

Techniques de mobilisation des ressources en eau et pratiques d'utilisation en zones arides : bilans, évolutions et perspectives

Patrick Le Goulven¹
Guillaume Lacombe²
Julien Burte³
Alain Gioda⁴
Roger Calvez¹

¹ Institut de recherche pour le développement
IRD UMR GEAU
(gestion de l'eau, acteurs, usages)
Whymper 442 y Coruña
Apartado postal 17
12857 Quito
Équateur

<patrick.legoulven@ird.fr>
<roger.calvez@ird.fr>

² International Water Management Institute
PO Box 4199
Nongviengkham - Xaythany district
Vientiane
Lao P.D.R.

<g.lacombe@cgiar.org>

³ Fundação Cearense de Meteorologia e
Recursos Hídricos - FUNCEME
Av. Rui Barbosa
1246 Fortaleza/CE 60115-221
Brazil

<julien.burte@yahoo.fr>

⁴ Institut de recherche pour le développement,
IRD

UMR hydroSciences Montpellier
Calle Teruel n° 357
Miraflores
Lima 18
Pérou
<alain.gioda@ird.fr>

Résumé

Comme dans la plupart des régions, les zones arides ont bénéficié de plusieurs vagues d'aménagements hydroagricoles durant la seconde moitié du xx^e siècle pour ralentir, stocker et rendre accessibles des écoulements sporadiques et violents peu utilisables par des ouvrages au fil de l'eau. Cette succession d'aménagements superposés est souvent mal valorisée comme le montrent divers bilans réalisés dans des bassins du Centre tunisien et du Nord Mexique où les retenues collinaires favorisent, avant tout, les pertes évaporatoires. Sur la base de ces constats, les gouvernements ont cherché à améliorer la gestion technique des ouvrages en favorisant les transferts d'eau vers les réservoirs souterrains et cherchent à mobiliser les ressources en eau non conventionnelles avec quelques succès, mais seulement dans des situations spécifiques en raison de leurs coûts élevés (désalinisation), d'une difficile acceptation (réutilisation des eaux usées) ou de leur volume peu important (eau atmosphérique). Toutes ces initiatives n'ont pas arrêté la surexploitation des nappes phréatiques, et peu à peu se mettent en place plusieurs initiatives pour diminuer la demande en eau tout en augmentant la production alimentaire. Cette nouvelle politique finance l'installation des techniques d'irrigation économes (aspersion, goutte-à-goutte, polymères gonflants, conduites verticales, etc.) pour remplacer l'irrigation gravitaire majoritairement utilisée. Après quelques années, il faut bien reconnaître que l'impact de ces nouvelles techniques est moins important que prévu soit à cause d'une utilisation inadéquate, soit par le fait de nouveaux comportements qu'elles ont suscités. Actuellement, les pouvoirs publics testent des outils complémentaires économiques et réglementaires pour rendre plus efficaces ces changements techniques.

Mots clés : gestion de l'eau, ressources en eau, zones arides.

Abstract

Water resources development techniques and water use practices in arid regions: Balances, evolution and prospects

As most regions, arid zones benefited from waves of hydro agricultural structures during the second half of the xxth century. They were organized to slow down, stock and render certain sporadic and violent flows accessible to works along the rivers. This succession of superposed structures is far from being optimally valued as shown in different reports on the catchments in the centre of Tunisia and the north of Mexico. In both regions, the reservoirs favour mainly evaporation flows. On the basis of such observations, governments have tried to improve the technical management of the structures favouring water transfer towards groundwater storage. They also try to mobilize unconventional water resources with some success, but only in specific situations due to high costs (desalinization), difficulty of gaining acceptance (reusable waste water) or low volume (atmospheric water). All of these initiatives have failed to stop the overexploitation of phreatic water tables. Some

Cet article fait suite à une conférence donnée par le premier auteur à l'Académie d'agriculture dans une séance commune avec l'Académie des sciences d'Outre-Mer organisée le 21 mars 2007 sur l'utilisation optimale de l'eau par l'agriculture en zones arides.

Tirés à part : P. Le Goulven

initiatives are now progressively starting to reduce water demand and to increase food production at the same time. This new policy is financing the development of more efficient irrigation techniques (sprinkling, dripping, swelling polymers, vertical drainpipes, etc.) to replace the mostly gravitating irrigation. However, after a few years of use the impact of these new techniques appears less impressive than initially expected either due to inadequate use or to new patterns of behaviour they created. At present the authorities are testing complementary economical tools and regulations to make the technical changes more efficient.

Key words: arid zones, water management, water resources.

Selon le dictionnaire français d'hydrologie¹, l'aridité se manifeste surtout par ses conséquences éda- phiques (dénudement de la végétation et rareté des êtres vivants), hydrologiques (faiblesse et irrégularité des écoulements, dégradation des réseaux) et géomorphologiques (processus d'érosion, pauvreté des sols). Elle peut se quantifier par des indices empiriques dont la plupart découlent de simples rapports hydrothermiques avec une distinction en seulement trois degrés :

– les régions hyperarides où les précipitations sont exceptionnelles (inférieures à 50 mm/an) et les écoulements rares, épisodiques et inorganisés ;

– les régions arides reçoivent de faibles pluies (50-150 mm/an) irrégulières et groupées sur une saison avec des écoulements intermittents assez violents, mais de courte durée ;

– en région semi-aride, les pluies réparties sur quelques mois sont suffisantes pour assurer un rythme saisonnier à la végétation et aux écoulements, avec des crues isolées parfois soudaines et violentes.

Si l'on fait exception des cas particuliers générés par des cours d'eau allogènes (Niger moyen, basse vallée du Sénégal), les régions arides ont donc en commun un climat qui ne permet pas d'assurer les besoins des cultures et un régime hydrologique caractérisé par des écoulements sporadiques, souvent violents et chargés de sédiments, et difficilement utilisables lors du passage de la crue.

De tout temps, les populations rurales locales ont su s'adapter à cet environnement contraignant en développant des techniques chargées de ralentir les vitesses de ruissellement et d'écoulement pour diminuer les phénomènes érosifs et de favoriser le stockage de l'eau dans de petits ouvrages construits sur les versants ou dans les divers réservoirs souterrains du sol (zone aérée, nappes phréatiques).

Les systèmes de production traditionnels correspondants combinaient une concentration des moyens de production agricole sur des espaces limités où l'eau était accessible et l'exploitation extensive de ressources pastorales dispersées [1].

Ces techniques anciennes imaginées, construites et gérées par les populations concernées sont peu à peu tombées en désuétude avec l'évolution des civilisations et des technologies ou après des changements sociétaux plus rapides comme les périodes de colonisation. Les systèmes de production ont évolué au même rythme que les ouvrages. Cette communication n'a pas la prétention d'aborder cette évolution historique, déjà décrite dans de nombreux ouvrages [2], mais simplement d'examiner comment, après la phase de décolonisation, les populations des zones arides ont mobilisé leurs ressources en eau par vagues successives, comment ces différents ouvrages sont utilisés et, finalement, comment se mettent en place les nouvelles stratégies d'économie d'eau.

Développement et gestion des ressources en eau conventionnelles

Mise en place de la grande hydraulique

Après la période de décolonisation et avec l'émergence d'« espaces nations », les nouveaux États, à travers des instances centralisées, ont pris en charge la gestion de la ressource en construisant toute une série de grands aménagements pour mobiliser, transférer et allouer la ressource en fonction de choix stratégiques multiples et raisonnés sur des équilibres nationaux. Cette intervention peut s'esquisser en trois phases [3] suivies d'une période de réflexion.

• Phase d'investissement technique

La construction des grands ouvrages obéit à une logique de meilleure répartition de l'eau entre régions et/ou à des valorisa-

tions multiples qui doivent accélérer le développement des pays, en augmentant la production agricole des régions en aval, puis en transférant les surplus pour alimenter les grands centres de population, l'industrie touristique et les zones d'irrigation à haute valeur ajoutée.

• Phase d'accompagnement légal et structurel

En parallèle, les pouvoirs publics mettent en place des cadres législatifs et réglementaires d'accompagnement (codes des eaux) qui transforment le statut juridique de la ressource en eau (publique, inaliénable et imprescriptible), établissent des nouveaux droits d'usages sans toujours tenir compte des droits anciens et confient leur application à des ministères chargés du développement. Des institutions centralisées sont créées pour appliquer, au niveau régional, les stratégies définies au niveau national : directions générales sectorielles, offices régionaux multisectoriels de mise en valeur. L'investissement technique s'accompagne d'incitations à l'intensification des usages, en proposant un accès facile et bon marché à la ressource avec des objectifs nationaux prioritaires.

• Phase d'économie

La mobilisation des ressources se ralentit, car le coût de construction devient plus élevé, et les pouvoirs publics renforcent leurs gestions réglementaires (interdiction, recouvrement des coûts) et techniques (connexions entre ouvrages, usages multiples, optimisation). Il faut satisfaire au mieux des demandes plus nombreuses et très diversifiées, mais il n'est pas encore question de remettre en cause l'utilisation qui est faite de la ressource.

Le relèvement des taux de recouvrement est l'objectif principal assigné aux gestionnaires, et les difficultés rencontrées à ce niveau sont à l'origine de la création de nouvelles institutions régionales ou locales. Ces nouvelles associations sont amenées à remplacer peu à peu l'État et doivent couvrir les frais de fonctionnement et de maintenance des infrastructures hydrauliques dont la gestion leur est déléguée, les recettes proviennent des cotisations des

¹ Le dictionnaire français d'hydrologie est rédigé par la commission de terminologie du Comité national français des sciences hydrologiques (<http://hydrologie.org>).

adhérents, des subventions et de la vente d'eau. Cette phase de désengagement est largement appuyée par la Banque mondiale.

- Période de réflexion

Il y a actuellement 45 000 grands barrages dans le monde principalement répartis entre la Chine (22 100), les États-Unis (6 390), l'Inde (4 000), le Japon (1 200) et l'Espagne (1 000). Ces grands aménagements ont accompli une bonne partie des objectifs qui leur étaient assignés, mais avec des impacts écologiques et sociaux non prévus et mal maîtrisés : les déplacements importants de populations (60 M d'habitants), l'inondation de superficies considérables (400 000 km²), la dégradation de la biodiversité des rivières, l'augmentation des maladies tropicales, l'endettement des pays pauvres, etc. Un vaste courant de contestation s'est développé, au début des années 1990, contre le développement de nouveaux aménagements, jugés non durables, au grand dam de nombreux pays en voie de développement. La Banque mondiale qui avait financé activement les grands projets hydrauliques s'est donc imposée une période de moratoire (1990-2000) avant de reprendre ses financements, mais assortis de conditions beaucoup plus drastiques concernant les études et la maîtrise des impacts.

Les régions arides ont subi les mêmes phases avec quelques particularités. Les grands ouvrages ont également été conçus pour sécuriser et protéger les populations urbaines des crues exceptionnelles, ce qui a conduit au surdimensionnement notable de nombreux ouvrages par rapport aux écoulements moyens annuels et à des plans d'eau très étalés favorisant l'évaporation. Les États comptaient également fixer les populations nomades en leur octroyant des périmètres irrigués alimentés par les grands barrages, ils avaient oublié que ces populations nomades n'avaient aucune tradition d'irrigation, et que les mauvaises pratiques d'épandage ont provoqué gaspillage et salinisation d'une partie des terres. Enfin, les grands ouvrages ont été construits avec très peu d'études de transports solides, et le comblement rapide des retenues dans les régions arides et semi-arides pose problème quant à la viabilité de leur fonctionnement. Ces points sont évidemment analysés de très près pour la construction des nouveaux aménagements (bassin du Niger notamment).

Petite et moyenne hydraulique de complément

Les petites retenues prolifèrent depuis 20-25 ans sous différentes appellations : Inde

(plus de 90 000 *small multi-purpose reservoirs*), Nordeste du Brésil (70 000 *açudes*), Burkina-Nord Côte d'Ivoire-Nord Ghana (5 000 petits barrages), Tunisie (1 000 lacs et retenues collinaires). En zone aride, ces retenues sont généralement complétées par des ouvrages de conservation des eaux et des sols : banquettes végétales ou empierrées sur le haut des versants pour lutter contre l'érosion en diminuant les vitesses de ruissellement et augmenter l'infiltration dans la zone aérée.

- Petites retenues

En Tunisie, la construction de centaines de retenues collinaires depuis les années 1990 vise d'abord à contrôler les eaux de ruissellement pour éviter l'envasement des grands barrages aval, puis à fixer les populations rurales autour de ces points d'eau ; l'implantation est choisie essentiellement sur la base de critères techniques. Les lacs collinaires sont des ouvrages rustiques modestes (capacité inférieure à 0,5 hm³), à courte durée de vie et sans possibilité de gestion technique (1 000 prévus, plus de 400 construits en 2000), les barrages collinaires sont plus importants (capacité comprise entre 0,5 et 1 hm³) avec des ouvrages de transferts et de connexions (203 prévus, plus de 100 achevés en 2000), le prix de construction varie entre 15 000 et 90 000 €.

Dans le cadre du programme européen HYDROMED, des chercheurs de l'Institut de recherches pour le développement (IRD) et de l'Institut national de recherches en génie rural, eaux et forêts de Tunis (INR-GREF) ont étudié le rôle de ces retenues collinaires et leur fonctionnement, leur évolution et leur rôle dans la recharge de nappes phréatiques aval.

Les eaux des retenues collinaires sont utilisées localement pour l'irrigation, le bétail et les besoins domestiques. Malheureusement, elles subissent des pertes importantes par évaporation, ce qui n'est pas le cas des nappes phréatiques. De ce fait, les populations locales sont incitées à creuser des puits captant l'eau souterraine plutôt que d'utiliser l'eau des lacs artificiels, et le gouvernement à choisir des sites favorables à une recharge éventuelle.

À partir de bilans hydriques réalisés sur 12 retenues, il apparaît qu'en moyenne, seuls 11 % du volume stocké sont utilisés pour l'irrigation, 35 % s'évaporent et le reste s'infiltré, parfois jusqu'à une nappe, sinon cette part regagne la surface du sol en aval de l'ouvrage où elle est reprise par l'évaporation.

Avec ses 70 000 *açudes* d'une superficie supérieure à 1 000 m², le Nordeste brésilien est, après l'Inde, la deuxième région au monde par la densité de ses petits réservoirs.

Connus sous le nom d'*açudes*, ils constituent la principale ressource en eau pendant les périodes de sécheresse, très fréquentes et aux conséquences souvent dramatiques dans cette région. Compte tenu des faibles précipitations, les *açudes* très peu profonds (moins de 10 m en moyenne) et riches en éléments nutritifs se maintiennent en général à 10 % de leur capacité et atteignent rarement leur niveau maximum [4]. Alimentés par des rivières temporaires quelques jours par an, ils subissent une évaporation intense (3 m/an) pouvant provoquer une salinisation de l'eau qui les rend impropres à toute exploitation, voire les assécher totalement. Les populations utilisent les *açudes* pour leur usage domestique, l'élevage du bétail, l'irrigation ou les cultures de décrue qui sont à même d'apporter, en pleine époque de sécheresse et de disette, une alimentation fraîche pour les hommes et leur bétail [5]. Les paysans utilisent les parties en faible pente des marges inondées des retenues, plantant au fur et à mesure que l'eau se retire. Depuis quelques années, des équipes de l'IRD et de l'université du Pernambouco essaient d'y développer la pêche artisanale, l'aquaculture et la polyculture en combinant des poissons aux régimes alimentaires différents, afin d'améliorer l'exploitation encore assez faible de ces *açudes* qui ont un effet non négligeable sur les écoulements aval [6].

En zone semi-aride du Nord-Mexique, sous une pluviométrie moyenne interannuelle de 420 mm, la faible production végétale des pâturages constitue le principal facteur limitant de l'élevage avec une charge maximale d'une unité animale (vache de 400 kg) pour 7 ha [7]. Pour alimenter ce bétail, les éleveurs installent des abreuvoirs alimentés par le pompage d'eaux souterraines ou construisent des petites retenues (*presones*) pour le stockage des eaux superficielles. Des études quantitatives ont été menées sur le ranch Atotonilco pour examiner en détail les impacts et la valorisation de ces retenues très rustiques et qui suscitent un certain engouement (figure 1).

Le ranch Atotonilco est une vaste hacienda de 450 km² avec un effectif de 3 540 têtes de bétail adultes réparties dans 102 enclos.

À l'intérieur du ranch, environ 300 abreuvoirs sont alimentés à partir de puits creusés dans les parties hautes du relief, et on compte plus de 50 petits barrages dont la capacité de stockage varie de 3 000 à 30 000 m³. Dans la majorité des cas, les eaux ne s'y maintiennent que trois à quatre mois après la saison des pluies (de novembre à février).

Les besoins en eau du ranch pour abreuver le bétail sont estimés à 100 000 m³/an, et

les bilans effectués montrent que les *presones*, tels qu'ils sont gérés, ne couvrent que 1 % de ces besoins et sont donc notablement sous-exploités.

À la suite de cette étude, plusieurs solutions ont été proposées pour diminuer l'évaporation en surcreusant les cuvettes, en imperméabilisant le fond des retenues par bentonite et en connectant les retenues au réseau de distribution.

• Aménagements de versants

L'aménagement de versants par banquettes antiérosives est très répandu dans les zones arides et semi-arides, notamment dans les pays proches du pourtour méditerranéen.

Ces aménagements se composent de levées de terre édifiées sur un versant à intervalles réguliers en suivant les courbes

de niveau et d'un canal qui retient les eaux de ruissellement et les sédiments en provenance de l'espace interbanquettes (figure 2).

Elles sont construites sur des pentes inférieures à 25 % pour intercepter le ruissellement, favoriser l'infiltration et donc réduire l'érosion sur les versants.

Une étude expérimentale sur le fonctionnement et les impacts de ces banquettes a été menée en Tunisie sur le bassin-versant d'El Gouazine, d'une superficie de 1 750 ha dont 43 % aménagés en banquettes et fermés par un lac collinaire [8].

L'effet des banquettes est spectaculaire puisque :

– combinées à un travail du sol, elles permettent de réduire de 90 % la lame ruisselée pour des pluies inférieures à 60 mm et

de 40 à 70 % pour les pluies supérieures à 60 mm ;

– sur les parties laissées en jachère, elles réduisent le ruissellement de 50 à 90 % pour les pluies inférieures à 60 mm et de 20 à 40 % au-delà.

En revanche, huit ans après leur construction, ces aménagements ont perdu les trois cinquièmes de leur capacité de stockage, les coefficients de ruissellement sont remontés, et surtout les taux d'envasement de la retenue aval sont revenus aux valeurs mesurées avant aménagement. En l'absence d'entretien et de réhabilitation, les banquettes sont endommagées par des brèches qui, automatiquement, vont provoquer une autre brèche dans la banquette immédiatement en aval et ainsi de suite. Cette succession de ruptures accentue la concentration du ruissellement sur des axes d'écoulement qui se transforment alors en ravines.

Enfin, l'eau stockée dans le sol est en réalité très peu valorisée. Dans la plupart des cas, les terres aménagées en banquettes sont choisies pour leur facilité d'accès : les bulldozers doivent pouvoir manœuvrer sans abîmer les cultures déjà en place. Les plantations, pourtant les plus aptes à valoriser le surplus hydrique provoqué, sont donc délaissées au profit de terres céréalières ou de terres de parcours, plus faciles à terrasser. Pourtant, la faible profondeur d'enracinement des graminées valorise mal les eaux retenues par les banquettes, lesquelles peuvent même réduire les rendements céréaliers en cas d'immersion prolongée des jeunes pousses. Par ailleurs, le parcours est de plus en plus réduit dans les zones aménagées, car le passage fréquent du cheptel sur les levées de terre est l'une des principales causes de la destruction prématurée de ces aménagements.

• Conclusions sur la petite et moyenne hydraulique

Ces aménagements de petite et moyenne hydraulique, étagés le long des bassins-versants, proposent une meilleure répartition de la ressource en eau, soit de manière ponctuelle dans les retenues collinaires, soit en augmentant la capacité de stockage du sol. Malheureusement, les ressources stockées sont peu valorisées, et une grande partie se perd par évaporation, à défaut d'être utilisée. Les raisons en sont diverses, mais deux prédominent :

– la durée de vie utile de ces aménagements est courte et n'incite pas les agriculteurs à investir dans des exploitations intensives ;
 – les ouvrages ont été construits sans concertation avec les populations locales et ne sont pas toujours adaptés à leurs besoins.

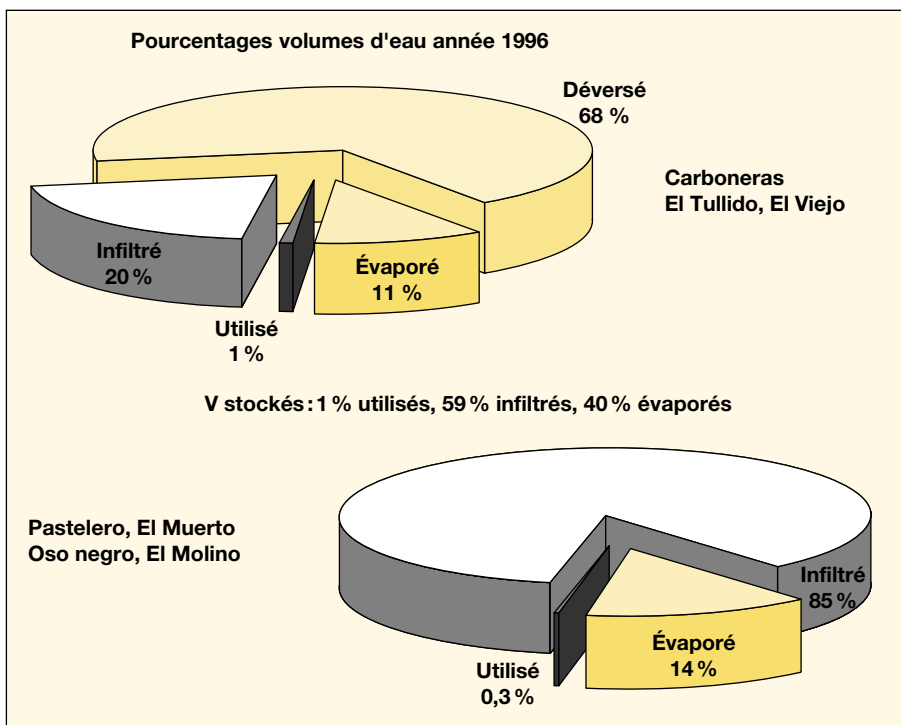


Figure 1. Bilans hydriques de sept presones du ranch Atotonilco en 1996.

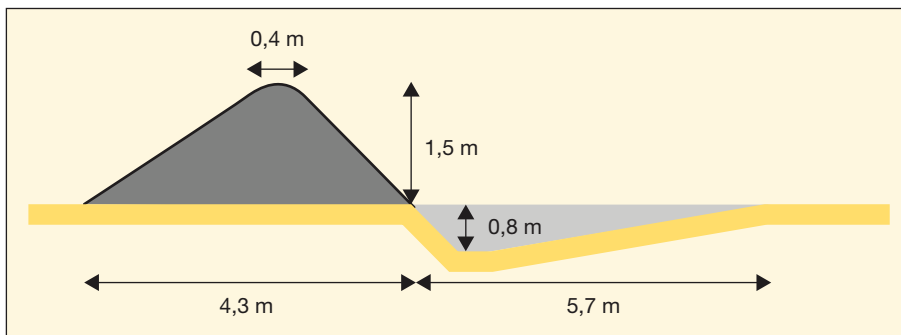


Figure 2. Schéma de banquette antiérosive.

Certes, ils ralentissent bien les phénomènes d'érosion et protègent les grands ouvrages en stockant une partie des sédiments transportés, mais, en même temps, ils diminuent les écoulements parvenant aux grands barrages qui sont bien mieux valorisés.

La recherche de l'optimum entre petits ouvrages et grande hydraulique reste un objectif complexe, mais d'importance quant à la durabilité des systèmes locaux de production et donc des niveaux de vie des populations concernées [9].

Utilisation des réservoirs souterrains

Conscients de ces problèmes, les institutions se sont penchées sur une meilleure utilisation et sur la gestion des réservoirs souterrains renouvelables (nappes phréatiques). Comme toujours dans une optique de gestion de l'offre en eau, les premières mesures se sont concentrées sur des solutions techniques permettant d'augmenter la capacité de stockage et la recharge de ces aquifères.

L'idée n'est pas nouvelle, puisque déjà, dans les années 1970, le gouvernement allemand aidé par des chercheurs de l'ORSTOM construisait des barrages souterrains sur les socles verrouillant les oasis de l'Air au Niger (Iférouane, Timia, Tabet) pour augmenter les volumes stockés et surtout remonter le niveau piézométrique, afin de faciliter l'exhaure.

Désormais, toute construction de grand barrage prévoit dans son fonctionnement des procédures de recharges programmées des aquifères en aval, et les sites des retenues collinaires sont désormais choisis en fonction de connexions structurelles avec des nappes proches. Dans ce dernier cas, l'eau reste très peu de temps dans la retenue, et tout est fait pour assurer son infiltration.

De manière concomitante, les droits d'eau ne sont plus octroyés sur la retenue, mais transférés sur les nappes souterraines au-dessus desquelles les États ont construit des périmètres irrigués alimentés par des forages et délivré des concessions d'extraction pour alimenter en eau potable des populations urbaines et satisfaire les demandes nouvelles de l'industrie touristique très exigeante en matière de qualité. Les résultats ont dépassé les prévisions, car les populations des milieux arides ont toujours été situées à proximité des aquifères avec une expérience très ancienne dans les pratiques d'exhaure. Par ailleurs, les nouvelles pompes à bas prix sont apparues sur le marché au début des années 1970, et de nombreuses techniques artisanales se sont développées pour construire des forages rustiques à des profondeurs suffisantes pour la plupart des nappes phréatiques.

Cette conjoncture favorable a multiplié les nouveaux points d'exhaure échappant à tout contrôle des États, ce qui, dans un sens économique, a bien augmenté la valorisation de l'eau stockée, mais provoque une surexploitation inquiétante de ces réservoirs, comme le souligne le rapport mondial sur la gestion des nappes d'eau souterraine² qui note des baisses généralisées dans toutes les zones arides sans distinction de niveau de développement : Arizona, Mexique, Espagne, Inde, Maghreb et Moyen-Orient.

Quelques deux milliards de personnes et environ 40 % de l'agriculture dépendent au moins en partie de ces réservoirs cachés qui, de plus, sont susceptibles d'être pollués par les intrants et autres produits phytosanitaires qui percolent depuis les systèmes d'irrigation ou par des intrusions d'eau marine rendues possibles par la baisse des niveaux piézométriques.

Bilan d'aménagements superposés

Le bassin du Merguellil, situé en milieu semi-aride dans le centre de la Tunisie, est l'exemple type d'application des différentes politiques successives de mobilisation des ressources superficielles et souterraines. D'une superficie d'environ 1 200 km², il débouche sur la grande plaine de Kairouan. L'aquifère correspondant était alimenté à travers le lit de l'oued, et les écoulements venaient mourir dans une dépression en aval de la plaine. Seuls les événements exceptionnels arrivaient à la mer.

Il faut attendre 1989 pour voir la mise en eau du grand barrage d'El Haouareb qui ferme le bassin productif du Merguellil juste avant l'arrivée de l'oued dans la plaine de Kairouan. Ce barrage, surdimensionné pour protéger la ville de Kairouan des crues catastrophiques (inondations de 1969), alimente le périmètre irrigué d'El Haouareb (4 000 ha) et réalimente la nappe aval par des infiltrations continues souterraines et latérales (figure 3).

Les droits d'usages sont attribués sur cette nappe où l'État a également créé une quinzaine de périmètres publics alimentés par des forages pour fixer les populations nomades. Mais on assiste à une prolifération des puits depuis 1974 malgré les interdictions. Les puits sont prolongés par des forages rustiques (forages à bras) pour suivre la baisse de la nappe, sans que la police des eaux puisse intervenir réellement. À partir de 1990, le ministère de l'Agriculture, par l'intermédiaire de sa direction de la Conservation des eaux et des sols

(CES) conçoit une stratégie décennale (1991-2000) concentrée essentiellement sur le traitement des versants et la réalisation des retenues collinaires. Actuellement, 17 % du bassin sont occupés par des banquettes en pierres sèches ou mécaniques à rétention totale.

On compte également une quarantaine de lacs collinaires (de capacité inférieure à 0,5 hm³), construits et gérés par la CES et qui reçoivent une moyenne de 2,5 hm³/an, et six barrages collinaires construits par la Direction des grands barrages et gérés par la CES. D'une capacité supérieure à 1 hm³, les barrages collinaires reçoivent des apports moyens annuels de 2,8 hm³.

Ces retenues sont, d'abord, construites pour stopper les transports solides, et ce n'est que dans un deuxième temps que les pouvoirs publics essaieront de valoriser les volumes stockés en sélectionnant les sites d'implantation près des terres exploitables.

Dans le bassin-versant du Merguellil, les surfaces aménagées en banquettes sont des terres céréalières ou de parcours pour le bétail. Mechergui [10] montre qu'en accroissant la réserve utile du sol de plus de 20 %, les banquettes pourraient augmenter le rendement des céréales de 10 à 15 quintaux/ha. Toutefois, cette hausse est limitée aux terrains jouxtant les banquettes, soit 15 % de la surface aménagée. Ces gains potentiels sont compensés par les pertes en surfaces cultivables (fossés, bourrelets, horizons décapés à l'aval des banquettes) évaluées à 5-15 % en fonction de la pente. À cela, il convient d'ajouter les éventuelles pertes en rendement induites par la difficulté accrue à traiter et récolter les cultures lorsque les plateformes de circulation sont trop étroites pour permettre le passage des machines agricoles. À l'échelle du versant, les gains agronomiques liés à la présence des banquettes sont donc très probablement nuls [11].

Dans la plupart des cas, la recharge de nappes à partir des banquettes est nulle, car les infiltrations excèdent rarement 1 m, et l'eau, stockée dans la zone insaturée, est reprise par évapotranspiration [12].

À l'amont du barrage d'El Haouareb, 47 % des 46 retenues collinaires sont exploitées par 270 agriculteurs irriguant 669 ha de cultures : maraîchage (2 %), olivier (69 %), amandier (14 %) et autres arbres (15 %), soit une moyenne de 5,9 agriculteurs par retenue et de 12,5 par retenue exploitée.

Dans 63 % des cas, l'eau est prélevée dans les retenues à l'aide de motopompes dont le nombre varie entre 0 et 11 par retenue. Sans pompe, l'irrigation se fait par écoulement gravitaire direct depuis la

² Programme des Nations unies pour l'environnement, 2003.

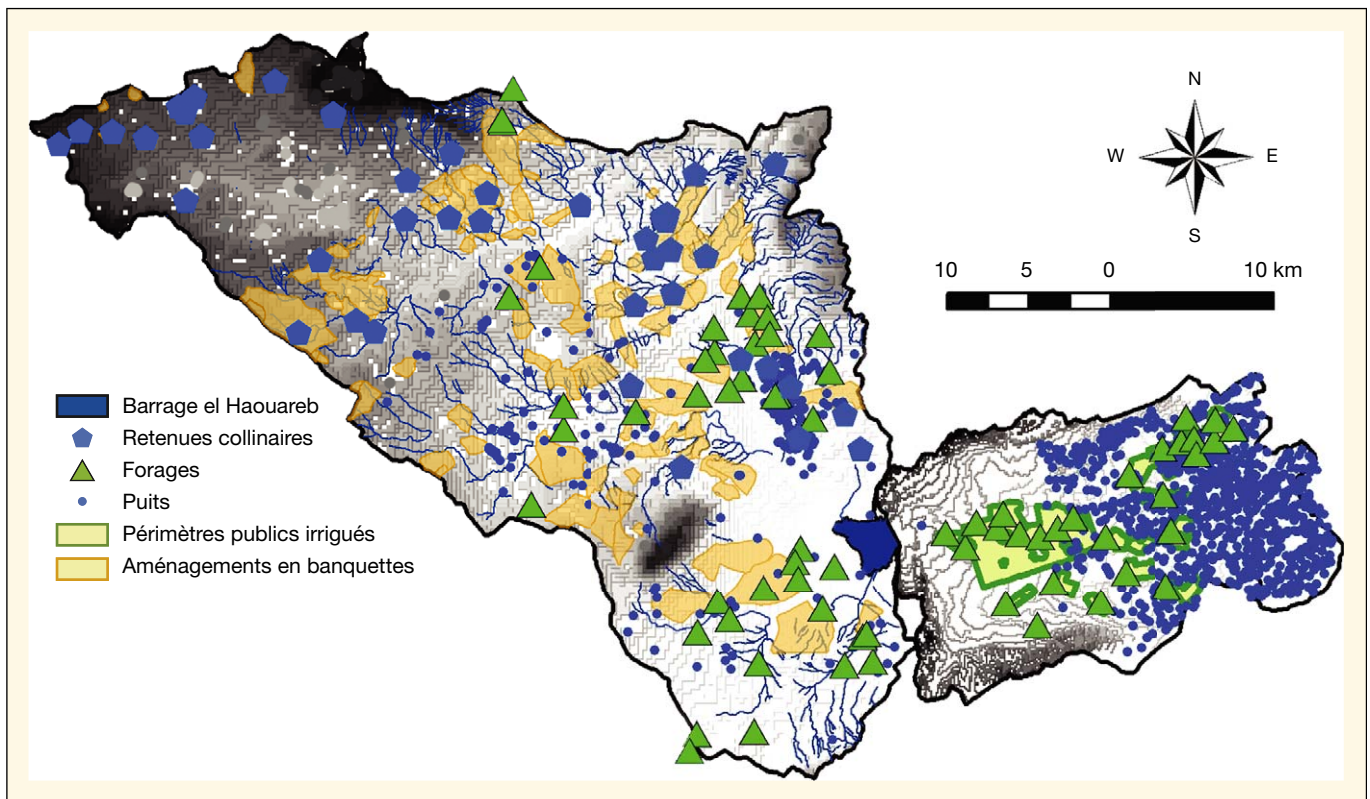


Figure 3. Les aménagements dans le bassin du Merguellil, Tunisie centrale.

retenue ou par bidons remplis. L'eau est acheminée jusqu'à la parcelle soit par des tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC), soit par des citernes.

Du fait de rendements faibles, l'irrigation des oliviers à partir des retenues est donc surtout pratiquée en période de sécheresse pour sauver les jeunes plants. La valorisation agronomique des retenues collinaires ne peut donc s'apprécier qu'en termes de volumes prélevés et destinés à l'irrigation. Les volumes d'eau apportés sont faibles, notamment pour les amandiers et les oliviers, l'utilisation des citernes est contraignante et coûteuse, ce qui diminue encore les doses apportées par cette technique.

Les différentes analyses réalisées dans le programme MERGUSIE [13] montrent que retenues et banquettes, qui drainent respectivement 11 et 17 % de la surface du bassin-versant du Merguellil, contribuent cependant à réduire de 42 et de 58 % les écoulements arrivant au barrage d'El Haouareb (figure 4). Elles montrent aussi que les retenues sont peu utilisées et que la majeure partie du stockage s'évapore. Les résultats obtenus permettent d'élaborer un bilan global du bassin en comparant la situation actuelle avec celle du bassin sans aménagements [11].

Les aménagements réduisent de 30 % le ruissellement à l'échelle du bassin, et les retenues collinaires stockent 42 % du

volume total retenu par les aménagements CES, le reste étant collecté par les banquettes. Ces résultats permettent de répartir les écoulements collectés entre le barrage El Haouareb (70 %), les banquettes (25 %) et les retenues collinaires (5 %).

Même avec les imprécisions de la méthode, force est de constater que l'impact des aménagements se traduit par des réductions des flux infiltrés et pompés, respectivement égales à 14 et 5 points, et une augmentation de 19 points des flux évaporés qui sont perdus pour toute utilisation.

Sur la base d'une production annuelle en écoulement de 20 hm³/an dans le bassin-versant, les aménagements en amont induisent donc une perte de ressource en eau de 3,8 hm³/an par évaporation. Ce volume permettrait d'irriguer entre 374 et 910 ha de cultures maraîchères avec une récolte estivale et une récolte hivernale.

En revanche, si toutes les banquettes étaient plantées en arboriculture, on obtiendrait une augmentation de 25 % de la valorisation agricole de l'eau par rapport à la situation actuelle. Par conséquent, des études complémentaires sont en cours [14] pour tester un certain nombre de mesures incitatives et réglementaires permettant d'améliorer la valorisation économique de l'eau dans la partie amont.

Développement des ressources en eau non conventionnelles

Toutes les analyses précédentes montrent les difficultés de valoriser correctement des ouvrages hydrauliques pas toujours construits dans cette optique. Pourtant, les gouvernements font des efforts notables pour apporter des correctifs et mettent en place des gestions plus complexes d'aménagements en connectant, désormais, ressources superficielles et souterraines. Cependant, les nappes continuent de baisser, et les États se tournent vers la production de ressources alternatives en eau pour alimenter des populations ciblées et diminuer les tensions.

Désalinisation des eaux saumâtres et salées

Dans le monde, 42 villes de plus d'un million d'habitants sont situées sur la côte, et 39 % de la population mondiale (environ 2,4 milliards d'habitants) vivent à moins de 100 km de la mer, sans compter la plus grande partie de la population touristique de masse, non permanente, mais très exigeante en la matière. Ces facteurs font du dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres une

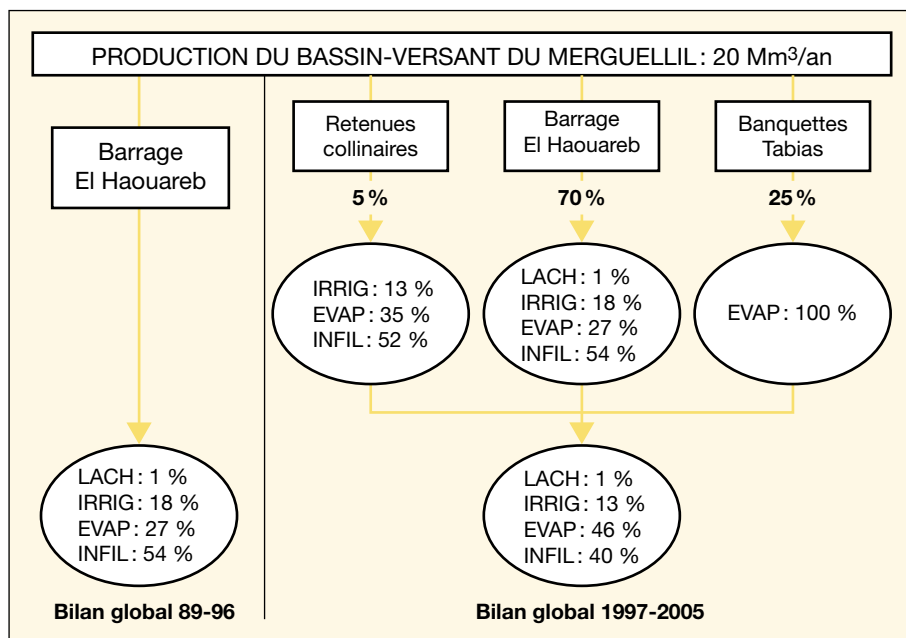


Figure 4. Répartition des écoulements avant aménagement (période 1989-1996) et après (1997-2007), dans le bassin du Merguellil.

EVAP : évaporation ; INFIL : infiltration ; IRRIG : irrigation ; LACH : lâchers.

vraie ressource alternative qui utilise une matière première presque inépuisable.

Il existe deux familles de techniques de dessalement :

- la distillation utilise l'évaporation pour séparer l'eau des sels. Elle est gourmande en énergie (100 tonnes de pétrole pour 100 m³) et donc en vogue dans les pays producteurs. Le distillat obtenu possède une très faible salinité, mais doit être minéralisée avant consommation ;
- la filtration membranaire utilise l'osmose inverse sous forte pression (80 bars) pour retenir 99 % des sels contenus dans l'eau. L'efficacité et la rentabilité de ce procédé dépendent beaucoup des prétraitements appliqués avant contact avec les membranes.

Mais une nouvelle approche hybride, couplant les deux technologies, est en train de s'imposer par sa souplesse. Elle permet d'utiliser la distillation pendant les heures creuses de consommation électrique, de mélanger les eaux distillées avec celles produites par osmose et de partager les infrastructures de prise et de rejet en mer. Les prix du dessalement ont fortement baissé grâce au développement de l'osmose inverse. Selon la zone d'implantation, la nature de l'eau brute et le coût de l'énergie, le coût du mètre cube produit oscillait, en 2006, entre 0,5 et 1 € pour l'osmose inverse et entre 0,65 et 1,7 € pour la distillation.

De par son coût, le dessalement est surtout destiné à l'alimentation en eau potable (60 %) et à l'industrie (25 %), le reste est

utilisé par l'agriculture à très forte valeur ajoutée.

Le marché du dessalement s'est beaucoup développé au début des années 2000 et, en 2005, il produisait environ 1 % de l'eau potable utilisée dans le monde, soit 25 hm³ à travers 12 500 unités de dessalement. Le Qatar comme le Koweït utilisent presque 100 % d'eau dessalée, l'Arabie Saoudite environ 50 %, par distillation et par couplage à des centrales thermiques. Les Baléares et les Canaries font appel au dessalement pour satisfaire l'afflux touristique, vital pour leur économie, de même que le sud de l'Espagne (Andalousie) qui tient en réserve un certain nombre d'usines pour éviter tout conflit entre activités touristique et agricole³. Le dessalement apporte une réponse concrète à certains manques chroniques ou saisonniers, tout en évitant toute dépendance envers un autre pays (Israël, Arabie Saoudite). Il peut soulager la surexploitation des aquifères situés dans les zones côtières.

Les deux techniques rejettent dans le milieu marin la saumure résultant du dessalement, saumure dont la plus grande concentration en sel peut affecter les écosystèmes marins. La distillation provoque des rejets de gros débits réchauffés de trois à cinq degrés et légèrement plus salés (3 à 6 g/L) que le milieu, tandis que les effluents provoqués par l'osmose ont une température peu

³ Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDYR) www.aedyr.com.

modifiée, mais une salinité double de celle du milieu de prélèvement. Ces rejets ont un impact certain sur la flore et la faune du milieu marin, mais dans les cas les plus défavorables, seulement dans une zone limitée à moins de 500 m. De nombreuses études sont en cours pour réduire les impacts des rejets.

Les techniques de dessalement sont bien maîtrisées, et celle de l'osmose inverse possède un fort potentiel d'évolution, notamment dans la durée de vie des membranes. Le dessalement est donc promis à un bel avenir dans les zones arides proches des côtes. Malheureusement, les raisonnements se sont opérés sans tenir compte des hausses prévisibles de l'énergie, ce qui rend l'avenir de cette ressource alternative plus sombre que prévu. L'énergie solaire est peut-être la solution (Baléares) avec la multiplication de petites unités indépendantes.

Réutilisation des eaux usées

La réutilisation des eaux usées consiste, par un traitement total ou partiel, à rendre à l'eau une qualité acceptable pour l'usage qui en sera fait. Les usages non potables comprennent :

- l'irrigation des terres agricoles, des espaces verts et des golfs ;
- les usages industriels comme les eaux de procédés ou de refroidissement ;
- les usages urbains comme le lavage des rues, des sanitaires et des bus, l'arrosage des parcs.

Les usages potables peuvent être directs après un traitement poussé ou, le plus souvent, indirects, après passage dans le milieu naturel par réalimentation de nappes phréatiques par exemple.

Depuis la fin des années 1990, la réutilisation des eaux usées connaît un fort développement et, actuellement, les 2 % des volumes réutilisés produisent 7,1 milliards de mètre cube, soit 0,2 % de la demande mondiale⁴. C'est l'irrigation des golfs qui se développe le plus vite dans les zones arides et semi-arides à cause de la forte demande en eau : un golf de 18 trous consomme autant d'eau qu'une ville de 15 000 habitants ! Toutes les études de marché prévoient une forte croissance dans les prochaines décennies, notamment par la hausse du niveau de vie dans des pays comme la Chine. Plusieurs pays, notamment du Maghreb, ont inclus la réutilisation dans leur politique nationale avec l'objectif de satisfaire par ce biais 20 à 30 % de leurs demandes en eau [15].

⁴ Global Water Intelligence, 2005.

Le coût de production de la réutilisation est inférieur à celui du dessalement, même si les procédés sont parfois les mêmes, car la salinité des eaux usées est inférieure. Une fois les eaux traitées à la station d'épuration, le traitement complémentaire (fonction de l'usage prévu) est réalisé par filtration, désinfection ou osmose inverse, ce qui apporte une fiabilisation de la filière de traitement. Pour une désinfection de l'eau destinée à l'irrigation urbaine, le surcoût est d'environ 0,02 à 0,07 €/m³. Pour la production d'eau de bonne qualité, les coûts de production se situent entre 0,5 et 0,7 €, sans tenir compte des frais de pompage, de stockage et de distribution [15]. Les pays leaders dans la réutilisation sont avant tout les pays développés : Japon (usages urbains), États-Unis, Israël, Mexique, Australie, Afrique du Sud (irrigation). L'Espagne et Chypre sont les plus actives en Europe, suivies de loin par la Grèce, la France et l'Italie.

En 2006, l'OMS a révisé ses normes de qualité pour chaque usage alimenté par réutilisation, et l'*Environmental Protection Agency* (EPA) des États-Unis a réactualisé les siens, en 2004, de façon plus drastique surtout en ce qui concerne l'irrigation des produits directement destinés à la consommation. On l'aura compris, la sécurité de la filière de traitement est fondamentale dans ce cas, et de nombreux pays sont en train d'adopter des réglementations très strictes sur les procédés (Australie, Afrique du Sud, Japon, Espagne et France). En plus des normes de qualité, il faut aussi mettre en place des pratiques de réutilisation appropriées afin d'assurer une protection sanitaire complémentaire : type d'irrigation autorisé, réseau de distribution parallèle, contrôle de l'accès public, sélection des cultures irriguées, éducation des ouvriers agricoles, des agriculteurs et du public. C'est donc toute une succession de normes et de pratiques qu'il s'agit de faire respecter pour aboutir à l'absence de risques sanitaires. Selon Mujeriego [16], dans les pays développés, on peut obtenir une eau d'une qualité sanitaire comparable à celle de l'eau potable. Mais dans les autres pays ?

Tant que la réutilisation concerne l'irrigation et les autres usages non potables, elle est assez bien perçue et acceptée. Dès qu'il s'agit d'usages potables, même indirects, les opinions sont partagées et controversées. Il existe encore une réelle barrière psychologique liée à la perception des eaux usées comme dangereuses ou au manque de confiance dans le respect des normes et des pratiques prévues dans la filière de réutilisation.

Pour augmenter les volumes de la réutilisation, les recherches se penchent non seulement sur les éléments techniques, mais

aussi sur les aspects sociopsychologiques à même de lever la méfiance actuelle envers cette technique. Contrairement au dessalement qui privilégie la proximité des côtes, la réutilisation peut s'effectuer dans n'importe quelle ville (station d'épuration du Caire avec un potentiel de 3 hm³/j).

Capture de l'eau atmosphérique

Même si le phénomène était connu auparavant, il faut attendre 1957 pour voir, à Antofagasta au Chili, la construction de systèmes artificiels pour condenser l'humidité atmosphérique à l'aide de filets verticaux alimentant des villages en eau potable. Cette réussite suscite un regain d'intérêt des scientifiques pour mieux comprendre les précipitations horizontales dans diverses parties du monde (Oman, Sénégal, Philippines, Maroc, Chili, Pérou, etc.).

En 1999, un chercheur espagnol met au point des équipements capables de récupérer la brume et la pluie et résistants au vent. Ces nouveaux appareils sont brevetés par une PME des Canaries⁵ qui a installé une série de stations expérimentales, couplées à des stations météorologiques automatiques, avec mesures de la densité de brume et du volume d'eau capturé en temps réel. Financées par l'Union européenne, ces recherches ont permis d'améliorer les capteurs et de définir différents types d'emplacements en fonction des usages prévus.

Actuellement, les équipements permettent de condenser l'eau présente dans la brume et les nuages bas et de la diriger vers un réservoir avant usage. L'eau obtenue est pure avec une conductivité moyenne de 0,2 µS/cm et une dureté d'environ 3,2 mg/L de CaCO₃. Il existe différents modèles de capteurs : des équipements plans pour faire face à des vents dominants violents ou des équipements polyédriques dessinés spécialement pour des zones à brume intense et vents faibles.

Dans de bonnes conditions, les nouveaux équipements produisent entre 15 et 20 L/j par mètre carré, c'est-à-dire qu'un module de base est capable de collecter au mieux 300 L/j, et qu'une station courante peut donc produire 3 m³/j. Ces quantités ne tiennent pas compte des pluies éventuelles que le module collecte de la même manière qu'une surface plane équivalente de 14 m² au sol. En 2006, le module installé revenait à peu près à 1 200 euros HT avec très peu d'entretien.

⁵ *Natural Aqua*: nataqua@canariatelecom.com.

Récolte de la rosée

On estime la ressource en eau contenue dans l'atmosphère à 12 900 km³, dont 98 % sous forme de vapeur et seulement 2 % sous forme de nuages. Une partie de cette eau se condense au petit matin en rosée, soit de fines gouttelettes qui se déposent sur des objets plus froids que l'air ambiant. Des chercheurs du CNRS⁶ ont eu l'idée de favoriser le refroidissement des toits et des talus dès la tombée de la nuit pour récolter l'eau condensée. Les surfaces sont traitées avec des peintures et des films radiatifs qui favorisent la condensation de l'eau atmosphérique et permettent une « récolte » de 0,6 L/nuit et par mètre carré de surface peinte, avec un seul impératif : un ciel dégagé. C'est donc un procédé idéal pour les zones arides.

Les peintures et les films sont élaborés avec des produits du commerce dopés de microbilles d'oxyde de titane et de sulfate de baryum qui émettent naturellement des radiations infrarouges. Cette perte d'énergie abaisse la température du support peint, mais pas suffisamment pour compenser celle amenée par les rayons du soleil. La récolte de rosée est donc nocturne.

Le procédé est déjà appliqué en Croatie, en Israël et à Tahiti et, en Inde, un système de 15 000 m² est en construction qui permettra de condenser jusqu'à 8 m³ chaque nuit. L'eau recueillie est potable selon les analyses de certaines d'échantillons récoltés dans différentes aires géographiques et passés au crible d'études chimiques et bactériologiques. Prochainement, le Maroc devrait tester l'équipement de toits terrasses avec ces techniques et leur couplage avec des cellules photovoltaïques pour apporter eau et électricité aux populations isolées.

L'eau atmosphérique et la rosée peuvent assurer la survie de populations isolées (eau potable, irrigation de jardins) ayant des revenus extra-agricoles, car les quantités extraites sont faibles. Le dessalement est confronté à la montée du prix de l'énergie et devra trouver des solutions techniques utilisant l'énergie solaire. La réutilisation des eaux usées est moins gourmande en énergie, mais devra fiabiliser toute sa procédure de traitement et d'utilisation pour lever les barrières psychologiques qui freinent actuellement son utilisation.

⁶ Laboratoire CNRS, université de Corse Pascal-Paoli « Systèmes physiques de l'environnement », laboratoire CNRS-PCI, universités Paris-VI- et VII « Physique et mécanique des milieux hétérogènes ».

Vers une gestion de la demande en eau

La mobilisation des ressources conventionnelles est de plus en plus coûteuse, car les sites favorables sont déjà équipés. Pour le moment, il s'agit avant tout de mieux utiliser les ouvrages déjà construits en favorisant les transferts vers les réservoirs souterrains pour diminuer les pertes par évaporation. Mais cela ne suffira pas pour répondre aux besoins pressants et variés d'une population mondiale en croissance continue. L'utilisation des ressources non conventionnelles constitue une solution alternative intéressante, mais ne résoudra pas non plus toutes les tensions actuelles sur la ressource, notamment sur les aquifères. Il s'agit d'éléments parmi d'autres pour essayer de rétablir les équilibres offre-demande en pratiquant une gestion optimisée de la ressource, des infrastructures et des réseaux de distribution.

Face à la multiplication des situations de surexploitation et de compétition lorsque la ressource est rare et face à l'augmentation du coût marginal de l'accès aux ressources en eau, les gestionnaires, les chercheurs et les institutions internationales ont pris conscience de l'intérêt d'une gestion de l'eau par la demande, notamment sur le pourtour méditerranéen où le déséquilibre se fait déjà cruellement ressentir [17].

Différents instruments de la gestion de l'eau par la demande

Un instrument de gestion de la demande doit être susceptible de modifier la demande de manière directe (autoritaire ou consensuelle) ou indirecte (incitative). Il est évalué selon sa pertinence : son efficacité, son acceptabilité par les usagers et la faisabilité de son application. Les principaux instruments de gestion de la demande en eau sont de trois ordres.

• Instruments techniques

Ce sont des outils visant à une utilisation plus efficace de l'eau ou encourageant l'économie d'eau :

– au niveau d'une exploitation agricole : utilisation de cultures peu consommatrices d'eau et de micro-irrigation, installation de compteurs volumétriques, électrification des pompes, le nivelage du sol (au niveau d'un foyer domestique, pose de compteurs, réseau interne plus efficace, utilisation d'appareils électroménagers moins consommateurs, etc.) ;
– au niveau d'un périmètre d'irrigation : le tracé d'un canal de distribution, un réseau basse pression ou sous-pression pour réduire l'évaporation et les pertes par percolation, une adaptation de l'offre à la demande (au niveau d'un réseau urbain,

le tracé du réseau et la détection des fuites, etc.) ;

– au niveau d'une région : l'utilisation de modèles de gestion qui permettent aux gestionnaires de mieux allouer l'eau (SIG, modèles de simulation, etc.).

La mise en place de ces divers équipements est souvent permise par des subventions ou des prêts bonifiés accordés par le gestionnaire, ou encore par un système de normes accompagné de moyens de contrôle. Dans les deux cas, ils doivent nécessairement s'accompagner d'un effort de vulgarisation.

• Instruments économiques

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

Tarifications, redevances et taxes

Les tarifications, les redevances et les taxes font payer à l'utilisateur le prix de la rareté, les frais de gestion et les frais annexes, considérant l'eau comme un bien économique. Le tarif correspond au paiement d'un bien ou d'un service, à l'unité consommée, la redevance (paiement d'un service public ou d'une concession proportionnellement à son utilisation) et la taxe (impôt autoritaire non proportionnel à un service) s'appliquent plus facilement dans le cas d'usages captant directement la ressource.

Paiement d'un droit d'accès

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

Marché de l'eau

Un marché de l'eau est un lieu d'échange de l'eau (bien matériel ou droit à prélever) entre des individus ou des collectivités. Pour qu'il fonctionne, trois conditions au moins doivent être réunies :

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

• Autres instruments

Les autres instruments pour gérer la demande en eau comportent essentielle-

ment l'éducation, les règles qui déterminent les droits d'accès, d'usage et de participation à la gestion.

Éducation et information

L'éducation et l'information peuvent inciter les usagers à l'économie et à une gestion plus efficace, mais l'effet réel se fait sentir au-delà d'une génération.

Règles d'accès et d'usage

Les règles d'accès et d'usage peuvent être imposées par une autorité centrale ou être établies par un groupe local de gestion, dans le cadre d'un consensus plus ou moins formalisé entre usagers : prescription de normes ou de droits d'eau, établissement de quotas ou de droits d'usages particuliers, définition de zones d'accès, etc.

Règles de gestion

Les règles de gestion par la demande peuvent être définies dans le cadre d'un contrat local entre usagers, établi plus ou moins formellement. Ces contrats fixent de manière concertée les objectifs à atteindre pour chaque acteur ; ce sont des règles communes, qui peuvent s'appuyer sur des droits locaux d'accès, de quotas ou d'échanges.

• Choix d'un outil de gestion

Les instruments de gestion peuvent être complémentaires, concurrents ou contradictoires. Par exemple, la tarification et le système de quotas peuvent être concurrents face à un objectif de répartition de la ressource en eau, et leur choix peut être imposé par les caractéristiques du système ou dépendre des préférences du gestionnaire (équité, équilibre budgétaire, répartition efficace). Pour la plupart des auteurs, une gestion de l'eau par la demande efficace doit reposer sur une combinaison de différentes approches pour être acceptée par les usagers, mais, à l'inverse, une combinaison d'outils trop diversifiés peut conduire à des incohérences, à des incompréhensions et à des problèmes de communication.

Enfin, le gestionnaire doit tenir compte du fait qu'une économie d'eau effective à une échelle peut avoir un effet nul à une autre échelle : par exemple, la micro-irrigation permettant d'utiliser moins d'eau à l'hectare irrigué peut entraîner une extension de la surface irriguée, le bilan sur la ressource étant inchangé, voire aggravé si les pertes par les techniques traditionnelles restaient l'eau au système par percolation.

Irrigation et techniques d'économie d'eau

En tant que plus grand utilisateur et plus grand consommateur, l'irrigation est la principale accusée des tensions sur la res-

source en eau. Cependant, l'irrigation est amenée à produire plus pour suivre la demande alimentaire mondiale, et les gouvernements se sont donc engagés à améliorer l'efficacité de leurs systèmes irrigués afin d'augmenter leur production globale, tout en maintenant ou diminuant les volumes consommés. Les premières solutions explorées sont techniques.

L'irrigation gravitaire est la plus ancienne technique d'épandage de l'eau et reste majoritairement utilisée dans le monde malgré des efficacités à la parcelle ne dépassant pas les 60 % et des efficacités globales de 35 à 40 % selon les périmètres. Elle concerne environ 80 % des superficies irriguées à l'échelle mondiale (70 % aux États-Unis), car c'est une technique très simple à mettre en place et peu exigeante en termes de moyens à l'échelle de la parcelle. En outre, comme pour toute technique traditionnelle, le savoir-faire a pu se transmettre entre générations.

• **Amélioration de l'irrigation gravitaire**
De nombreuses études ont été et sont toujours consacrées à l'amélioration de l'irrigation gravitaire et, notamment pour mieux homogénéiser l'épandage de l'eau dans la parcelle en proposant un nivellement laser, une partition des mains d'eau pour une meilleure conduite, des améliorations sur la longueur des raies en fonction des caractéristiques locales, la mise en place de débits d'attaque pour mieux répartir l'eau dans les raies, l'installation de petits ouvrages (rampes à vannettes, siphons, revêtement des canaux, etc.). Si la mise en place de ces techniques semble se faire avec succès dans un premier temps, les agriculteurs reviennent assez rapidement à ce qui fait l'intérêt de cette technique, une rusticité qui demande peu d'investissements, adaptée à de petites exploitations complexes et évolutives, exigeante en main-d'œuvre, mais peu qualifiée.

Beaucoup de raisons peuvent expliquer l'abandon progressif des techniques sophistiquées mises en place lors de l'installation ou de la rénovation des périmètres. L'irrigation gravitaire engage une

infrastructure hydraulique importante et figée, peu adaptée à l'évolution des cultures et au morcellement progressif des parcelles, inévitable pour des raisons d'héritage. Le morcellement vient également allonger le tour d'eau.

Par ailleurs, la faible participation des agriculteurs dans les processus de réhabilitation technique de leurs parcelles n'encourage pas ces derniers à entretenir les équipements dont ils ont dorénavant la charge. Ils considèrent, en effet, que les réseaux d'irrigation, de drainage et d'assainissement restent la propriété exclusive de l'État et que les redevances constituent le paiement des services rendus.

• **Irrigation par aspersion**

L'irrigation par aspersion fait l'objet d'études scientifiques et techniques très poussées tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental. En France, ces études sont, en grande partie, menées et coordonnées par l'équipe Lermi (Laboratoire d'essais et de recherche sur les matériels d'irrigation) du Cemagref d'Aix en Provence. Cette équipe travaille en étroite collaboration avec des scientifiques du Maghreb pour approfondir les bases théoriques des flux d'air et d'eau sortant des asperseurs et de leurs trajectoires dans l'atmosphère avant de retomber sur le sol [18, 19].

Ces travaux touchent tant la mécanique des fluides que la structure des sorties de canon qui va conditionner la forme de l'aspersion. Ils sont menés sur la station expérimentale du Merle (figure 5).

Les études ainsi que les évaluations des performances sont orientées vers l'obtention d'une uniformité d'aspersion sur une surface donnée quelles que soient les conditions de vent. Pour obtenir des efficacités de l'ordre de 80 % en zones arides, l'irrigation par aspersion se doit d'être technique et donc réservée à des ingénieurs et techniciens seuls capables de maîtriser le processus technique. Cela est assez flagrant au Maghreb où l'irrigation par aspersion est surtout pratiquée dans les grands périmètres publics (Gharb au Maroc, Basse vallée de la Mer-

jerda en Tunisie) sous le contrôle des offices régionaux.

Dans les exploitations privées, le matériel d'aspersion est souvent placé en dispositif mobile ou semi-mobile pour assurer une couverture totale de la parcelle cultivée à moindre coût. La mise sous-pression du réseau n'est pas du tout régulée, et les charges en sel généralement élevées viennent obstruer ou modifier la diffusion des jets d'eau par les asperseurs. Dans ces conditions d'exploitation, le recouvrement uniforme des surfaces irriguées n'est plus du tout assuré, et l'efficacité réelle descend fortement. L'observation montre que les agriculteurs délaissent la technique d'aspersion pour essayer l'irrigation par goutte-à-goutte qu'ils maîtrisent beaucoup mieux [20].

• **Irrigation localisée par goutte-à-goutte**

L'irrigation localisée, par goutte-à-goutte (comme l'irrigation enterrée), est en forte progression depuis l'arrivée des matériaux de pompage et de distribution économiques dans les années 1970-1980. Elle devrait progresser encore avec les mesures incitatives et l'augmentation du prix de l'eau. Outre l'économie de ressources, ces techniques permettent d'utiliser des eaux saumâtres, puisque les doses sont appliquées au niveau racinaire sans contact avec le feuillage, même s'il subsiste un danger de salinisation ou de sodisation des sols.

L'irrigation par goutte-à-goutte utilise un système sous pression pour forcer l'eau dans des tuyaux perforés posés au-dessus du sol avec un débit variant de 1 à 10 L/h et par goutteur. Malgré la simplicité de la technologie, la méthode nécessite à la fois un investissement de départ et un entretien sérieux, car les goutteurs se bouchent facilement.

Selon des études de la FAO⁷, menées dans plusieurs pays arides et semi-arides, les agriculteurs qui passent de l'irrigation gravitaire ou de l'aspersion au goutte-à-goutte peuvent diminuer leur consommation de 30 à 50 %. Souvent, les rendements augmentent en même temps, car les plantes bénéficient d'apports directs au niveau de leurs racines de doses d'eau et de fertilisant (fertirrigation). Là encore, on rencontre, pour une même technique, deux pratiques analysées en Tunisie dans les années 2000 :

- des réseaux goutte-à-goutte, équipés de goutteurs régulateurs de pression situés au pied de chaque plant dont la valeur oscille autour de 1 670 € l'hectare ;
- des tuyaux plastiques très bon marché, que l'on déplace de ligne de culture en



Figure 5. Banc d'asperseurs, station expérimentale du Merle, Lermi, Cemagref Aix en Provence.

⁷ FAO, eau et agriculture, produire plus avec moins d'eau, 2002.

ligne de culture, prépercés sans goutteurs, avec des écarts de perçage standards sans correspondance avec la culture pratiquée et d'une durée de vie courte, voire très courte, mais dont le coût d'installation se situe autour de 280 euros l'hectare.

Dans des pays en voie de développement où la main-d'œuvre est abondante et les capitaux rares, la première pratique ne peut se faire sans incitation financière, et seulement pour des cultures à rendement économique élevé. C'est donc la pratique rustique qui tend à s'imposer dans les petites et moyennes exploitations, mais, là, les rendements sont bien inférieurs à ceux annoncés dans les études théoriques. C'est d'autant plus vrai que les pratiques d'irrigation par goutte-à-goutte sont mal conduites par des populations mieux habituées au gravitaire et qui appliquent des doses massives trop espacées dans le temps, selon leurs habitudes antérieures.

Le goutte-à-goutte rencontre un fort succès au Maghreb, car il permet de cultiver melons, pastèques et tomates qui sont très appréciés par la population touristique, ce qui provoque une forte progression des revenus.

• Irrigation enterrée

Certains systèmes d'irrigation enterrée relèvent de techniques simples qui ne nécessitent pas d'achats coûteux d'équipement, mais exigent beaucoup de main-d'œuvre. L'une des plus anciennes méthodes consiste à placer des pots en terre poreux dans le sol autour des arbres fruitiers et le long des lignes de culture. Les tuyaux poreux ou perforés enterrés ont la même fonction avec quelques incertitudes sur les débits d'applications difficiles à contrôler.

La technique des pots en terre a été revisitée récemment par Mathieu [21] qui a mis au point un système original d'irrigation adapté à la fois aux ressources en eau très limitées des zones semi-arides et aux méthodes de culture à espacement des agriculteurs du Sahel. Cette méthode conduit rapidement l'eau à une profondeur de 0,5 à 1 m où elle échappe à l'évaporation et constitue une réserve d'humidité au niveau des racines. Dénommée Irrigasc⁸, cette technique a été validée par le Cemagref.

Le dispositif consiste à enterrer une gaine plastique d'1 m, le long d'un plant d'arbre, ou de 50 cm, près de plantes vivrières. Cette gaine, en forme de manchon, est percée de très petits orifices et remplie de terre ou de compost. Au niveau du sol, cette gaine est surmontée d'un récipient sans

fond dans lequel est versée l'eau d'arrosage.

La méthode d'irrigation par semi-conduite verticale semble rencontrer un certain succès dans les pays sahéliens et, particulièrement, au Sénégal.

• Économie d'eau et valorisation économique

Les techniques décrites précédemment sont censées produire plus avec moins d'eau *more crop per drop*, ce qui est généralement le cas, même si les performances attendues sont loin d'être réalisées sur le terrain. En revanche, leur mise en place peut provoquer une augmentation des prélèvements à des niveaux d'échelle plus amples que la parcelle.

Ainsi, par une étude de simulation, S. Feuillette [20] a montré que la politique gouvernementale tunisienne favorisant l'implantation du « goutte-à-goutte » provoquait une augmentation sensible des prélèvements globaux sur la nappe de Kairouan. Les résultats de cette simulation, qui sont présentés dans le paragraphe suivant, ont été ensuite validés par un retour d'expérience auprès des irrigants.

Passage à l'irrigation localisée en Tunisie : impacts et conséquences

Le bassin du Merguellil a déjà été choisi pour analyser l'impact et la valorisation des aménagements hydrauliques (cf. § 1.4), il servira également d'exemple pour illustrer les modes d'utilisation des outils de gestion de la demande et simuler le comportement des usagers. On s'intéressera particulièrement à la partie aval du bassin derrière le barrage d'El Haouareb (figure 3).

• Problématique

La nappe de Kairouan, qui constitue la ressource en eau souterraine la plus importante de la Tunisie centrale, subit un rabattement continu depuis une vingtaine d'années. L'abaissement se fait sentir sur l'ensemble de la zone et s'est accru ces dernières années (figure 6) provoquant un risque de contamination des nappes profondes par les eaux de l'aval, dont la salinité est élevée [22].

Les prélèvements sont destinés à l'irrigation à hauteur de 80 %, et les irrigants reçoivent l'eau soit dans des périmètres publics desservis par forages collectifs, soit par des puits individuels. Ces derniers sont les plus gros préleveurs et demeurent très mal connus.

Pour tenter d'enrayer la surexploitation, les autorités sont d'abord intervenues sur l'offre à travers la gestion des barrages, puis sur la demande, en instaurant une « zone de sauvegarde » censée contraindre la construction de nouveaux

captages. Mais dans les faits, la nappe de Kairouan demeure une ressource collective en accès libre : la réglementation restrictive n'est pas respectée, et les puits continuent de proliférer. L'outil réglementaire est d'autant plus difficile à appliquer que la police des eaux est assurée par l'institution chargée du développement régional [3].

Les autorités s'interrogent sur les outils de gestion de la demande efficaces et acceptés par les usagers, pour enrayer la surexploitation. L'étude porte sur la réaction des agriculteurs face à différentes mesures envisagées par le gouvernement, et notamment des incitations financières, pour passer du gravitaire au goutte-à-goutte.

• Modélisation des comportements par simulation multi-agents (SMA)

Dans le cas de la nappe de Kairouan, le modèle de simulation doit représenter les interactions offre-demande, mais aussi les stratégies d'investissement des agriculteurs (l'accroissement des prélèvements provenant surtout de l'apparition des puits) et les interactions entre agriculteurs (du fait de leur impact sur la demande en eau). Les modèles classiques de fonctionnement de la demande en eau agricole ne représentent que les décisions tactiques d'irrigation ou les stratégies d'assolement des agriculteurs. De plus, ils représentent rarement les processus régissant l'offre et la demande conjointement, ce qui est pourtant nécessaire à la prise en compte de leurs liens dynamiques. Au contraire, les systèmes multi-agents (SMA) issus de l'intelligence artificielle distribuée et basés sur le principe de la distribution des interactions sont tout à fait adaptés à la représentation des interactions ressources-sociétés et permettent de tenir compte des comportements dans leur diversité.

Le modèle Sinuse (simulations des interactions entre nappe et usages de l'eau) représente les interactions entre agriculteurs et nappe, aux échelles de temps saisonnières et interannuelles. Sinuse représente un schéma réduit du système étudié (25 000 ha), tout en respectant les proportions des paramètres essentiels. La définition de l'espace du modèle se fait sur une grille rectangulaire de 2 400 cellules, chacune d'elles représentant 1 hectare [23].

Le modèle comporte trois types d'entités :
– des entités sociales, les exploitants ;
– des entités spatiales comme les zones de la nappe, les parcelles, les périmètres collectifs d'irrigation ;
– des entités passives (et situées) comme les puits.

Le pas de temps adopté pour la description des interactions entre ces entités est l'année, découpée en deux saisons de

⁸ www.irrigasc.com.

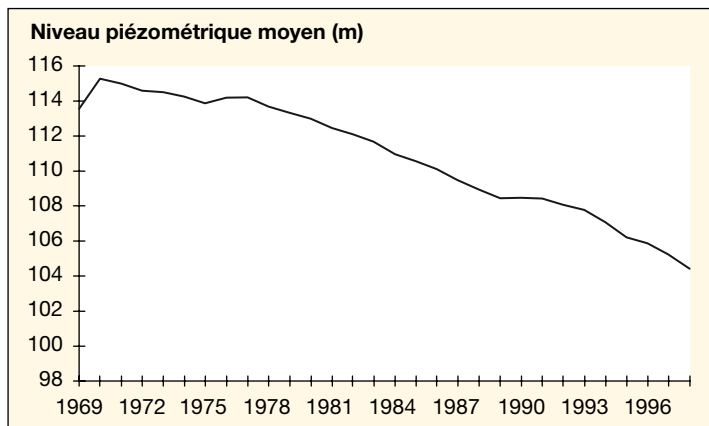


Figure 6. Baisse du niveau piézométrique moyen dans la nappe de Kairouan en aval du barrage d'El Haouareb.

culture. Les décisions d'investissement s'opèrent à une échelle interannuelle. Les apports pluviométriques pour chaque type de culture reposent sur la chronique locale des 20 dernières années.

Les exploitants prennent plusieurs types de décisions pour assurer le fonctionnement et la progression du système d'exploitation familial : assolement saisonnier, échanges fonciers annuels, construction de puits, ventes/achats et locations de terre. La description des règles qui régissent ces comportements repose sur un important travail d'enquêtes sur le terrain (approfondies et statistiques).

• Introduction du goutte-à-goutte

Dans ce scénario, tous les agriculteurs doivent s'équiper du goutte-à-goutte pro-

portionnellement à la surface qu'ils irriguent en été, moyennant une aide publique importante. Cet équipement n'est utilisé que pour l'irrigation du maraîchage d'été et de l'arboriculture fruitière ; les irrigations de l'olivier, des céréales et du maraîchage d'hiver de plein champ demeurent traditionnelles (à la planche et à la raie). L'irrigation de l'olivier est suspendue dès que leur marge brute est négative.

L'investissement dans un équipement goutte-à-goutte est réalisé chaque fois qu'un nouveau puits est créé. L'efficacité moyenne de la distribution de l'eau au goutte-à-goutte est estimée en fonction des observations faites sur des situations similaires dans d'autres régions de Tunisie. L'augmentation du rendement est très

importante grâce à une meilleure fertilisation.

Ce scénario d'intervention (en noir dans la figure 7) est simulé plusieurs fois en raison des paramètres stochastiques sur une période de 30 ans et comparé au scénario de référence (en grisé dans la figure 7) qui consiste à simuler, également plusieurs fois, l'évolution du système sans aucune intervention, sur la même période de 30 ans.

Les résultats issus de la mise en œuvre du modèle reflètent une accélération assez forte de la baisse de la nappe (figure 7C), soit une augmentation régulière des prélèvements globaux confirmée par l'augmentation concomitante des puits (figure 7A) qui viennent également envahir les périmètres publics comme l'indique la figure 7B.

On note également une baisse assez marquée des exploitations endettées (figure 7D). Les agriculteurs s'enrichissent dès la première année, parce que le passage au goutte-à-goutte est financé, à hauteur de 60 %, par le gouvernement, et que cette technique leur permet de cultiver pastèques et melons qu'ils vendent à très bon prix aux hôtels de la côte situés à 100 km seulement de cette zone.

Les années suivantes, ils vont donc chercher à augmenter leur production par tous les moyens : augmentation des surfaces irriguées et locations de nouvelles terres, augmentation des puissances de pompage avec changement de pompes ou creusement de nouveaux puits. Le marché touristique est suffisamment fort pour

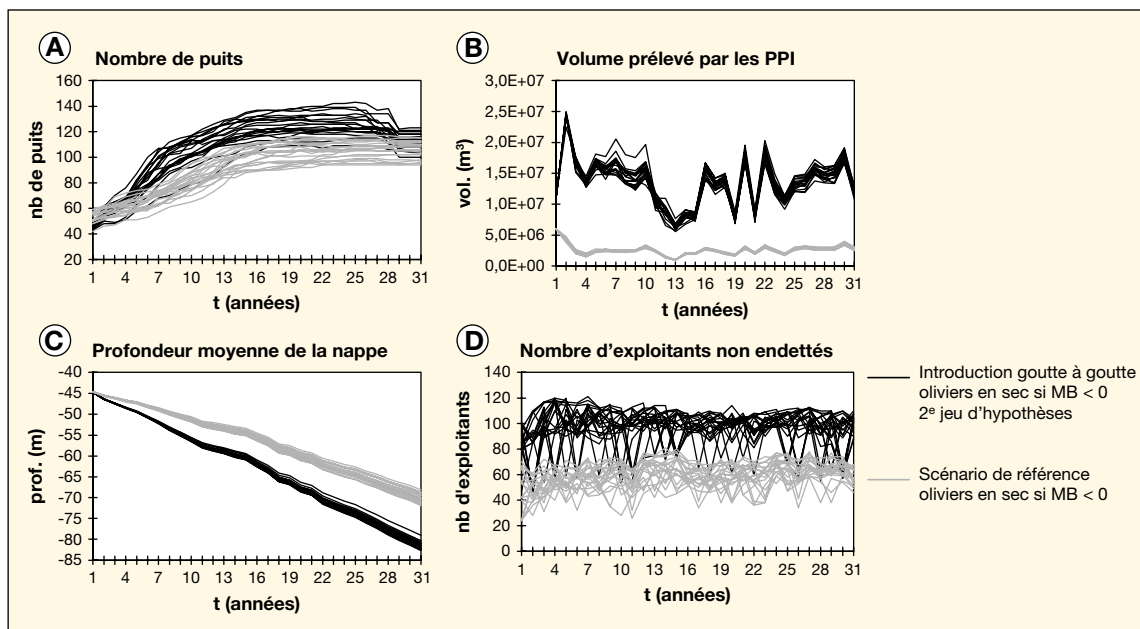


Figure 7. Introduction généralisée du goutte-à-goutte pour l'irrigation et comparaison avec le scénario de référence.

absorber cette augmentation de production sans que les prix chutent.

En conclusion, ce passage à une irrigation localisée, appliqué sans mesure d'accompagnement, produit des effets inverses à ceux voulus par l'administration tunisienne. Le goutte-à-goutte provoque bien une meilleure valorisation de l'eau, mais, en revanche, il augmente les prélèvements globaux sur la nappe et accélère donc la baisse de son niveau. Ces résultats de simulation, reçus avec scepticisme par les autorités, ont été agréés par les agriculteurs qui ont validé ces comportements lors d'un retour d'expérience.

• Discussion

Des simulations complémentaires ont montré que l'introduction du goutte-à-goutte, combinée avec la mise en place d'un quota et avec une facturation très forte des dépassements, donne les meilleurs résultats : enrichissement raisonnable des agriculteurs par une meilleure valorisation de l'eau et diminution assez nette des prélèvements globaux. L'administration tunisienne étudie les possibilités d'application de ces mesures à partir d'une électrification de l'ensemble des pompes, de l'installation systématique de compteurs électriques triphasés et de l'implication de l'Entreprise nationale d'électricité pour recouvrer les paiements.

La littérature montre que l'utilisation des instruments de gestion de la demande doit être combinée pour être efficace et répondre clairement aux questions posées.

Conclusion

Parmi les nombreux pays en développement à posséder des territoires arides et semi-arides, certains subissent une forte croissance démographique, tandis que d'autres sont soumis à des afflux saisonniers de population (tourisme estival en Méditerranée par exemple).

Dans ces territoires, l'accès à l'eau est déjà un problème pour certains usagers, avec parfois de graves crises d'approvisionnement. Par ailleurs, les modèles climatiques globaux semblent concorder pour y prédire une diminution des précipitations.

Produire plus, pour suivre la demande alimentaire de leurs populations croissantes, mais en consommant moins d'eau, pour satisfaire également les autres demandes, tel est le défi proposé à ces territoires pour faire face aux tensions actuelles et aux conflits annoncés.

Les gouvernements ont d'abord proposé la mise en place d'aménagements hydrauliques de tailles différentes, échelonnés suivant leur fonction dans tout l'espace du

bassin, avec un objectif de conservation des eaux et des sols. Le stockage de l'eau est réalisé dans la zone aérée du sol (l'eau verte, en termes de gestion) ou dans les réservoirs superficiels et souterrains (l'eau bleue). Toutes les études montrent une faible valorisation de ces ouvrages à l'exception des aquifères.

Ils se sont dirigés ensuite vers la production de ressources non conventionnelles ou alternatives qui ont du mal à se développer soit par leur coût (dessalement), soit du fait de barrières psychologiques (réutilisation des eaux usées).

Enfin, la tendance actuelle se dirige vers la mise en place de pratiques d'usages économes en eau telles que l'irrigation localisée. Mais là encore, les techniques éprouvées en stations expérimentales ou en laboratoire ne sont pas d'une réelle efficacité sur le terrain si elles ne sont pas couplées avec d'autres outils de gestion, de formation et de vulgarisation.

La définition des principes de gestion intégrée, leur dissémination à travers les grands congrès internationaux consacrés à l'eau et l'effort qui est fait au niveau international pour les mettre en application tiennent compte des diagnostics antérieurs. D'après le deuxième principe de Dublin⁹, le développement et la gestion de l'eau devraient être fondés sur une approche participative impliquant usagers, planificateurs et décideurs à tous niveaux. Il est certain que l'application de ce principe aurait évité la construction de banquettes sur des terres de parcours ou la construction de retenues collinaires dans des endroits déserts, éloignés de tout utilisateur potentiel.

Selon le quatrième principe, pour tous ses différents usages, souvent concurrents, l'eau a une dimension économique et doit être considérée comme un bien économique et social. En clair, ce principe rappelle l'efficacité du couple subvention-réglementation pour amener les usagers à appliquer les pratiques d'usages économes en eau.

C'est donc une gestion complexe qui est en train de se mettre en place, dans laquelle les techniques de mobilisation et d'usages de l'eau sont un élément parmi d'autres. ■

⁹ La Conférence internationale sur l'eau et l'environnement, réunie à Dublin du 26 au 31 janvier 1992, proposait un certain nombre de mesures concertées s'inspirant de quatre grands principes : (1) l'eau douce – ressource fragile et non renouvelable – est indispensable à la vie, au développement et à l'environnement ; (2) la gestion et la mise en valeur des ressources en eau doivent associer usagers, planificateurs et décideurs à tous les échelons ; (3) les femmes jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement, la gestion et la préservation de l'eau ; (4) l'eau, utilisée à de multiples fins, a une valeur économique et devrait être reconnue comme un bien économique.

Références

1. Genin D, Hafani A, Cialdella N, et al. L'agriculture dans la Jeffara : entre permanences et bouleversements, quelle place dans la reproduction des systèmes ruraux ? In : Genin D, Guillaume H, Ouessar M, eds. *Entre désertification et développement, la Jeffara tunisienne*. Tunis : IRD ; Cérès Editions ; IRA, 2006.
2. Pérennes JJ. *L'eau et les hommes au Maghreb - Contribution à une politique de l'eau en Méditerranée*. Paris : Karthala, 1993.
3. Feuillet S, Le Goulven P, Bachta MS. *Les pouvoirs législatifs, réglementaires et juridiques en Tunisie confrontés à la gestion des nappes souterraines*. Colloque SFER « L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde », Montpellier, 19-20/11/1998.
4. Lazzaro X. *Vers une meilleure gestion des açudes du Nordeste brésilien*. Fiche scientifique, n° 111. Paris : IRD, 2000.
5. Antonino A, Audry P. La culture de décrue, technique traditionnelle adaptée et perfectible. *Sciences au Sud, le journal de l'IRD* 2001 ; 8 : 4.
6. Cadier E, Dubreuil P. *Influence de la taille et du nombre de retenues sur le régime hydrologique de petits bassins du Nordeste du Brésil*. Dix-neuvièmes Journées de l'hydraulique « L'impact des activités humaines sur les eaux continentales », Société hydrotechnique de France (SHF), Paris, 9-11/09/1986.
7. Estrada Avalos J, Le Goulven P, Lamachère JM. *La gestion de l'eau dans le ranch Atotonilco en zone semi-aride du Nord-Mexique*. Séminaire international sur les petits barrages dans le monde méditerranéen, Tunis, 28-31/5/2001. Tunis : IRD; INRGRF, 2001.
8. Nasri S, Albergel J, Berndtsson R, Lamachère JM. Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant. *Rev Sci Eau* 2004 ; 17 : 265-89.
9. Lévêque C. Les retenues collinaires ou « petits barrages » en régions chaudes. (encadré 1.5). In : Académie des sciences. *Les eaux continentales*. Rapport Science et Technologie, no 25. Les Ulis (France) : EDP éditions, 2006.
10. Mechergui M. *La petite hydraulique et son impact sur la vie du paysan, les eaux de ruissellement, la conservation en eau et en sol et les ressources en eau vers l'aval dans un bassin versant: cas de deux bassins versants de Siliana et du Kef en Tunisie*. Relations terre - eau dans les bassins versants ruraux. Atelier électronique 18 septembre-27 octobre 2000. Étude de cas 18. Rome : Food and Agriculture Organisation (FAO), 2000.
11. Lacombe G. *Évolution et usages de la ressource en eau dans un bassin versant aménagé semi-aride. Le cas du Merguellil en Tunisie centrale*. Thèse de doctorat, université de Montpellier II, 2007.
12. Favreau G, Leduc C, Schroeter P. Reply to comment on «Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger» by Leduc C, Favreau G, Schroeter P. *J. Hydrol* 2001 ; 243 : 43-54. *J Hydrol* 2001 ; 255 : 263-5.
13. Le Goulven P, Bourges J, Bachta MS, Khallel R. *Programme National Mobilisateur MERGUSIE*,

Gestion intégrée de l'eau dans le Merguellil. Rapport de synthèse. Tunis : IRD; SERST, 2000.

14. Albouchi L. *Gestion de l'eau en Tunisie : d'une politique de mobilisation à une politique de réallocation de la ressource selon sa valorisation économique. Cas du bassin versant du Merguellil, Tunisie Centrale*. Thèse de Doctorat, université Montpellier I, Sciences économiques, spécialité « Economie de développement agricole, agro-alimentaire et rural », 2006.

15. Lazarova V, Bahri A, et al. *Irrigation with recycled water : agriculture, turfgrass and landscape.*, catalog n° L1649. Boca Raton (Floride, États-unis) : CRC Press, 2005.

16. Mujeriego R. La reutilización, la regulación y la desalación del agua. *Ingeniería y Territorio, revista del Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos* 2005 ; 72 : 16-25.

17. Hamdi A, Lacirignola C. *Water: a strategic resource throughout the Mediterranean Basin. Agriculture et développement durable en Méditerranée*, 10-12 mars 1997, Montpellier. Montpellier : Agropolis ; Ademe, 1997.

18. Hendawi M. *Analyses des pertes d'eau par évaporation et transport en aspersion en liaison avec la granulométrie des gouttes*. Thèse de Doctorat de l'université Aix-Marseille 1, Aix en Provence, 2005.

19. Khadem N. *Modélisation du jet d'un canon d'irrigation*. Thèse de Doctorat de l'université Aix-Marseille 1, Aix en Provence, 2005.

20. Feuillette S. *Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressources usages par les systèmes multi-agents. Application à la nappe de Kai-*

rouan, Tunisie Centrale. Thèse de Doctorat, université Montpellier II, 2001.

21. Mathieu C. Une méthode d'irrigation par semi-conduites verticales adaptée aux zones sahéliennes. Résultats techniques, et prospective de l'organisation des filières. *Tropicultura* 2006 ; 24 : 120-3.

22. Besbes M. *Étude hydrogéologique de la plaine de Kairouan sur modèles mathématiques*. Tunis : Direction des Ressources en Eau, 1975.

23. Feuillette S, Bousquet F, Le Goulven P. SINUSE: a multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table. *Environ Model Softw* 2003 ; 18 : 413-27.