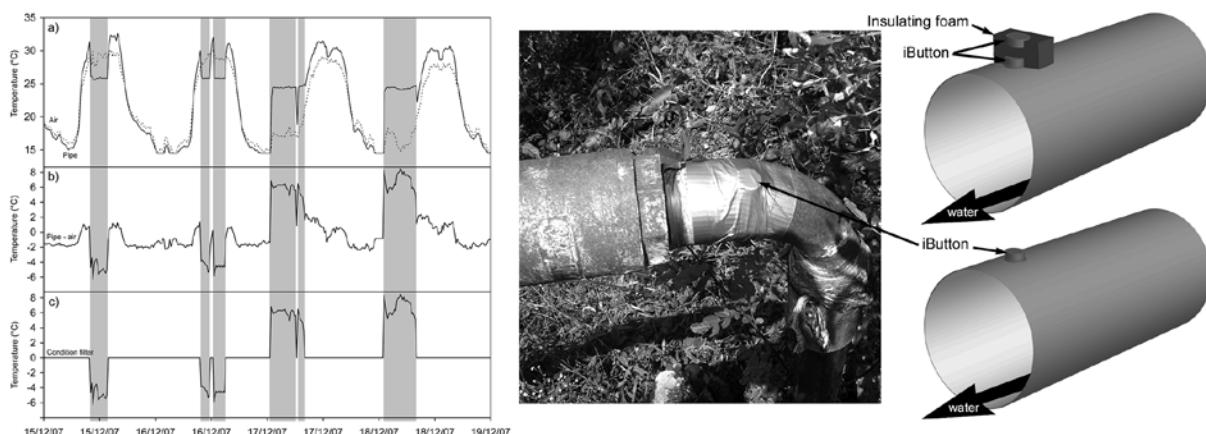


Figure 7 : Principe d'interprétation et d'installation du dispositif de mesure des temps de pompage par suivi de la température des tuyaux d'exhaure. (D'après Massuel et al., 2009).

Au cours de ces recherches sur les prélèvements, un regard que nous avons par la suite qualifié de « sociohydrologique » s'était progressivement construit à la faveur d'une pratique longue et partagée du terrain. Des repères et des objets d'observation communs s'étaient dessinés, donnant naissance à une expérience interdisciplinaire élargie (Figure 8). Il avait fallu expliciter et s'approprier les concepts des deux disciplines, confronter les sources d'information variées (mesures, mémoire, archives) et identifier des convergences pour produire des hypothèses communes (Riaux et Massuel, 2014). Ce travail avait conduit à reconstruire une histoire complexe de l'évolution des forages et des dynamiques de prélèvements éclairant sur les problèmes en cours. Des visites et des discussions continues avaient permis de garder un lien étroit avec les exploitants et de s'informer de tout changement dans le modèle et le calendrier de culture, les pratiques d'irrigation, les zones irriguées ou l'équipement de pompage.

Avant le début de la baisse des eaux souterraines, les puits étaient peu profonds, voire artésiens à l'aval de la plaine. Puis, les agriculteurs ont dû suivre la baisse de la nappe phréatique en approfondissant leurs puits traditionnels. Le code de l'eau tunisien qui fixait une profondeur limite de forage à 50 m avait généré des techniques d'approfondissement illicites dans le fond des puits, tolérées par la police des eaux, mais limitant le rendement des ouvrages (Figure 9a). Après la révolution de 2011, la menace de sanction s'était dissipée et les forages profonds (>90 m) avaient commencé à remplacer les puits approfondis en fournissant un accès à la nappe pour plusieurs années avec des débits plus importants (x3). Par ailleurs, les processus d'héritage avaient conduit à une division progressive des terres suite à des conflits fréquents entre héritiers. Il n'était pas rare de voir le puits de la parcelle familiale abandonné faute de volonté d'investir dans l'entretien ou l'approfondissement tant que la succession n'était pas réglée et que l'attribution de la terre était en suspens. Afin d'éviter d'avoir à partager ce puits, de nouveaux puits pouvaient être forés pour chaque parcelle divisée ou pour pratiquer une irrigation plus intensive et obtenir les mêmes revenus avec des surfaces plus petites (Figure 9b). Les titres de propriété foncière étant très rares et les propriétaires ne vivant pas forcément sur leur parcelle, il était fréquent de trouver des puits forés exclusivement pour sécuriser la propriété foncière, ou pour le prestige social, ces puits étant rarement utilisés pour l'irrigation. Nous projetions alors par exemple que les forages profonds allaient dominer l'accès privé à l'eau avec un abandon massif des puits traditionnels approfondis. La course à l'accès aux eaux souterraines et la réduction des surfaces par exploitant allaient tendre vers une pratique plus intensive de l'irrigation au détriment des petites exploitations.

Ces investigations ne révélaient sans doute qu'une petite partie de la grande variété des caractéristiques liées aux prélèvements des eaux souterraines et à leurs usages dans la plaine de Kairouan. Il y avait cependant suffisamment d'indications pour remettre en question les schémas conceptuels d'estimation des prélèvements régionaux basés uniquement sur le nombre de puits et pour mettre en perspective leur évolution possible. Toutes ces pratiques avaient suivi des trajectoires et des logiques qu'il était possible d'identifier et d'extrapoler. L'interprétation des durées de pompage complétée par des enquêtes auprès des agriculteurs montrait ainsi de manière évidente que les prélèvements dans les aquifères n'étaient pas que de simples valeurs comptables. Une histoire et des processus décisionnels complexes déterminaient les volumes prélevés et leurs usages. Je réalisais qu'ils n'étaient pas de simples volumes sortant de l'hydrosystème, bornés par les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère ou la demande climatique, mais qu'ils intégraient des logiques sociales liées aux différents acteurs et à leur rapport avec la ressource. Comprendre le présent et se hasarder à faire des scénarios prospectifs ayant une probabilité significative de se réaliser nécessitait donc de poser un regard sur l'ensemble de ces mécanismes.

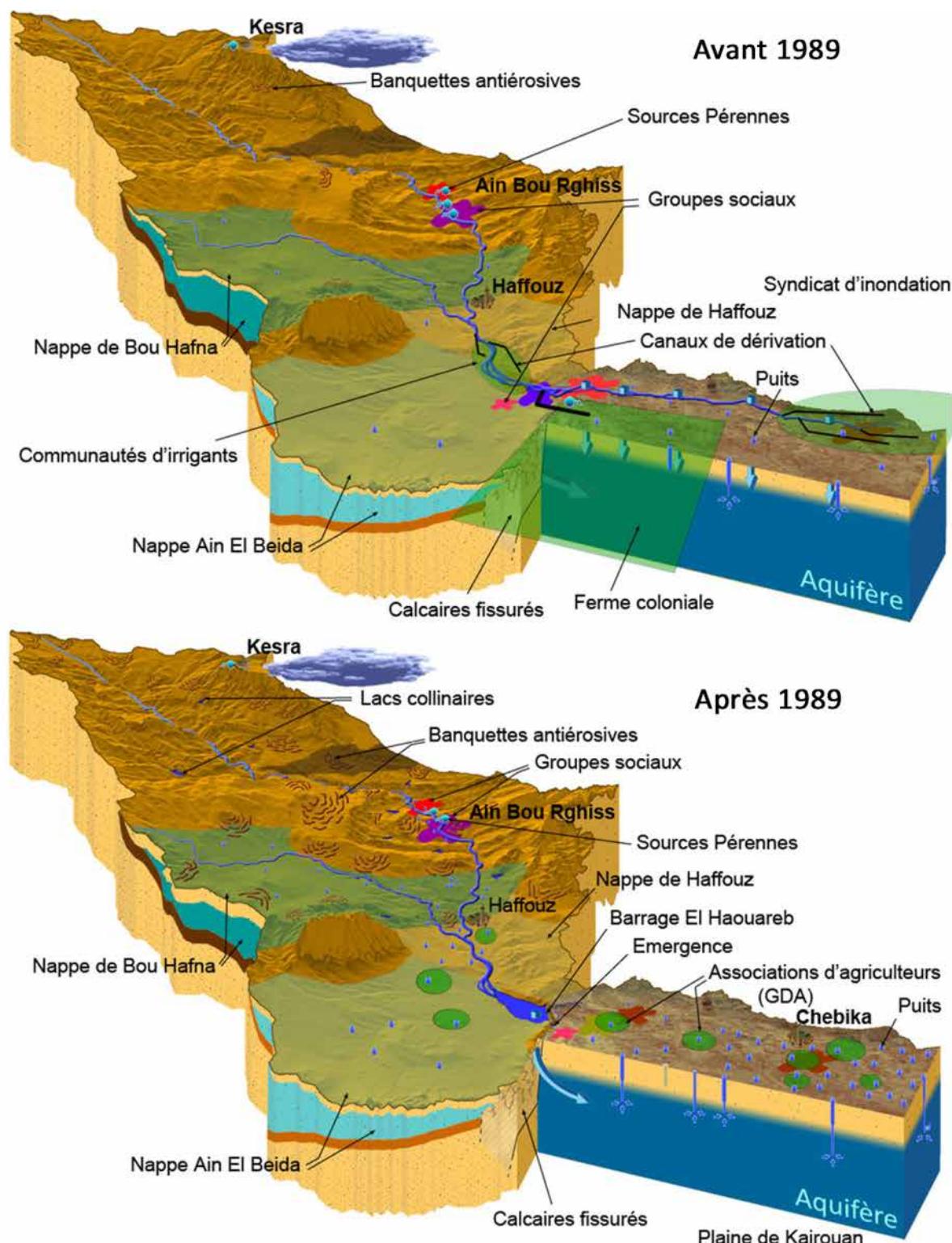


Figure 8 : Représentation partagée des bassins amont et aval de l'Oued Merguellil avant et après la construction du barrage El Haouareb faisant émerger des repères et objets d'observation communs.

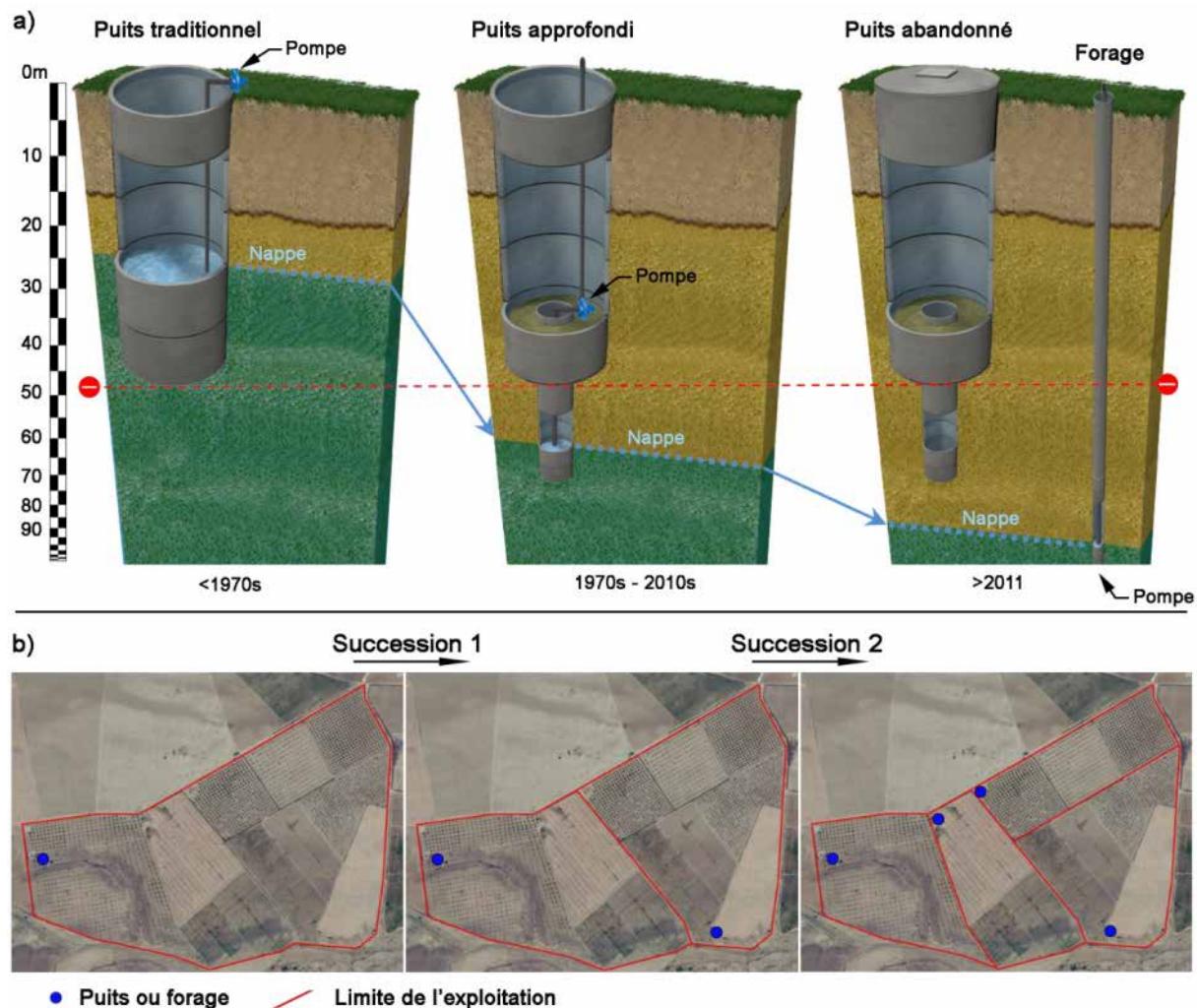


Figure 9 : Dimensions qualitatives des prélevements. a) Evolution des moyens d'exhaure en fonction des contraintes administratives (limite à 50 m), hydrogéologiques (baisse de la nappe) et techniques (approfondissement, forage); b) Illustration de l'évolution des surfaces irriguées par puits. Le processus de transmission des terres par héritage morcelle les exploitations et multiplie le nombre d'ouvrages. La relation entre le nombre de puits et les volumes prélevés s'en trouve modifiée.

### 3.3. Réserve et surexploitation des eaux souterraines

Mes travaux précédents associaient l'estimation des prélevements durables au volume d'eau extrait autorisant la conservation d'un certain stock dans l'aquifère associé à un niveau de nappe stabilisé sur le long terme (Cf. §3.1). Cependant, ce niveau cible à conserver définissant les conditions de la durabilité était fixé arbitrairement ou dépendait plus généralement des contraintes hydrodynamiques de l'aquifère pour l'exploitation souhaitée. Je n'avais pas mené de réflexion sur cette vision de la durabilité au regard d'aspects non hydrologiques ou vis-à-vis des logiques des différents acteurs. Mes recherches réalisées par la suite sur l'aquifère de la plaine de Kairouan allaient alors stimuler cette réflexion en la mettant en perspective avec la notion de surexploitation des eaux souterraines.

Bien que la réserve en eau souterraine de la nappe de la plaine de Kairouan fut assez mal connue, le discours dominant sur la surexploitation des eaux souterraines chez les experts ou dans les différentes arènes politiques suivait le même enchaînement argumentaire depuis plus d'une décennie : une baisse des niveaux de la nappe était observée, il y avait donc un risque de pénurie ; le développement de l'agriculture irriguée en était le principal responsable, une régulation des prélevements souterrains devait donc être mise en œuvre. Les mesures étaient donc logiquement orientées vers la réduction de la demande en eau (goutte-à-goutte, paquet technique) et la maîtrise des prélevements (limitation

des pompages, police de l'eau), mais pourtant sans effets réellement perceptibles après plus d'une décennie (à la fois sur l'économie d'eau et sur la chute des niveaux souterrains).

En considérant les niveaux de la nappe en 2013, la reconstitution de la lithologie et la modélisation 3D de la structure de l'aquifère effectuée dans le cadre du doctorat de H. Jerbi montrait que le stockage en eau souterraine correspondant était d'environ  $18.10^9 \text{ m}^3$  (Jerbi et al., 2018). En 1968, ce stockage était estimé à moins de  $21.10^9 \text{ m}^3$ , soit une perte conséquente de plus de 12% en 45 ans (1968-2013), mais pour autant, loin de l'épuisement imminent (Figure 10). La totalité de cette réserve n'était bien sûr pas mobilisable, mais de nombreux forages profonds (plusieurs centaines de mètres sous le niveau piézométrique actuel) étaient déjà productifs et la qualité de l'eau ne montrait pas de détérioration majeure avec la profondeur. En revanche la distribution spatiale de la réserve était très hétérogène. Les stocks étaient plus importants dans la partie ouest de l'aquifère, dominée par des sables, que dans la partie est, présentant pourtant un mur plus profond (jusqu'à 700 m), mais où l'aquifère devient multicouche et semi-confiné (Figure 10). Contribuant aux travaux de doctorat de M. Alazard (2013) sur le bilan hydrologique du barrage El Haouareb érigé à l'entrée de la plaine en 1989, je démontrais également la disparition de la recharge naturelle s'effectuant auparavant le long des 40 km du lit sableux de l'oued Merguellil et traversant la plaine lors des crues saisonnières (Figure 8). Cette recharge était désormais remplacée par une recharge ponctuelle, circonscrite autour du réservoir et amputée de l'évaporation directe sur le plan d'eau (24% du bilan). La modélisation du devenir des flux infiltrés sous le barrage réalisé au cours du travail de Master 2 d'A. Sebai (Sebai et al., 2017) et l'interprétation des analyses isotopiques ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $^{3}\text{T}$ ) confirmaient des distances d'influence dans la nappe limitées à moins de 10 km. L'hydrogéologie montrait donc une réserve souterraine en baisse constante, mais encore loin de l'épuisement, dont l'origine était partagée entre les prélèvements excessifs et les choix d'aménagements hydrauliques ayant déplacé et potentiellement réduit la recharge souterraine.

Là où mon expertise d'hydrogéologue allait produire de nouvelles recommandations sur les volumes durablement prélevables ou redéfinissait les zones potentiellement épuisées à l'horizon 2050-2100, le partage de mes points de vue avec ceux de J. Riaux orientait dans une toute autre direction les réflexions (Massuel et Riaux, 2017). Nous allions questionner l'origine du discours sur la surexploitation et les autres enjeux de gestion qu'il occultait, car dans ce discours, le phénomène de surexploitation, ses causes et les nécessités d'améliorer la gestion des eaux souterraines étaient toujours positionnés comme point de départ de l'argumentaire. Le phénomène de surexploitation lui-même était présenté comme un fait établi, par ailleurs déjà défini et faisant consensus.

Nous interrogions ensemble dans un premier temps la notion d'équilibre d'une nappe soumise à des flux entrants et sortants. Cet état général (et non simplement local) de la nappe intervient lorsque les flux entrants sont équivalents aux flux sortants de manière à maintenir un stock constant (Cf. §1.1 et §3.1). Ainsi les niveaux piézométriques peuvent fluctuer autour d'un niveau interannuel constant au gré du renouvellement naturel saisonnier. Dans le cas des aquifères libres, la rupture de l'équilibre régional entre les entrées et les sorties entraîne un réajustement des niveaux et de la réserve avec plus ou moins d'inertie et d'amplitude selon les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère. Lorsque le déséquilibre provient d'une exploitation intensive, il devient important de déterminer si la rupture est transitoire ou permanente. Dans le premier cas, les niveaux se réajustent vers un nouvel état d'équilibre et la baisse est temporaire, l'exploitation intervient temporairement en régime de déséquilibre. Dans le deuxième cas, un nouvel état d'équilibre ne sera jamais trouvé et la baisse continuera jusqu'à épuisement de la réserve mobilisable, l'exploitation se fait en régime de déséquilibre permanent et donc excessive. Autrement dit, la chute des niveaux piézométriques observée sur une période donnée n'est pas nécessairement synonyme d'une exploitation excessive. Cependant, du fait du temps parfois très long nécessaire au réajustement vers un nouvel état d'équilibre (plusieurs décennies), l'exploitation temporairement en régime de déséquilibre peut se confondre avec une exploitation excessive, d'autant que sur de telles périodes de temps, de multiples changements peuvent se produire. On comprend dès lors qu'on ne peut pas définir la surexploitation suivant un critère physique clair et universel qui serait la rupture de l'équilibre entre entrées et sorties.

Chaque cas est unique et un prélèvement se fait nécessairement au détriment d'un autre flux. Définir la surexploitation d'une nappe relève donc plutôt de la définition des contraintes à se fixer pour l'exploitation et de la détermination des préjudices acceptables sur une période donnée (Custodio, 2002), sachant que les critères qui définissent ce qui est acceptable évoluent selon les situations et les époques. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas d'un aquifère captif fossile ou isolé et à très faible recharge où le maintien d'un équilibre n'a pas de sens. Les hydrogéologues ne prétendent donc pas tenir le rôle de garants d'une définition consensuelle de la surexploitation des eaux souterraines, qui n'existe tout simplement pas. Cette définition est nécessairement contextuelle puisqu'elle dépend d'un milieu et d'un contexte sociopolitique spécifiques. Notre conclusion était donc qu'un phénomène de baisse piézométrique pouvait faire l'objet de multiples interprétations.

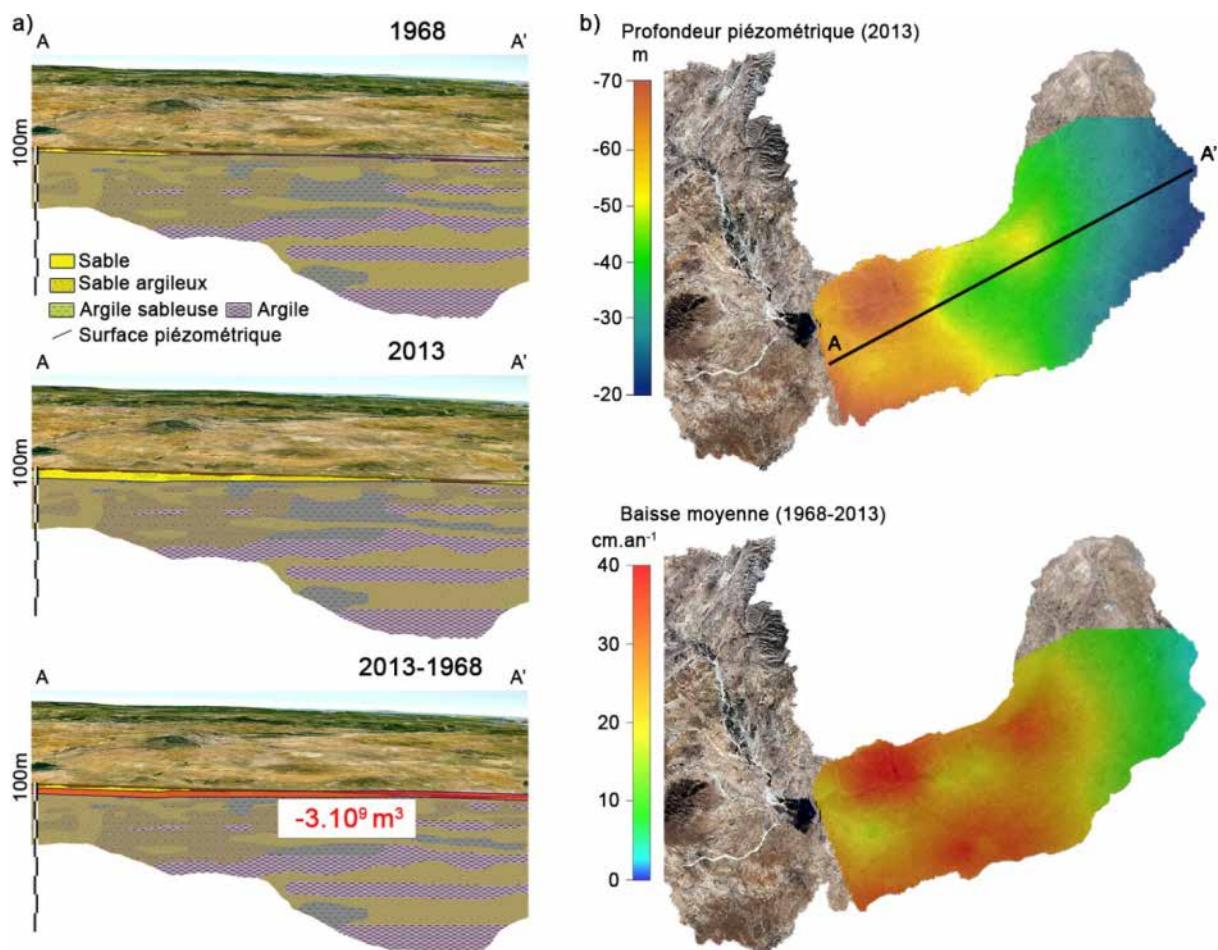


Figure 10 : Structure de l'aquifère de la plaine de Kairouan et évolution de la réserve. a) Coupe hydrogéologique en 1968, 2013, et différence montrant les prélèvements dans la réserve. b) Carte piézométrique de la nappe en 2013 et vitesses de baisse moyenne sur la période 1968-2013.

Depuis une centaine d'années, le bassin du Merguellil a continuellement fait l'objet d'interventions publiques notables qui ont modifié profondément l'hydrologie de la région. Sur le terrain, les agriculteurs de la plaine de Kairouan évoquaient la baisse générale de la nappe qui rendait l'accès à l'eau de plus en plus difficile, et à laquelle ils étaient concrètement confrontés au jour le jour. Selon eux, les rivières souterraines fuyaient et se déplaçaient de manière naturelle comme l'avaient fait les oueds en surface. En revanche, la raréfaction de l'eau et son épuisement tels qu'entendus par le discours de surexploitation n'étaient que très rarement évoqués. Ces agriculteurs avaient l'habitude d'évoluer dans un contexte hydro-climatique changeant, avec parfois des amplitudes fortes. La fuite des eaux souterraines n'était pour beaucoup qu'un aléa supplémentaire. Elle n'était donc pas nécessairement irréversible, et il n'était pas forcément utile d'en déterminer l'origine. D'un point de vue hydrogéologique, il y avait bien une rupture de l'équilibre de la nappe et nos modélisations

s'accordaient à montrer qu'aucune stabilisation n'interviendrait à court ou moyen terme, toutes choses étant égales par ailleurs. Il y avait donc bien une menace d'épuisement de la ressource, mais à un terme relativement incertain. Pour les agriculteurs – dont la plupart ne voyaient toujours pas venir cet épuisement longtemps annoncé, le problème résidait plutôt dans l'accès à l'eau, avec des inquiétudes sur la capacité des petites exploitations à « suivre la baisse de la nappe », donc à assurer leur pérennité sur le territoire. Pour les administrations, le problème se situait plutôt dans le maintien de l'autorité publique et de la capacité des agents à légitimer leur présence sur le territoire. Dans ce contexte, la focalisation du discours de surexploitation sur l'épuisement de la ressource venait à la fois cristalliser des enjeux multiples et occulter les problèmes particuliers de chacun. Le problème de durabilité des ressources était mis en avant comme s'il était partagé par tous, alors que les problèmes vécus par les acteurs de l'eau (administrations, agriculteurs, scientifiques, etc.) restaient en marge ou exclus de la discussion. Une grande variété de problèmes d'ordre social, institutionnel et politique, engendrés – entre autres – par la baisse des niveaux piézométriques, se retrouvaient en réalité dissimulés. Le problème n'était « officiellement » qu'un problème de bilans, de stocks et de flux à rééquilibrer. Ce diagnostic de la situation, essentiellement produit par les « spécialistes », était à l'origine de tous les plans d'action élaborés par les administrations concernées. De fait, les règles et incitations proposées n'étaient pas efficaces ou pas appliquées puisqu'elles allaient à l'encontre des problèmes que chacun essayait de gérer, créant des tensions et des incompréhensions entre les différents acteurs en présence. Il était donc possible d'identifier le véritable sens porté par le discours de surexploitation en interrogeant la construction de la situation en cours et son historique dans un contexte bien défini. Nous pouvions alors déterminer si les problèmes relevaient effectivement des compétences de l'hydrogéologie et dans quelles mesures les apports de connaissances hydrogéologiques pouvaient y apporter des solutions.

En complément, et à titre d'application, les travaux menés sur une section pérenne de l'oued à l'amont, très peu étudiée jusqu'ici, devait nous éclairer sur les mécanismes complexes ayant conduit à la situation de surexploitation observée. Selon les formations géologiques traversées, des alternances de sections drainantes ou infiltrantes étaient observées avec un fort impact sur la distribution spatiale de la disponibilité en eau d'amont en aval du lit de l'oued Merguellil. Il était quasi-assuré que la part des sections infiltrantes était moindre lorsque le niveau général des nappes était plus élevé. C'est ce qu'inspirait l'analyse des différents travaux d'archives et notamment la documentation sur les captages de la nappe de Bou Hafna pour l'alimentation en eau potable de la côte depuis 1899 (Figure 11a).

Nous avons replacé les processus d'échanges à fine échelle entre l'oued et les nappes en lien avec la dynamique d'évolution des sociétés en perspective avec le schéma hydrogéologique global. Ce travail était l'un des objectifs principaux de la thèse de H. Jerbi avec la définition de la géométrie des nappes et la modélisation hydrodynamique des niveaux piézométriques sur la période 1970-2015. Ainsi, une période de rupture dans les années 1970 a été mise en évidence où les changements de pratiques d'irrigation correspondaient à l'inversion des gradients hydrauliques entre la nappe superficielle et l'oued. La nappe qui alimentait autrefois certaines sections de l'oued était désormais alimentée par celui-ci, réduisant d'autant la disponibilité de l'eau en surface. L'histoire montrait qu'après l'indépendance de la Tunisie, l'exploitation de la nappe de Bou Hafna était délibérément excessive, avec un rabattement maîtrisé afin de diminuer l'écoulement de base dans l'oued et le déversement dans les nappes en aval. Une fois le niveau cible atteint pour l'exploitation optimale (-23 m), il était logiquement prévu de réduire les prélèvements afin qu'ils correspondent au débit de la nappe pour ne capter que la ressource. Le rabattement souhaité a été atteint vers 1997, les prélèvements ont alors bien été réduits jusqu'en 2003 et la nappe s'est stabilisée. Cependant, l'exploitation a de nouveau augmenté après 2003 pour faire face à la demande croissante des villes de la côte, entraînant de nouveau des prélèvements sur la réserve et la baisse des niveaux de la nappe (Figure 11b).

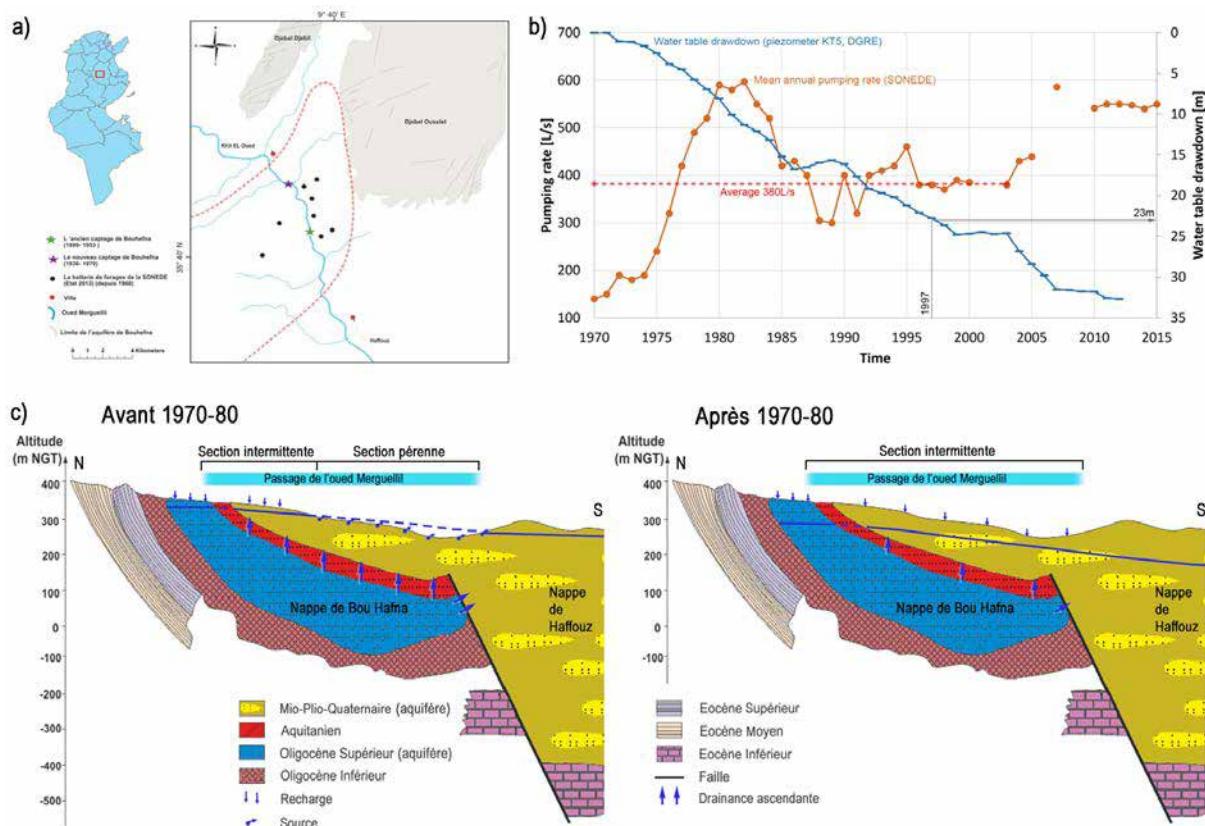


Figure 11 : Captages dans la nappe de Bou Hafna, bassin amont de l’oued Merguellil. a) Situation géographique ; b) Taux de pompage et rabattement de la nappe sur la période 1970-2013 ; c) Coupe hydrogéologique et schématisation des relations oued-nappe, avec inversion du gradient au cours des années 1970s et disparition des sources d’alimentation de la section pérenne de l’oued Merguellil. (D’après Jerbi 2018 et Riaux et al. 2021, modifié).

Les impacts hydrologiques ont été de trois ordres. D’abord, au droit des premiers captages de Bou Hafna, la baisse piézométrique a provoqué localement le tarissement des sources de trop plein et la vidange de la nappe alluviale. Ensuite, la réduction du déversement de la nappe de Bou Hafna vers la nappe de Haffouz a induit la propagation de la baisse piézométrique et le tarissement de dizaines de sources qui alimentaient l’oued et sa nappe alluviale. Enfin, cette baisse généralisée a induit la disparition de l’écoulement de base dans l’ancienne portion pérenne de l’oued (Figure 11c). Ces évolutions constituaient un véritable tournant dans l’histoire hydro-agricole de la zone. Les principales conséquences de cette rupture hydrologique ont été la baisse de productivité des oliviers et la réduction des surfaces occupées par les cultures maraîchères et avec elles l’adaptation des communautés qui se sont tournées vers d’autres pratiques mobilisant les eaux souterraines au lieu de celles de l’oued.

Nous montrions donc que la situation de surexploitation de la nappe de Bou Hafna trouvait son origine dans des choix de gestion passés. Les préjudices causés par la stratégie adoptée d’exploitation de la ressource avaient été jugés tout à fait acceptables en leur temps, mais dans des contextes sociaux, techniques et décisionnels différents. L’exploitation en régime de déséquilibre de la nappe de Bou Hafna avait pourtant eu les répercussions planifiées sur le système aquifère. Ces répercussions avaient cependant causé en retour des changements sur le développement et les pratiques agricoles de la région non anticipés par l’hydrogéologie. Au fil du temps, l’agriculture irriguée en expansion a alors endossé la responsabilité de la baisse des nappes et est donc devenue le levier principal – mais inefficace – des plans d’action de sauvegarde de la ressource. Ce qui avait été jugé acceptable par les experts de la ressource ne l’était plus à une époque où le développement économique de la côte au détriment des régions intérieures devenait un sujet de révolte populaire, ce qui expliquait aussi

pourquoi les tentatives de réduction des pompages individuels pour l'irrigation étaient aussi peu efficaces et donc sans effet sur la reconstitution de la réserve. Cette situation emblématique de coévolutions démontrait parfaitement la présence de mécanismes de modification et de façonnement mutuels entre l'eau et les sociétés.

#### **4. SYNTHESE REFLEXIVE : INTEGRATION INTERDISCIPLINAIRE DES DIMENSIONS SOCIALES DE L'EAU ET ENRICHISSEMENT DISCIPLINAIRE**

##### **4.1. Pratique de l'interdisciplinarité**

La progression méthodologique suivie tout au long de mes travaux de recherche est essentiellement le fruit d'une pratique de l'interdisciplinarité permise par des échanges sur le temps long avec les sciences sociales et notamment avec l'anthropologue J. Riaux. Je conçois ici l'interdisciplinarité au sens adopté par l'HCERES (2019) et définie comme l'identification de « *l'interaction et la coopération de plusieurs disciplines de domaines différents autour d'objets et de projets communs* » et dont « *le rôle des composantes disciplinaires va au-delà de la simple juxtaposition* » avec comme « *marques de cette intégration [...] la création d'un langage commun par hybridation, conduisant à la révision des hypothèses initiales, à la compréhension plus large du problème posé, à l'ouverture de perspectives neuves et à l'élaboration de nouveaux savoirs* ». Je pratique donc une interdisciplinarité tout en restant discipliné, dans le sens où je reste dans ma communauté disciplinaire tout en découvrant ce qui se passe en dehors. En faisant cela, j'espère contribuer à enrichir ma discipline, en modifier les contours ou les cadres conceptuels, pour les faire progresser.

Cette démarche a débuté rapidement après mon arrivée à l'UMR G-EAU, lorsque J. Riaux a rejoint le chantier tunisien pour étudier nos travaux d'hydro(géo)logues. Il s'agissait de présenter le terrain, les objets hydrologiques, les réseaux de mesure et les instruments ainsi que les diverses hypothèses et questions de recherche. Les explications simplifiées avaient cours au jour le jour, poussant les discussions vers toujours plus de complexité. Ce faisant, et bien que plus complexes à révéler, les dimensions sociales, territoriales et politiques de l'eau étaient explorées collectivement à partir de documents d'archives, de cartes anciennes et d'entretiens collectifs sur le terrain et dans les administrations. Progressivement, les perceptions du terrain et la compréhension des pratiques scientifiques de chacun ont évolué et un partage plus approfondi, interdisciplinaire à proprement parler, a débuté. Outre les étapes de clarification du vocabulaire et des concepts indispensables pour lever les divers malentendus de compréhension, la phase la plus créatrice de rapprochements a été le travail de dévoilement de l'arrière-cuisine de chaque discipline. Révéler les fondamentaux des démarches et des méthodes a conduit à une totale transparence qui a contribué à une meilleure compréhension de la posture scientifique et à une sorte de légitimation réciproque en levant certains préjugés. Cela a permis la validation de démarches dont on acceptait de ne pas nécessairement comprendre toute la portée ni l'ensemble des fondements. En retour, des hypothèses implicites et des biais méthodologiques étaient révélés, nous amenant à un décentrement du regard porté sur notre propre démarche. Par ailleurs, ce processus de dialogue a permis de façon progressive de distinguer le champ des possibles portés par l'autre discipline. De nouvelles postures de recherche ont alors émergé, articulant nos deux disciplines.

La pratique du terrain en commun s'est avérée particulièrement utile à la convergence des regards. Au départ délimité et analysé par chacun de nous selon nos filtres disciplinaires, il s'est peu à peu combiné pour former un objet hybride, co-construit, aux limites spatiales et temporelles souvent redéfinies. L'historique des processus hydrogéologiques s'est enrichi de faits sociaux et politiques offerts par les archives tout en apportant une dimension supplémentaire aux unités socio-hydrauliques définies par l'anthropologie à partir des relations entre des groupes sociaux au sein des réseaux d'irrigation. Des objets d'observation et de réflexion en commun sont apparus (objets frontières). D'abord regardés différemment, les ouvrages hydrauliques (puits, canaux, barrages, etc.), les lieux hydrologiques spécifiques (sources, oued, résurgence, ...) ou les acteurs de l'eau (utilisateurs,

gestionnaires, riverains) ont révélé des potentialités méthodologiques porteuses de convergence. Le chapitre d'ouvrage écrit à ce sujet (Riaux et al., 2016) détaillait ainsi quelques exemples : « pour l'hydrogéologue, une source est un moyen de "voir" les eaux souterraines et d'envisager les origines temporelles et géographiques de l'eau. Pour l'anthropologue, cette même source est plutôt le lieu d'implantation d'un groupe social, de mises en œuvre de règles et d'usages bien spécifiques permettant de "voir" les relations que les sociétés entretiennent avec l'eau à un endroit donné ; c'est aussi un objet de narrations qui évoquent les origines de cette ressource et parfois même de ceux qui en ont l'usage. Pour l'hydrologue, les riverains de la source sont avant tout des « utilisateurs » qui impactent les bilans hydrologiques, mais à travers les questions de l'anthropologue, ces « utilisateurs » deviennent des « usagers », déployant des pratiques et des perceptions spécifiques, complexes même, autant de témoins porteurs d'une mémoire, de souvenirs potentiellement mobilisables pour interroger la donnée hydrologique produite. Alors, pour l'anthropologue comme pour l'hydrologue, ces « usagers » deviennent des « acteurs » de l'eau, à la fois producteurs et bénéficiaires de dynamiques environnementales. »

Ainsi est souvent intervenue une négociation entre disciplines sur la description d'un phénomène pour la caractérisation d'un même objet. Chacun de nous contribuait à l'élaboration d'une connaissance issue de la mutualisation d'acquis disciplinaires et de leur transformation pour produire une nouvelle description accessible à l'ensemble de la communauté interdisciplinaire. Cela a naturellement mené à définir de nouvelles questions de recherche allant « *au-delà de la simple juxtaposition* » car puisant dans les deux corpus de connaissance de manière hybridée. L'accès à l'eau face au discours sur la surexploitation de la nappe de Kairouan ou la place des savoirs hydrologiques dans la décision publique sont autant de questions qui n'auraient pas été abordées sans collaborations interdisciplinaires. Une avancée marquante de cette expérience interdisciplinaire a également été de réaliser l'ampleur du déséquilibre en hydro(géo)logie entre l'importance accordée à la formalisation des problèmes de gestion de l'eau et la production de connaissance pour contribuer à les résoudre, généralement décrétée comme nécessaire pourvoyeuse de solutions pour la gestion.

#### 4.2. Du cycle hydrologique aux socio-hydrosystèmes

Le concept de cycle de l'eau – ou de cycle hydrologique – est une représentation du cheminement et des grands changements d'état de l'eau dans l'environnement terrestre, permettant d'en considérer les flux associés (énergie, solutés, sédiments etc.). Les observations de l'eau sous ses différentes phases ne sont pas nouvelles et remontent au moins à l'antiquité, mais l'évocation (Tissandier, 1869 ; d'Andrimont, 1906), puis la reconnaissance du cycle hydrologique sont bien plus récentes et à l'origine de l'établissement de l'hydrologie en tant que discipline scientifique à part entière (Horton, 1931). Le fondement de cette nouvelle discipline s'est appuyé sur la vision d'un cycle naturel selon lequel l'eau s'élève des océans sous l'effet des radiations solaires avant de retourner inéluctablement à ces mêmes océans sous l'action de la gravité au terme d'un périple pouvant parfois s'étaler sur des échelles de temps géologiques. Selon ce concept, le caractère dynamique de l'hydrosphère est donc totalement lié à l'apport d'énergie solaire dans un cycle de changement d'états et de mouvements gravitaires sans fin. Ce concept qui fit consensus en son temps (Linton 2010), a connu une certaine obsolescence à mesure que les activités humaines s'invitaient de manière de plus en plus prégnante dans les bilans hydrologiques supposés « naturels » (c'est-à-dire qui se produisent indépendamment de l'homme). Il est finalement devenu évident que les modifications environnementales et climatiques engendrées par les activités humaines « perturbaient » en tout ou partie les composantes du cycle de l'eau à un point tel qu'aujourd'hui il est difficile d'étudier des hydro-systèmes totalement naturels, sous-entendu non influencés par une quelconque activité humaine ou par ses dérivés. Des représentations du cycle de l'eau tentent de prendre en compte les activités humaines et leurs effets sur certaines composantes (Abbott et al. 2019). Ces représentations incluent l'activité humaine essentiellement sous forme d'infrastructures, déviant, prélevant ou rejetant certains flux ou modifiant l'occupation du sol. Et puisque, par définition, le cycle hydrologique décrit exclusivement des processus dits « naturels », ces activités humaines se situent à l'extérieur, position depuis laquelle elles agissent sur/interagissent avec

les composantes du cycle. En sciences hydrologiques, on parle alors « d'impacts » ou de « perturbations » voire, pour nos modèles, de « forçage » anthropique.

En parallèle, plusieurs initiatives majeures ont été lancées dans la communauté des sciences hydrologiques pour mieux « intégrer » les activités anthropiques et leurs interactions avec les différentes composantes du cycle de l'eau. Parmi elles, la décennie 2013-2022 de l'AISH « Panta Rhei » doit aider à « *soutenir un développement sociétal durable dans un environnement en mutation* » en se concentrant sur « *les systèmes hydrologiques en tant qu'interface changeante entre l'environnement et la société, dont la dynamique est essentielle pour déterminer la sécurité de l'eau, la sécurité humaine et le développement, et pour fixer les priorités de la gestion de l'environnement* » (Montanari et al., 2013). Cette initiative fait suite à la mise en œuvre, selon Sivapalan et al. (2012), des fondements d'une « nouvelle discipline » : la socio-hydrologie (socio-hydrology), dont la vocation est de « *mieux comprendre les dynamiques du cycle hydrologique et soutenir la gestion durable de l'eau* ». Si la nécessité de s'intéresser aux usages de la ressource est apparue évidente depuis de nombreuses années en hydrologie (p.ex. Falkenmark, 1977, 1979), aucun cadre théorique ni aucune approche spécifique pour intégrer les composantes sociales aux dynamiques hydrologiques n'avait été préconisé jusqu'alors. Ainsi, il s'agit désormais de traiter l'humain « *comme endogène au système, non comme une simple condition aux limites* » (Sivapalan & Bloschl, 2015). L'idée est d'abord surtout développée dans le champ de la gestion du risque (inondation et pollution) sous l'influence de la géographie physique (p.ex. Di Baldassare et al., 2013 ; Lane, 2014) puis s'étend à la gestion quantitative, et notamment aux questions de durabilité et de dégradation qualitative des ressources (Re, 2015).

La socio-hydrologie se donne pour objectif de comprendre « *the dynamics and co-evolution of coupled human-water systems.* » (Sivapalan et al., 2012). Ces « systèmes couplés » sont vus, pensés et représentés par la communauté des sciences hydrologiques. Troy et al. (2015) recensent les premiers résultats de ces approches à travers la littérature. Plusieurs auteurs ont commencé à modéliser les systèmes couplés Homme-eau (p.ex. Di Baldassarre et al., 2013, 2015; Srinivasan, 2015; Elshafei et al., 2014; van Emmerik et al., 2014), faisant indéniablement progresser les sciences hydrologiques vers plus de réflexion sur les systèmes complexes. Les aboutissements les plus courants sont la proposition de cadres de modélisation incluant des comportements humains dans des simulations hydrologiques. Suivant les principes de l'approche systémique, l'objectif sous-jacent est d'identifier des tendances comportementales et décisionnelles universelles et donc à la fois modélisables par les modèles hydrologiques et transposables. Ces approches se heurtent cependant à d'importantes limites en matière de représentation des faits sociaux – de nature qualitative, comme le soulignent par exemple Pande et Sivapalan (2016) : « *many social processes such as the evolution of human values, norms, and institutions, which play a critical role in defining the societal feedbacks within the socio-hydrological framework, may require concepts that are difficult to measure* ». En majorité, sont proposées des descriptions simplifiées, limitées à certaines perceptions, ou moteurs de comportements et prises de décision. Ces simplifications des socio-hydrosystèmes réduisent les ambitions à ne proposer qu'un certain nombre de principes généraux ou de recommandations sur les actions à mener et les bonnes pratiques à adopter. Ces recommandations du champ de l'hydrologie ou de l'économie sont adossées à des conceptions techniques et économiques de la rationalisation et de l'optimisation de la gestion (Wesselink et al., 2016) et à l'affirmation de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) comme la solution à tous les problèmes relatifs à l'usage ou à la gestion de l'eau (Molle, 2008; Trottier, 2008). Loucks (2015) s'interroge alors à juste titre sur la divergence entre un « comportement prédictif rationnel » (implicitement hydrologiquement ou économiquement rationnel) et un « comportement effectif réel ».

En miroir du cycle hydrologique, la géographie critique et l'écologie politique travaillent sur le concept de cycle hydrosocial (p.ex. Linton et Budds, 2014; Swyngedouw, 2009). Ce cycle « *décrit les processus qui se produisent en tant que co-production des actions humaines et des processus non-humains (hydrologiques)* » (p.ex. Linton et Budds, 2014). Il représente le processus « socio-naturel » par lequel l'eau et les sociétés se façonnent mutuellement dans l'espace et au cours du temps pour aider à éclairer les politiques de l'eau et l'accès à l'eau, de même que leur évolution. Au-delà des simples

infrastructures ou actions humaines sur l'eau, interviennent les significations données à l'eau, les mécanismes de formation des perceptions, les circonstances politiques et culturelles, l'établissement des droits ou les formes d'appropriations, cela tout en considérant le rôle actif des propriétés physiques de l'eau. Les dimensions physiques de l'eau se combinent avec l'histoire humaine dans une relation en renouvellement permanent.

En parallèle, d'autres communautés épistémiques ont également développé leurs propres cadres de référence. Notons parmi elles l'école de la gestion des biens communs (Ostrom, 1990, 2005), l'étude des systèmes complexes adaptatifs (Miller et Page 2009) ou de la résilience (Walker et al., 2002 ; Folke, 2006; McGinnis and Ostrom 2014). Les publications existantes témoignent du faible niveau d'interactions dans l'utilisation de ces différents cadres qui restent ancrés dans leurs communautés épistémiques proches.

#### 4.3. Contribution à de nouvelles approches pour appréhender les relations eau-sociétés et positionnement scientifique

Les approches ainsi proposées semblent de fait se limiter à une représentation très partielle et donc potentiellement biaisée des phénomènes d'interaction « Homme-eau » ou « eau-sociétés », comme si elles abordaient ces interactions sans se donner les clés pour en comprendre les mécanismes de manière intrinsèque, car amputés de points de vue essentiels à la compréhension fine de ces interactions. Partant de cette analyse, je coordonnais un article réflexif cristallisant les efforts de dialogue interdisciplinaire sur le terrain, engagés depuis plusieurs années au sein de l'UMR et de l'équipe « SocioHydro » (Massuel et al., 2018). Il correspondait à une étape importante de la réflexion sur l'interdisciplinarité élargie (sciences physiques – sciences humaines et sociales), tout en mettant en avant les plus-values disciplinaires vis-à-vis de la communauté des hydro(géo)logues. Nous y défendions l'idée que la recherche d'universalité et le caractère résolument quantitatif et mécaniste des approches développées en socio-hydrologie représentaient une limite à dépasser. En effet, les boucles de rétroactions entre des éléments des socio-hydro-systèmes étudiés sont influencées par un certain nombre de déterminants généralement identifiés *a priori*, et ce, essentiellement par les sciences hydrologiques. Or, au-delà de ces interactions, l'eau et les sociétés se façonnent aussi mutuellement, s'opposant ainsi à la représentation mécaniste des phénomènes. Certains déterminants majeurs d'évolution appartiennent de fait au domaine des sciences sociales, ce qui s'oppose à l'approche hydrocentrée proposée par la socio-hydrologie. A partir de l'expérience interdisciplinaire acquise dans le cadre des recherches conduites en Afrique du Nord, nous proposions une approche complémentaire à la socio-hydrologie. Elle mettait en avant deux particularités : l'ancrage fort sur le terrain et l'acceptation du caractère spécifique du cas d'étude. La construction d'un récit scientifique collectif (narrative) permettait d'identifier et d'appréhender les déterminants, sociaux et environnementaux, qui dominaient l'évolution des systèmes. Puis, par le dialogue interdisciplinaire, entrait en jeu un processus de négociation entre les différents points de vue disciplinaires en présence. Cette forme de négociation sociohydrologique était jugée nécessaire à la représentation équilibrée des phénomènes et donc à la compréhension plus aboutie des problèmes relatifs à l'usage ou à la gestion de l'eau. Dans ce processus, et contrairement à ce que l'on observait souvent en socio-hydrologie, cette approche ne positionnait pas les modèles ni les quantifications au centre de la réflexion. L'ambition était de promouvoir le dialogue entre chercheurs de disciplines différentes, suffisamment compréhensible pour être entendu par les différentes parties-prenantes des recherches, un dialogue remettant en question les idées communément admises dans l'objectif de les dépasser le cas échéant.

Mon positionnement scientifique tend donc désormais vers la cohabitation des différents points de vue par l'intermédiaire de la pratique interdisciplinaire. Pour moi, il n'est pas impératif d'adopter l'ensemble des corpus de connaissances et de méthodologies de toutes les disciplines, mais de faire en sorte qu'elles puissent coexister et se rendre complémentaires quand la situation l'exige. C'est ce dernier point qui mobilise mon attention et guide mes activités de recherche les plus récentes. Il ne

s'agit pas de prôner l'intégration forcée (par l'adoption de valeurs et de normes), mais bien de favoriser les échanges continus entre les différentes communautés pour créer des passages et faire en sorte que les regards « experts » puissent trouver un intérêt à se rencontrer et produire des représentations plus holistiques des systèmes étudiés, et donc potentiellement une manière plus profitable de poser les problèmes et les questions de recherche eau-sociétés.

---

## PARTIE 3 - PROJET DE RECHERCHE : EVOLUTION DES RESERVES EN EAU SOUTERRAINE ET COEVOLUTIONS EAU-SOCIETES

---

### *1 - CONTEXTE, ENJEUX ET OBJECTIFS*

Après mon arrivée à l'IRD en 2011, je me suis attaché à comprendre les processus d'interactions avec les réserves souterraines sur le chantier tunisien de l'UMR G-EAU. Depuis 2017 et pour les années à venir, mon intérêt principal se porte désormais sur l'Asie du Sud Est (ASE). Zone de deltas extrêmement peuplés et dynamiques, l'ASE représente un intérêt certain pour le suivi de l'évolution des ressources en eau en prise à de multiples interactions et changements. Parmi les pays de l'ASE, le Cambodge est celui au plus faible revenu et il affiche relativement peu de collaborations scientifiques internationales. Surtout, les grandes mutations accompagnant la forte croissance économique actuelle sont très récentes. Le gouvernement cambodgien s'est récemment doté d'une « Vision 2050 » stratégique incluant en priorité la santé, le développement agricole et l'éducation. Un Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (NAPA) avec l'appui des Nations Unies souligne l'importance de développer une politique et des mécanismes d'atténuation des impacts environnementaux. En comparaison avec le Maghreb dont le développement économique repose sur une exploitation minière des eaux souterraines débutée il y a près de 40 ans, le Cambodge représente une opportunité pour étudier l'évolution des ressources en eau souterraine à une période charnière pour les choix de gestion, dans une région où le régime de mousson comporte paradoxalement de fortes similitudes avec les régimes semi-arides et méditerranéens.

#### 1.1 - Evolution des plaines inondables

Les plaines d'inondation du delta du Mékong au Cambodge (haut delta du Mékong) sont le siège depuis peu d'un développement agricole intense, plus que jamais enjeu économique national. La mise en valeur de ces territoires se fait traditionnellement par des centaines de canaux en terre datant de l'époque coloniale (preks) creusés perpendiculairement au lit du fleuve et établissant une connexion avec la plaine d'inondation. Ces preks occupent plusieurs fonctions en lien avec l'irrigation au cours de l'année hydrologique. Lors de la période de mousson et de crue du Mékong (juillet à novembre), ils détournent une partie de l'écoulement et des sédiments pour inonder et fertiliser la plaine (Figure 12). L'accumulation des sédiments depuis plus d'une centaine d'années a progressivement surélevé les zones les plus proches du fleuve créant des terres non inondables et cultivables toute l'année. A la fin de la mousson, les preks participent à la décrue en drainant les eaux de la plaine et permettant la mise en culture des terres nouvellement émergées pour la production de riz. En saison sèche, les preks peuvent pour certains constituer une réserve en eau mobilisable pour démarrer un nouveau cycle de culture de riz ou de légumes avant l'arrivée de la mousson suivante. Cette dynamique d'inondation rythme et conditionne les activités agricoles de la région. Cependant, la construction de barrages hydroélectriques à l'amont du Mékong ainsi que les effets du changement climatique sur les précipitations sur le bassin affectent le régime hydrologique du fleuve. Parallèlement, les agences de développement investissent dans le secteur de l'irrigation et notamment dans les systèmes de preks dans la zone Bassac-Mékong au sud de Phnom Penh. Depuis 2014, l'AFD finance ainsi le Ministère des Ressources en eau et de la Météorologie pour réhabiliter plus de 25 preks. L'objectif de l'AFD est d'atteindre 65 preks réhabilités d'ici 2025 dans cette zone. Cela signifie essentiellement le surcreusement de ces canaux en terre, l'aménagement des berges et l'installation d'une vanne à l'entrée permettant le contrôle des flux entrants et sortants. Ces investissements sont réalisés sans aucune connaissance des impacts environnementaux et interrogent donc la durabilité de ces changements profonds. L'intensification agricole s'accompagne d'un recours croissant aux pesticides dont l'utilisation n'était qu'anecdotique il y a 15 ans. Avec l'augmentation de la disponibilité en eau, les pompages dans les canaux se multiplient pour irriguer plus de surfaces avec jusqu'à trois cycles de

cultures par an et créant ainsi des circulations de flux artificielles entre les parcelles inondées et les canaux par retour d'eau d'irrigation.

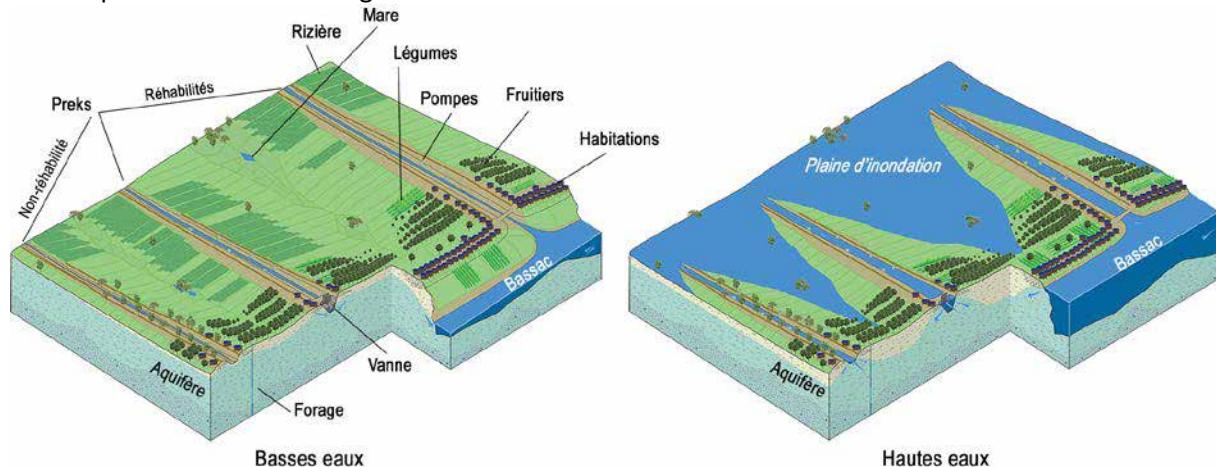


Figure 12 : Schéma conceptuel du système des preks dans la zone du fleuve Bassac, défluent du Mékong au Cambodge.

L'approfondissement des preks de plusieurs mètres permet plus de stockage, mais aussi crée de potentielles connexions avec les nappes. Les niveaux des nappes sont peu profonds et régulièrement en opposition de phase avec les niveaux en surface du fait de l'inertie des écoulements dans les aquifères. Les niveaux souterrains sont maximaux en début de saison sèche après diffusion de la recharge de mousson, alors que la surface est déjà en basses eaux. Cela signifie que les nappes peuvent alimenter les canaux et le fleuve en saison sèche et que l'inverse peut aussi se produire lors de la mousson (Richards et al., 2019). La création de nouvelles connexions preks-nappes pourrait engendrer le recyclage de contaminants entre la surface et le souterrain. Les eaux des nappes sont plus salées et peuvent contenir de fortes teneurs en arsenic. Les eaux drainées depuis la surface peuvent quant à elles avoir lessivé les parcelles potentiellement sources de contaminants agricoles, parfois extrêmement persistants dans l'eau. Ce phénomène de recyclage pourrait donc prendre de l'ampleur avec le développement des preks, alors qu'actuellement semble dominer un effet de chasse, provoqué par la décrue des eaux de surface en quelques semaines vers l'aval. D'un point de vue lithologique, le système de dépôt fluviatile est à l'origine d'une forte hétérogénéité spatiale des sédiments argilo-sableux qui confère une forte variabilité des propriétés hydrodynamiques aux aquifères par ailleurs très mal connues. Dans le cas de la présence de nappes superficielles localisées (perchées), se pose la question de l'accumulation et du recyclage des contaminants agricoles. Dans le cas du drainage de nappes profondes plus anciennes et semi-captives, l'expérience montre que la priorité est d'étudier la mobilisation et la dégradation de la qualité d'une réserve potentiellement non renouvelable, actuellement utilisée par certains agriculteurs pour l'irrigation complémentaire. Nos premières investigations concluent également à un besoin d'accompagnement dans la planification des aménagements sur l'ensemble de la région, mais aussi dans la gestion locale des infrastructures une fois construites. Nous anticipons que l'augmentation du contrôle des eaux entrantes et sortantes de la plaine d'inondation combinée au changement de régime hydrologique du Mékong aura un impact notable sur les dynamiques d'inondations saisonnières. La modification des mouvements de montée et de récession des eaux, ainsi que de la durée des périodes de submersion impliquera potentiellement à son tour un changement des pratiques d'irrigation, de la biodiversité ou de l'exposition aux risques sanitaires et hydrologiques. Une meilleure compréhension de la dynamique des transferts entre les eaux souterraines et les eaux de surface, ainsi que leur évolution conjointe avec les politiques de réhabilitation des preks et les nouvelles organisations de gestion, permettra de mieux appréhender les liens entre activités de réhabilitation et durabilité de la ressource en eau.

### 1.2 - Les changements dans la zone côtière

La zone littorale du Cambodge occupe une position stratégique en Asie du Sud-Est. Souvent appelée "Corridor Economique du Sud", elle est aussi désormais sur la nouvelle route de la soie (Figure 13). La

forte croissance économique qu'a connu cette région au cours de la dernière décennie a été stimulée par les investissements massifs de la Chine sur des Zones Economiques Spéciales aux règles d'investissement avantageuses. De nouveaux plans stratégiques nationaux sont successivement mis en œuvre pour soutenir le développement urbain, l'imperméabilisation et la déforestation des terres, l'augmentation de l'activité industrielle polluante, énergivore et consommatrice d'eau et le développement du tourisme qui pèsent lourdement sur les ressources continentales en eau douce, en plus de la variabilité et des changements climatiques régionaux. Ceci, sans tenir compte des effets combinés sur les ressources en eau et la population, prenant le risque de promouvoir un modèle de développement profondément non durable en rompant l'équilibre délicat des environnements côtiers. Les eaux souterraines sont particulièrement sollicitées par les ménages qui ont de plus en plus recours aux forages individuels pour contrebalancer le réseau de distribution sous-dimensionné et encore en développement qui mobilise l'ensemble des eaux de surface. Il n'existe actuellement pas de réseaux d'observation de l'environnement dans ces zones ni réellement de savoir-faire local dans ce domaine ce qui nécessite une montée en capacité des étudiants, des experts et des gestionnaires. Très peu de données sont disponibles, de qualité et de représentativité variable, et ce manque d'information empêche toute évaluation de la situation et de son évolution potentielle, notamment pour les eaux souterraines. Les aquifères et les réserves sont mal connus et la proximité de la mer fait planer le risque d'intrusions marines souterraines. En surface, le développement de périphéries irriguées poldérisés semble connaître les premiers effets de la hausse du niveau marin avec déjà des terres contaminées par des intrusions d'eau de mer en surface. La mobilisation des eaux de surface, l'augmentation des prélèvements souterrains et le changement d'occupation du sol se produisent actuellement à un rythme effréné. Cela préside de conséquences notables à court terme sur les ressources en eau et leurs usages, mais plus généralement sur l'environnement, l'érosion des côtes et de la biodiversité à la fois sur la zone continentale et marine.



Figure 13 : Situation géographique de la zone de Sihanoukville et sites d'étude de la JEAI 4CWATER.

Le manque de connaissances et d'études sur le sujet est une préoccupation de plus en plus exprimée par le Ministère des Ressources en Eau et de la Météorologie mais aussi le Ministère de l'Environnement craignant des conséquences sur le foncier (recul du trait de côte) et le Ministère de l'Agriculture des Forêts et de la Pêche craignant des conséquences sur la biodiversité marine du fait de la forte dépendance sociale et économique aux filières halieutiques.

## 2 - EVOLUTION DES RESERVES EN EAU SOUTERRAINE ET COEVOLUTIONS EAU-SOCIETES EN ASIE DU SUD EST

### 2.1 - Objectifs scientifiques et méthodologiques

Issus de l'analyse des enjeux identifiés au Cambodge, les objectifs principaux de mon projet sont 1) d'acquérir des données et produire des connaissances majeures sur les processus d'échange entre la surface et le souterrain, 2) de développer des approches interdisciplinaires dans un nouveau contexte aux interactions multiples incluant une composante sanitaire et 3) mettre en œuvre des moyens de surveillance et de caractérisation de la réserve en eau souterraine dans un contexte de développement intense et rapide de la zone côtière. Pour satisfaire ces objectifs, je décline mes travaux en deux volets principaux. Le premier vise à caractériser le rôle des réserves souterraines dans la dynamique d'inondation des plaines alluviales du haut delta du Mékong et le second se focalise sur l'évolution de la ressource en eau dans les petits bassins côtiers du Cambodge. Le développement des approches interdisciplinaires se poursuit transversalement à ces deux volets, toujours avec les sciences sociales, mais aussi les sciences de la santé.

Le pari méthodologique se porte cette fois non plus sur la capacité de reconstituer des historiques longs de l'exploitation des ressources emprunte de changements complexes, mais d'investiguer et comparer les processus en jeu dans des socio-hydrosystèmes en proie à des changements en cours ou très récents. Ainsi les leçons tirées des expériences acquises sur les chantiers d'Afrique du Nord – non plus comme des prédictions de modèles mais comme des faits et mécanismes avérés – pourraient se révéler décisives pour éclairer les choix de gestion.

### 2.2 - Expliquer les processus hydro(géo)logiques de la plaine inondable du Bassac et établir les liens avec les pratiques agricoles et l'exposome

Ce volet de mon projet contribue à une ambition scientifique globale sur la zone qui est de déterminer en quoi et comment les modifications du régime des inondations des fleuves affectent la distribution des polluants et entraînent des changements dans la biodiversité des agents pathogènes et des vecteurs de maladies liées à l'eau, avec in fine des effets sur la santé, la production agricole et l'environnement.

Il s'agit de mettre en évidence et d'expliquer les mécanismes d'échange entre les différentes composantes du cycle hydrologique (fleuve, canaux, nappes, eaux libres), en tenant compte de la composante sociale de l'eau (histoire des ouvrages hydrauliques, politiques de développement, rapports à la ressource, pratiques et gestion de l'irrigation etc.). Un dispositif d'observation environnemental sur un site pilote situé entre Phnom Penh et la frontière vietnamienne est mis en place avec les partenaires de l'ITC sous l'égide du Ministère des Ressources en eau et de la Météorologie. Ce dispositif permet, par l'acquisition de séries de données, de comprendre et modéliser la circulation des eaux en surface et les interactions avec le souterrain et de quantifier les flux en fonction des conditions climatiques et des niveaux des fleuves (thèse de C. Orieschnig, que je co-encadre, AgroParisTech, soutenance en 2022). Il complète les 30 ans de mesure du niveau du Bassac (MRC<sup>29</sup>) et repose sur la réalisation de piézomètres, l'installation d'un réseau de mesure intensif des paramètres physiques du milieu complété par un dispositif de piézomètres à pointes filtrantes permettant l'échantillonnage géochimique pour le traçage de la recharge et des échanges entre la nappe et les canaux (P. Baudron ; IRD G-EAU). La géométrie et la structure des aquifères attendue comme très hétérogène sera investiguée par des méthodes hydrogéophysiques dont la conduite est facilitée par la collaboration avec le LMI LECZ-CARE<sup>30</sup>. Le PSF<sup>31</sup> HGP-Mékong financé sur 3 ans, que je coordonne avec M. Descloires, forme les partenaires à ces méthodes au Cambodge et au Vietnam avec l'échange prévu de matériel de tomographie électrique et électromagnétique. Les besoins de

<sup>29</sup> Mekong River Commission, organisation inter-gouvernementale pour la promotion et l'aide à la gestion des eaux du fleuve Mékong

<sup>30</sup> Centre asiatique de recherches sur l'eau - Low Elevation Coastal zone in south of vietnam, Analysis of water Resources and Evolutions

<sup>31</sup> Projets structurants de formation au Sud

connaissances topographiques fines sont satisfaits par le traitement de produits satellitaires et d'images aéroportées basse altitude (SfM). Le lien avec les logiques d'aménagement et les pratiques agricoles mobilise des approches SHS (Enquêtes, jeux de rôle etc.). Ce lien est identifié et investigué en collaboration avec une anthropologue du CNE<sup>32</sup> (E. Bureau-Point), les partenaires de l'URA<sup>33</sup> et les collègues de l'UMR G-Eau (J-P. Venot). Le lien avec l'exosome est réalisé en collaboration avec les laboratoires de l'IPC<sup>34</sup>, les chercheurs des UMRs MIVEGEC (aléas) et Espace-Dev (exposition) impliqués dans le projet Wat-Health que je coordonne (FSPI 2021). Le site expérimental sert également de site de formation pour les étudiants de l'ITC avec des sorties collectives et pour les projets de fin d'étude. Nous cherchons en hydrogéologie à établir le rôle joué par les eaux souterraines dans les dynamiques d'inondation et comment ce rôle pourrait être affecté par les changements observés et à venir. D'un point de vue opérationnel, les résultats devraient contribuer à l'élaboration du schéma directeur d'aménagement prévu dans le cadre du projet WAT4CAM<sup>35</sup>. Les outils mis en œuvre, comme les jeux sérieux, pourront être adaptés pour discuter de différents scénarios de développement avec les décideurs et les équipes techniques impliquées dans WAT4CAM. Se greffe également une volonté de renforcer les capacités de recherche cambodgiennes et les partenariats existants, notamment à travers l'apport d'outils méthodologiques, d'équipements et de nouvelles compétences analytiques, ainsi que de nouvelles approches interdisciplinaires autour de multiples thématiques imbriquées.

### 2.3 - Evolution des réserves en eau souterraine dans la zone côtière de Sihanoukville

Ce deuxième volet doit combler le manque de connaissances sur les impacts des projets de développement sur les ressources en eau dans les zones côtières du Cambodge, car aucune étude approfondie n'a jamais été réalisée alors que des effets commencent à être visibles. En outre, la gestion des ressources en eau dans la région côtière est principalement axée sur les eaux de surface. La mobilisation des eaux souterraines est d'initiative individuelle, en croissance et son ampleur mal connue. Le site pilote de la région de Sihanoukville dans la province de Preah Sihanouk est progressivement instrumenté pour permettre un diagnostic préliminaire de l'état des ressources en eau de surface et souterraine afin d'identifier leur vulnérabilité face à l'exploitation, à l'intrusion d'eau de mer ou au déversement de polluants. L'innovation méthodologique de ce volet réside dans le développement d'un réseau de surveillance participatif de la salinité des eaux souterraines par les utilisateurs eux-mêmes au moyen d'instruments simples et peu onéreux. L'idée est de compenser l'éventuelle perte de précision par l'augmentation de la densité et de la fréquence des mesures. L'usage omniprésent des smartphones permet aujourd'hui d'envisager des méthodes de collecte des mesures à distance à l'aide d'applications dédiées qui peuvent être développées et gérées à l'ITC. Ce réseau expérimental sera testé en comparaison avec le réseau de mesure traditionnel pour en estimer l'efficience et éventuellement l'expansion à des zones plus vastes.

Les résultats attendus de ce volet initié par la JEAI 4CWATER que je coordonne avec R. Doung (ITC), concernent essentiellement les gestionnaires. L'entreprise ANCO<sup>36</sup> qui est en charge de la distribution en eau potable de la ville vient d'établir un partenariat avec l'ITC pour aider à mieux gérer ses barrages sur la base du suivi des ressources et nous donne en échange accès à ses sites de production. Le Ministère de l'Environnement, encouragé par les premiers résultats de la JEAI, soutient la création d'un « Cambodian Coastal Research Centre », dont les contours sont en cours de discussion. Un atelier tenu en décembre 2021 a défini les bases d'un consortium réunissant des partenaires nationaux et internationaux prêts à s'investir dans l'initiative. Le centre devrait s'intéresser aux changements continentaux et marins et fera appel à l'expertise internationale pour permettre aux futurs chercheurs cambodgiens (donc les actuels étudiants) d'acquérir les compétences nécessaires sur la thématique

<sup>32</sup> Centre Nobert Elias

<sup>33</sup> Université Royale d'Agriculture, Phnom Penh

<sup>34</sup> Institut Pasteur du Cambodge

<sup>35</sup> Water Resources Management and Agro-ecological Transition for Cambodia, programme de réhabilitation des preks EU-AFD

<sup>36</sup> Anco Water Supply Co.Ltd, Sihanoukville

marine côtière actuellement inexiste. Le LMI LOTUS<sup>37</sup> à l'USTH<sup>38</sup>, associé au master WEO<sup>39</sup> (monté par S. Ouillon) formerait la première brique d'un réseau de formation régional avec également Chulalongkorn University en Thailande et University of the Philippines. Le Global Green Growth Institute souhaite également soutenir cette initiative de même que l'ONG Marine Conservation Cambodia.

#### 2.4 - Construction interdisciplinaire

Dans la lignée des réflexions sociohydrologiques en cours au sein de l'UMR G-EAU, je consolide ma pratique de l'interdisciplinarité, certes moins poussée qu'en Tunisie, mais qui a l'avantage de se dérouler dans un contexte plus opérationnel et diversifié. Les enjeux de développement d'approches alternatives sont immédiats, à la fois pour la montée en capacité des chercheurs locaux – peu habitués à ce genre d'approches – et pour répondre à certaines questions pratiques d'ingénierie de l'irrigation dans le cadre des aménagements des plaines inondables. Je contribue actuellement à la formalisation d'une approche alternative de la représentation des systèmes sociohydrologiques dont J-P. Venot (G-EAU, géographe social) a commencé à poser les bases dans une réponse à un éditorial de la revue *Nature Sustainability* (Venot et al., 2022). Notre co-encadrement de la thèse de C. Orieschnig dirigée par G. Belaud (G-EAU, hydraulicien) est une opportunité de travailler sur une représentation plurielle du système des preks. Nous comprenons que le processus de négociation sociohydrologique (Massuel et al., 2018) ne doit pas nécessairement aboutir à un consensus autour d'une représentation partagée. Au contraire, faire en sorte que de multiples représentations partielles coexistent de manière cohérente et puissent s'articuler au gré des questions traitées permet de conserver une certaine richesse des regards que la négociation a tendance à atténuer par la marginalisation ou l'exclusion. Cette réflexion en cours bénéficie des dynamiques de projets, notamment autour d'objets frontières (comme les pesticides ou les conditions hydriques) qui favorisent la co-production de connaissances entre humanités environnementales, sciences de la santé et hydrologiques. De nouvelles questions de recherche émergent, comme la prise en compte du faciès chimique des eaux (déterminé par ailleurs en hydrogéologie dans un objectif de traçage de l'origine des eaux) dans la compréhension des processus de prolifération de Burkholderia<sup>40</sup>.

Je compte promouvoir cette démarche dans le cadre de la mise en place des axes thématiques transversaux de l'UMR G-EAU qui « visent à une valorisation scientifique collective et à une mise en visibilité de l'expertise interdisciplinaire de l'UMR », notamment au sein de l'Axe 3 « Information, incertitude et décisions » que je coordonne. Les questions sur les formes de représentation dans la compréhension des systèmes ainsi que sur la transmission de l'information et des différentes formes de savoir y sont très présentes, ce qui devrait participer à alimenter nos réflexions.

### 3 - MOYENS ET PARTENARIATS

Mon projet repose désormais sur un partenariat solide avec l'ITC que je continue d'étendre. Très lié à la formation, il complète un réseau de collaboration existant avec l'IPC et l'URA. Le projet s'appuie sur des financements de l'AFD en cours, COSTEA<sup>41</sup> (100 k€ 2019-2023), Master Water & Sanitation à l'ITC (1 M€), et à venir, AFRICAM (1 M€ volet recherche ASE – Prezode 2022-2025) ; des financements du MEAE, Wat-Health (600 k€ FSPI 2021-2022 que je coordonne) ; des financements européens pour la formation (80 k€, Erasmus+ InowAsia), des financements de l'AIEA (20 k€ Groundwater contribution to Rivers) sur les chantiers Vietnam et Cambodge, et les outils de partenariat structurants de l'IRD,

<sup>37</sup> Laboratoire Mixte International Land-Ocean-aTmosphere coUpled System, lotus.usth.edu.vn,

<sup>38</sup> Université des Sciences et Technologies de Hanoi, Vietnam

<sup>39</sup> Water Environment Oceanography

<sup>40</sup> Agents pathogènes responsables de la mélioïdose (pneumonie), capables de survivre pendant des périodes prolongées dans des environnements humides et présents dans l'eau et les sols de la zone d'étude

<sup>41</sup> COSTEA - Action Structurante Zones Inondables ; AFD/AFEID

comme les JEAI 4CWATER et Healthy Rice<sup>42</sup>, le LMI LECZ-CARE le LMI DRISA<sup>43</sup> et le PSF HGP-Mékong. Les réponses aux appels d'offres de mes partenaires cambodgiens que je soutiens commencent également à porter leurs fruits avec un financement CCCA3<sup>44</sup> (220k€ CLID<sup>45</sup>, 2021-2023). Des financements ANR sont aussi sollicités chaque année ainsi que des bourses d'échanges internationaux.

---

<sup>42</sup> Sustainable Rice Production within an Agroecology Framework

<sup>43</sup> Laboratoire Mixte International - "Drug Resistance in South East Asia"

<sup>44</sup> Cambodia Climate Change alliance phase 3

<sup>45</sup> Improving Capacity on Integrated Coastal Management - Cambodia Climate Change Alliance

## REFERENCES

- Abbott, B.W., Bishop, K., Zarnetske, J.P., Minaudo, C., Chapin, F.S., Krause, S., Hannah, D.M., Conner, L., Ellison, D., Godsey, S.E., Plont, S., Marçais, J., Kolbe, T., Huebner, A., Frei, R.J., Hampton, T., Gu, S., Buhman, M., Sara Sayedi, S., Ursache, O., Chapin, M., Henderson, K.D. and Pinay, G. 2019. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience* 12(7), 533-540.
- Ahmad, M.D., Bastiaanssen, W.G.M., Feddes, R.A. 2005. A new technique to estimate net groundwater use across large irrigated areas by combining remote sensing and water balance approaches, Rechna Doab, Pakistan. *Hydrogeology Journal* 13, 653-664.
- Aires, F., Venot, J.P., Massuel, S., Gratiot, N., Pham-Duc, B. and Prigent, C. 2020. Surface Water Evolution (2001-2017) at the Cambodia/Vietnam Border in the Upper Mekong Delta Using Satellite MODIS Observations. *Remote Sensing* 12(5).
- Alazard, M. 2013. Étude des relations surface - souterrain du système aquifère d'El Haouareb (Tunisie centrale) sous contraintes climatiques et anthropiques. Thèse de doctorat, UM II. 262 p.
- Bazzaz, F. and Sombroek, W. 1996. Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes. John Wiley, FAO, Rome, Italy.
- Boucher, M., Favreau, G., Nazoumou, Y., Cappaerae, B., Massuel, S. and Legchenko, A. 2012. Constraining groundwater modeling with magnetic resonance soundings. *Ground Water* 50(5), 775-784.
- Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, S.S and Cooper H.H 1982. The water budget myth. In *Scientific Basis of Water Resource Management, Studies in Geophysics*, 51-57. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Bredehoeft, J.D. 2002. The water budget myth Revisited: Why Hydrogeologists Model. *GroundWater* 40, 340-345.
- Cappaerae, B., Vieux, B. E., Peugeot, C., Maia, A., Seguis, L. 2003. Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger, Africa. 2. Model calibration and uncertainty characterization. *Journal of Hydrology* 279, 244-261.
- Castany, G. 1968. Prospection et exploitation des eaux souterraines. Paris, Dunod.
- Castany, G. and Margat, J. 1977. Dictionnaire français d'hydrogéologie, BRGM Service géologique national, Orléans, 249 p.
- CGIAR 2010. Annual Report 2010, Science for a food secure future, 20 p.
- Collard, A.-L., Riaux, J., Massuel, S., Raissi, M. and Burte, J. 2015. Et si on faisait comme ceux de la Plaine ? » Aspirations et limites d'une petite agriculture dynamique en Tunisie Centrale. *Cahiers d'agriculture* 24(6), 335-341.
- Custodio, E. 2002. Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal* 10, 254-277.
- d'Andrimont, R. 1906. La science hydrologique. Ses méthodes, ses récents progrès, ses applications. Ed. Ch. Béranger, Paris, Liège, 116 p.
- Descloitres, M., Ribolzi, O., Le Troquer, Y, 2003. Study of infiltration in a gully erosion sahelian area using time-lapse electrical resistivity mapping. *CATENA* 53, 229-253.
- Descroix, L., Mahe, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J.C., Albergel, J., Amogu, O., Cappaerae, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I. and Sighomnou, D. 2009. Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology* 375(1-2), 90-102.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C., Krishnamurthy, N.S. 2006. A generalized hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology* 330, 260-284.

- Dewandel, B., Perrin, J., Ahmed, S., Aulong, S., Hrkal, Z., Lachassagne, P., Samad, M. and Massuel, S. 2010. Development of a tool for managing groundwater resources in semi-arid hard rock regions: application to a rural watershed in South India. *Hydrological Processes* 24(19), 2784-2797.
- Di Baldassarre, G., A. Viglione, G. Carr, L. Kuil, J. L. Salinas, and G. Bloschl (2013), Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3295-3303.
- Di Baldassarre, G., A. Viglione, G. Carr, L. Kuil, K. Yan, L. Brandimarte, and G. Bloschl (2015), DebatesPerspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes, *Water Resour. Res.*, 51(6), 4770-4781.
- Downing, J.A. 2010. Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot. *Limnetica* 29(1), 9-23.
- Elshafei, Y., J. Z. Coletti, M. Sivapalan, and M. R. Hipsey (2015), A model of the socio-hydrologic dynamics in a semiarid catchment: Isolating feedbacks in the coupled human-hydrology system, *Water Resour. Res.*, 51(8), 6442-6471.
- Falkenmark, M. (1977), Water and mankind - a complex system of mutual interaction, *Ambio*, 6(1), 3-9.
- Falkenmark, M. (1979), Main problems of water use and transfer of technology, *GeoJournal*, 3(5), 435-443.
- Favreau, G., Leduc, C., Marlin, C., and Guéro, A. 2002. A rising piezometric depression in the Sahel (southwestern Niger). *C. R. Geoscience* 334, 395-401.
- Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boulain, N., Boucher, M. and Leduc, C. 2009. Land clearing, climate variability and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resour. Res.* 45, W00A16, doi:10.1029/2007WR006785.
- Finco, C., Pontoreau, C., Schamper, C., Massuel, S., Hovhannessian, G. and Rejiba, F. 2018. Time domain electromagnetic imaging of a clayey confining bed in a brackish environment: a case study in the Kairouan Plain Aquifer (Kelbia salt lake, Tunisia). *Hydrological Processes* 32(26), 3954-3965.
- Folke, C. (2006), Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16, 253-267.
- George, B.A., Malano, H.M., Davidson, B., Hellegers, P., Bharati, L. and Massuel, S. 2011a. An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies I: Model development. *Agricultural Water Management* 98(5), 733-746.
- George, B.A., Malano, H.M., Davidson, B., Hellegers, P., Bharati, L. and Massuel, S. 2011b. An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies II: Scenario assessment. *Agricultural Water Management* 98(5), 747-758.
- GIEC, 2022. Sixth Assessment Report, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, the Working Group II contribution.
- Handbook of Statistics 1989 to 2004, Andhra Pradesh, India.
- HCERES 2019. Rapport d'activité 2019 du Hcéres.
- Healy, R.W. and Cook, P.G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* 10(1), 91-109.
- Horton, R.E., 1931. The field, scope, and status of the science of hydrology. *Transactions, American Geophysical Union* 12, 189–202.
- Hunink, J.E., Contreras, S., Soto-García, M., Martin-Gorriz, B., Martinez-Álvarez, V., Baille, A. 2015. Estimating groundwater use patterns of perennial and seasonal crops in a Mediterranean irrigation scheme, using remote sensing, *Agricultural Water Management* 162, 47-56.
- Jerbi, H., Massuel, S., Leduc, C. and Tarhouni, J. 2018. Assessing groundwater storage in the Kairouan plain aquifer using a lithology model (Central Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences* 11(10), 236.
- Kuper, M., Faysse, N., Hammani, A., Hartani, T., Hamamouche, M.F., Ameur, F. 2016. Liberation or Anarchy? The Janus Nature of Groundwater Use on North Africa's New Irrigation Frontiers. In:

- Integrated Groundwater Management, T Jakeman, O Barreteau, R Hunt, J-D Rinaudo, A Ross (sc. Ed.), Springer, Dordrecht, The Netherlands, 583-615.
- Lachassagne, P., Leonardi, V., Vittecoq, B. and Henriot, A. 2011. Interpretation of the piezometric fluctuations and precursors associated with the November 29, 2007, magnitude 7.4 earthquake in Martinique (Lesser Antilles). *Comptes Rendus Geoscience* 343(11-12), 760-776.
- Lane, S. 2014. Acting, predicting and intervening in a socio-hydrological world, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 927-952.
- Le Goulen P, Leduc C, Bachta MS, Poussin JC (2009) Sharing scarce resources in a Mediterranean River Basin, Wadi Merguellil in Central Tunisia. In: Molle F, Wester P (eds) *River Basin Trajectories: Societies, Environments and Development*, Wallingford: 147–170
- Leblanc, M.J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S.O., Loireau, M. and Cappelaere, B. 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change* 61(3-4), 135-150.
- Leduc, C., Favreau, G., Schroeter P. 2001. Long-term rise in a Sahelian water table: the Continental Terminal in South-West Niger. *Journal of Hydrology* 243 (1-2), 43-54.
- Linton, J. 2008. Is the hydrologic cycle sustainable? A historical-geographical critique of a modern concept. *Annals of the Association of American Geographers* 98(3), 630-649.
- Linton, J. 2010. What is Water ? The History of a Modern Abstraction. University of British Columbia Press, Vancouver.
- Linton, J. and Budds, J. 2014. The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum* 57, 170-180.
- Liu, H.J., Hsu, N.S. and Yeh, W.W.G. 2015. Independent component analysis for characterization and quantification of regional groundwater pumping. *Journal of Hydrology* 527, 505-516.
- Loucks, D. P. 2015. Debates Perspectives on socio-hydrology: Simulating hydrologic-human interactions, *Water Resour. Res.*, 51(6), 4789-4794.
- Magrin G., Chauvin E., Perrier Bruslé L., Lavie E., Redon M., 2015. Introduction. Les ressources, enjeux géographiques d'un objet pluriel. In Redon M., Magrin G., Chauvin E., Perrier Bruslé L., Lavie E., *Ressources mondialisées. Essais de géographie politique*. Paris, Publications de la Sorbonne, p. 5-23
- Maréchal, J.C., Dewandel, B., Ahmed, S., Galeazzi, L., Zaidi, FK., 2006. Combined estimation of specific yield and natural recharge in semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture. *J Hydrol.* 329, 281-293.
- Martínez-Santos, P. and Martínez-Alfaro, P.E. 2010. Estimating groundwater withdrawals in areas of intensive agricultural pumping in central Spain. *Agr Water Manage* 98, 172-181.
- Massuel, S., Feurer, D., El Maaoui, M.A. and Calvez, R. 2022. Deriving bathymetries from unmanned aerial vehicles: a case study of a small intermittent reservoir. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques* 67(1), 82-93.
- Massuel, S., Riaux, J., Molle, F., Kuper, M., Ogilvie, A., Collard, A.-L., Leduc, C. and Barreteau, O. 2018. Inspiring a broader socio-hydrological negotiation approach with interdisciplinary field-based experience. *Water Resources Research* 54(4), 2510-2522.
- Massuel, S. and Riaux, J. 2017. Groundwater overexploitation: why is the red flag waved? Case study on the Kairouan plain aquifer (central Tunisia). *Hydrogeology Journal* 25(6), 1607-1620.
- Massuel, S., Amichi, F., Ameur, F., Calvez, R., Jenhaoui, Z., Bouarfa, S., Kuper, M., Habaieb, H., Hartani, T. and Hammani, A. 2017. Considering groundwater use to improve the assessment of groundwater pumping for irrigation in North Africa. *Hydrogeology Journal* 25(6), 1565-1577.
- Massuel, S., Perrin, J., Mascre, C., Mohamed, W., Boisson, A. and Ahmed, S. 2014. Managed aquifer recharge in South India: What to expect from small percolation tanks in hard rock? *Journal of Hydrology* (512), 157-167.

- Massuel, S., George, B.A., Venot, J.-P., Bharati, L. and Acharia, S. 2013. Improving assessment of groundwater-resource sustainability with deterministic modelling: a case study of the semi-arid Musi sub-basin, South India. *Hydrogeology Journal* 21(7), 1567-1580.
- Massuel, S., Cappaere, B., Favreau, G., Leduc, C., Lebel, T. and Vischel, T. 2011. Integrated surface water-groundwater modelling in the context of increasing water reserves of a regional Sahelian aquifer. *Hydrological Sciences Journal* 56(7), 1242-1264.
- Massuel, S., Perrin, J., Wajid, M., Mascre, C. and Dewandel, B. 2009. A Simple, Low-Cost Method to Monitor Duration of Ground Water Pumping. *Ground Water* 47(1), 141-145.
- Massuel, S., george, B.A., Gaur, A. and Nune, R. 2007. Groundwater Modeling for Sustainable Resource Management in the Musi Catchment, India, pp. 1429-1435, Christchurch, New Zealand.
- Massuel, S., Favreau, G., Descloitres, M., Le Troquer, Y., Albouy, Y. and Cappaere, B. 2006. Deep infiltration through a sandy alluvial fan in semiarid Niger inferred from electrical conductivity survey, vadose zone chemistry and hydrological modelling. *Catena* 67(2), 105-118.
- McDonald, M.G. et Harbaugh, A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, USGS, Techniques of Water-Resources Investigations, book 6 Modeling Techniques, Chap. A1, 586.
- McGinnis, M. D., and E. Ostrom, 2014. Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society* 19(2), 30.
- Miller, J. H. and S. E. Page 2009. Complex adaptive systems: an introduction to computational models of social life. Princeton University Press.
- Molle, F. 2008. Nirvana concepts, narratives and policy models: Insight from the water sector *Water Alternatives*, 1(1), 131-156.
- Montanari, A., G. Young, HHG. Savenije, D. Hughes, T. Wagener, LL. Ren, D. Koutsoyannis, C. Cudennec, E. Toth, S. Grimaldi, G. Blöschl, M. Sivapalan, K. Beven, H. Gupta, M. Hipsey, B. Schaeefli, B. Arheimer, E. Boegh, SJ. Schymanski, G. Di Baldassare, B. Yu, P. Hubert, Y. Huang, A. Schumann, DA. Post, V. Srinivasan, C. Harman, S. Thompson, M. Rogger, A. Viglione, H. McMillan, G. Characklis, Z. Pang, and V. Belyaev (2013), "Panta Rhei—Everything Flows": Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022, *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1256-1275.
- Nasri, S., Cudennec, C., Albergel, J. and Berndtsson, R. 2004. Use of a geomorphological transfer function to model design floods in small hillside catchments in semiarid Tunisia. *Journal of Hydrology* 287(1-4), 197-213.
- Nicholson S.E. (2001). Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climate Research*, 17 (2), p. 123-144.
- Ogilvie, A., Riaux, J., Massuel, S., Mulligan, M., Belaud, G., Le Goulven, P. and Calvez, R. 2019. Socio-hydrological drivers of agricultural water use in small reservoirs. *Agricultural Water Management* 218(1), 17-29.
- Ogilvie, A., Belaud, G., Massuel, S., Mulligan, M., Le Goulven, P. and Calvez, R. 2018a. Surface water monitoring in small water bodies: potential and limits of multi-sensor Landsat time series. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 4349-4380.
- Ogilvie, A., Belaud, G., Massuel, S., Mulligan, M., Le Goulven, P., Malaterre, P.-O. and Calvez, R. 2018b. Combining Landsat observation with hydrological modelling for improved surface water monitoring of small lakes. *Journal of Hydrology* 566, 109-121.
- Ogilvie, A., Belaud, G., Massuel, S., Mulligan, M., Le Goulven, P. and Calvez, R. 2016. Assessing floods and drought in ungauged small reservoirs with long-term Landsat imagery. *Geosciences* 6(4), 42.
- Orieschnig, C.A., Belaud, G., Venot, J.-P., Massuel, S. and Ogilvie, A. 2021. Input imagery, classifiers, and cloud computing: Insights from multi-temporal LULC mapping in the Cambodian Mekong Delta. *European Journal of Remote Sensing* 54(1), 398-416.
- Ostrom, E. 2005. Understanding Institutional Diversity. Princeton University Press, Princeton.

- Ostrom, E. 1990. Governing the commons: the evolutions of institutions for collective action. Cambridge University Press.
- Pande, S., and Sivapalan, M. 2016. Progress in socio-hydrology: a meta-analysis of challenges and opportunities, WIREs Water.
- Panthou, G., Vischel, T. and Lebel, T. 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. International Journal of Climatology 34(15), 3998-4006.
- Perera, B.J.C., James B., Kularathna, M.D.U. 2005. Computer software tool REALM for sustainable water allocation and management. Journal of Environmental Management 77:291-300.
- Re, V. 2015. Incorporating the social dimension into hydrogeochemical investigations for rural development: the Bir Al-Nas approach for socio-hydrogeology. Hydrogeology Journal 23, 1293-1304.
- Riaux, J., Massuel, S. and Jerbi, H. 2021. Looking for more groundwater. From the exploitation of the Bou Hafna aquifer (1895–present) to Franco-Tunisian hydrogeology. Water History 13(3), 407-425.
- Riaux, J., Massuel, S. and venot, J.-P. 2017. Retour réflexif sur une expérience interdisciplinaire exploratoire : l'atelier « Interdisciplinarité autour des petits barrages ». Natures Sciences et Sociétés 25(2), 163-171.
- Riaux, J., Massuel, S., Billaud, J.-P., Cornu, P., Richard-Ferroudji, A. and Barreteau, O. 2016. Interdisciplinarité entre Nature et Société. B., H. and N., M. (eds), pp. 305-322, Peter Lang.
- Riaux, J. and Massuel, S. 2014. Construire un regard sociohydrologique (2). Le terrain en commun, générateur de convergences scientifiques. Natures Sciences et Sociétés 22, 329-339
- Richards, L.A., Magnone, D., Sulzenfuss, J., Chambers, L., Bryant, C., Boyce, A.J., van Dongen, B.E., Ballantine, C.J., Sovann, C., Uhlemann, S., Kuras, O., Goody, D.C. and Polya, D.A. 2019. Dual in-aquifer and near surface processes drive arsenic mobilization in Cambodian groundwaters. Science of the Total Environment 659, 699-714.
- Ruud, N., Harter, T., Naugle, A. 2004. Estimation of groundwater pumping as closure to the water balance of a semi-arid, irrigated agricultural basin. Journal of Hydrology 297, 51-73.
- Schoeller, H. 1962. Les eaux souterraines : Hydrologie dynamique et statique. Comptes rendus critiques. 699. Hydrogéologie en chambre Paris, Masson, in-8°, 187 fig. NF 105, 642 p.
- Sebai, A., Massuel, S., Tarhouni, J. and Jerbi, H. 2017. Groundwater Recharge of the Kairouan Plain Aquifer: Evidence of Preferential Flow Paths Through the El Haouareb Limestones ? Water and Land Security in Drylands: Response to Climate Change. Springer (ed), pp. 57-65, Ouessaar M., D. Gabriels, A. Tsunekawa, S. Evett (edts) 2017.
- Seguis, L., Cappelaere, B., Milesi, G., Peugeot, C., Massuel, S. and Favreau, G. 2004. Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. Hydrological Processes 18(17), 3401-3413.
- Shah, T. 2005. Groundwater and human development: challenges and opportunities in livelihoods and environment. Water Science and Technology 51(8), 27-37.
- Sheen, K.L., Smith, D.M., Dunstone, N.J., Eade, R., Rowell, D.P. and Vellinga, M. 2017. Skilful prediction of Sahel summer rainfall on inter-annual and multi-year timescales. Nature Communications 8(1), 14966.
- Shiklomanov, I., Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources (Oxford University Press, New York).
- Sivapalan, M. and Bloschl, G. 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. Water Resources Research 51(9), 6988-7022.
- Sivapalan, M., Savenije, H.H.G. and Bloschl, G. 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water. Hydrological Processes 26(8), 1270-1276.
- Smith, A.J., Massuel, S., Pollock, D., Fitzpatrick, A., Byrne, C., Johnstone, C., Smart, N. and Cahill, K. 2012. Final Summary Report - Hydrological Controls on MAR in Perth's Coastal Aquifer, p. 21, CSIRO.

- Srinivasan, V. 2015. Reimagining the past - use of counterfactual trajectories in socio-hydrological modelling: the case of Chennai, India, *Hydrology and Earth System Sciences* 19(2), 785-801.
- Swyngedouw, E. 2009. The political economy and political ecology of the hydrosocial cycle. *Journal of Contemporary Water Research and Education* 142, 56–60.
- Tissandier, G. 1869. *L'eau*, Hachette, Paris, 370p.
- Trottier, J. 2008. Water crisis: political construction or physical reality ? *Contemporary Politics*, 14(2), 197-214.
- Troy, T. J., Pavao-Zuckerman, M. and Evans T. P. 2015. Debates Perspectives on socio-hydrology: Socio-hydrologic modeling: Tradeoffs, hypothesis testing, and validation, *Water Resources Research*, 51(6), 4806-4814.
- Tweed, S., Massuel, S., Seidel, J.L., Chhuon, K., Lun, S., Eang, K.E., Venot, J.P., Belaud, G., Babic, M. and Leblanc, M. 2020. Seasonal influences on groundwater arsenic concentrations in the irrigated region of the Cambodian Mekong Delta. *Science of The Total Environment* 728, 138598.
- van Emmerik, T.H.M., Li, Z., Sivapalan, M., Pande, S., Kandasamy, J., Savenije, H.H.G., Chanen, A. and Vigneswaran, S. 2014. Socio-hydrologic modeling to understand and mediate the competition for water between agriculture development and environmental health: Murrumbidgee River basin, Australia. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(10), 4239-4259.
- Venot, J.P., Vos, J., Molle, F., Zwarteveen, M., Veldwisch, G.J., Kuper, M., Mdee, A., Ertsen, M., Boelens, R., Cleaver, F., Lankford, B., Swatuk, L., Linton, J., Harris, L.M., Kemerink-Seyoum, J., Kooy, M. and Schwartz, K. 2022. A bridge over troubled waters. *Nature Sustainability* 5(2), 92-92.
- Vischel, T., Lebel, T., Massuel, S. and Cappelaere, B. 2009. Conditional simulation schemes of rain fields and their application to rainfall-runoff modeling studies in the Sahel. *Journal of Hydrology* 375(1-2), 273-286.
- Vouillamoz, J.M., Favreau, G., Massuel, S., Boucher, M., Nazoumou, Y. and Legchenko, A. 2008. Contribution of magnetic resonance sounding to aquifer characterization and recharge estimate in semiarid Niger. *Journal of Applied Geophysics* 64(3-4), 99-108.
- Walker, B., Carpenter, S., Andries, J., Abel, N., Cumming, G., Janssen, M., Lebel, L., Norberg, J., Peterson, G. D. and Pritchard, R. 2002. Resilience Management in Social-Ecological Systems: a Working Hypothesis for a Participatory Approach. *Conservation Ecology* 6(1), 14.
- Wesselink, A., Kooy, M. and Warner, J. 2016. Socio-hydrology and hydrosocial analysis: towards dialogues across disciplines, *WIREs Water*, doi:10.1002/wat2.1196.
- Wyns, R., Baltassat, J.M., Lachassagne, P., Legchenko, A., Vairon, J., Mathieu, F. 2004. Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), *Bull Soc Geol Fr* 175(1):21–34
- Zhu, X., Wang, Z., Wang, J. 2009. Calculation Method of Net Groundwater Use and Its Application on the Hai Basin, proceedings of International Symposium of Hai Basin Integrated Water and Environment Management 2008, Beijing, China, 483-490.