

Irrigation avec les eaux souterraines pour atteindre les Objectifs de Développement Durable sur l'éradication de la faim : espoirs et limites pour l'Afrique Sub-Saharienne

Yvan Altchenko¹, Riccardo Biancalani², José Luis García Aróstegui³, Karen Villholth⁴ et Agnès Ducharne⁵.

Introduction

La sécurité alimentaire a été identifiée comme une préoccupation mondiale croissante, dans le contexte du changement climatique (par exemple : augmentation de la température, variabilité des précipitations, sécheresses et inondations) (Beltran-Peña et D'Odorico, 2022 ; El Bilali *et al.*, 2020 ; Turrall *et al.*, 2011 ; Taylor *et al.*, 2013 ; Wheeler et Von Braun, 2013), et de l'augmentation de la population (Godfray *et al.*, 2010 ; Grafton *et al.*, 2015 ; Molotoks *et al.*, 2021), particulièrement pour les populations pauvres des régions arides et semi-arides. Les Nations Unies ont adopté les 17 Objectifs du Développement Durable (ODD) à l'horizon 2030 le 25 septembre 2015⁶. L'ODD 2 est axé sur l'élimination de la faim, la sécurité alimentaire, l'amélioration de la nutrition et la promotion de l'agriculture durable. Il est divisé en huit cibles et quatorze indicateurs⁷. Bien que les liens entre les objectifs et les cibles soient complexes, car les mesures prises pour atteindre un objectif peuvent se renforcer mutuellement ou aller à l'encontre de l'atteinte d'un autre (Zhou et Moinuddin, 2017), cet article se concentre principalement sur l'ODD 2, cibles 2.1 et 2.4, tout en considérant spécifiquement l'impact de l'exploitation des eaux souterraines sur la sécurité alimentaire et les ressources en eau (qui est lié à l'ODD 6, cible 6.4). La cible 2.1 de l'ODD 2 est l'élimination de la faim d'ici 2030, et l'accès de tous à une alimentation sûre, nutritive et adéquate tout au long de l'année, en particulier des pauvres et des personnes en situation vulnérable, y compris les nourrissons. La cible 2.4 de l'ODD 2 consiste à assurer des systèmes de production alimentaire durables d'ici 2030 et à mettre en œuvre des pratiques agricoles résilientes qui augmentent la productivité et la production, contribuent à préserver les écosystèmes, renforcent la capacité d'adaptation au changement climatique, aux conditions météorologiques extrêmes, à la sécheresse, aux inondations et à d'autres catastrophes, tout en améliorant progressivement la qualité des terres et des sols. Dans le contexte de la croissance démographique, du changement climatique et d'un regain d'intérêt, l'irrigation peut jouer un rôle crucial dans la sécurité alimentaire si elle est développée durablement, et permettre

d'atteindre ces ODDs. En effet, Domènech (2015) a décrit certains des avantages de l'irrigation : elle réduit la vulnérabilité à la sécheresse et au changement climatique, assure une plus grande disponibilité et stabilité des approvisionnements alimentaires pendant la saison sèche et peut permettre de diversifier les régimes alimentaires par la diversification des cultures (par exemple : les fruits et légumes). L'objectif de cet article est d'apporter des clés de compréhension sur le contexte qui permettrait de réduire la faim en Afrique Sub-Saharienne (ASS) avec le développement durable de l'irrigation avec les eaux souterraines. Tout d'abord, le document présente comment l'irrigation avec des eaux souterraines peut atténuer l'insécurité alimentaire. Ensuite, il discute des limites de l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation et le développement à l'échelle de l'ASS. Et enfin, il traite du lien entre les eaux souterraines, l'alimentation et l'énergie.

L'irrigation avec des eaux souterraines : un outil pour réduire l'insécurité alimentaire

Bien qu'il existe plusieurs techniques pour réduire la faim et l'insécurité alimentaire (par exemple : l'importation de nourriture, l'aide alimentaire humanitaire, ou l'influence du pays sur le prix des aliments en subventionnant l'accès à la nourriture), l'irrigation a longtemps été reconnue comme faisant partie des fondamentaux qui permettent d'atteindre la sécurité alimentaire et réduire la pauvreté (Polack, 2005), et elle est toujours reconnue comme un élément critique pour atteindre les ODDs et augmenter la sécurité alimentaire (AU *et al.*, 2017), notamment en ASS qui présente un niveau élevé d'insécurité alimentaire avec plus de 20% de la population qui souffre de sous-alimentation alors que moins de 10% en souffre en Asie (Fig. 1) et un faible degré global d'irrigation (Baptista *et al.*, 2022). La croissance et le développement des cultures sont soumis à des facteurs abiotiques (par exemple : le manque d'eau et de nutriments) et biotiques (par exemple : les ravageurs et les maladies) qui réduisent le rendement (Haverkort et Schapendonk, 1994). En

1. AgroParisTech (France) et UMR G-EAU (France).

2. FAO (Italie).

3. Service géologique d'Espagne, IGME CSIC (Espagne) et Université de Murcie (Espagne).

4. Water Cycle Innovation (Pty) Ltd (Afrique du Sud).

5. CNRS (France), UMR METIS (France) et Sorbonne Université (France).

6. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2015/09/historic-new-sustainable-development-agenda-unanimously-adopted-by-193-un-members>

7. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg2>

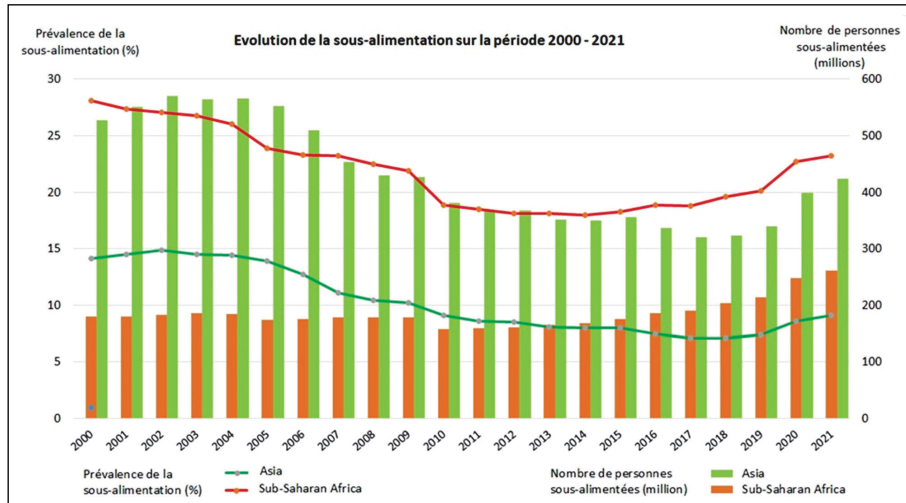


Figure 1. Évolution de la sous-alimentation en Afrique et Asie sur la période 2000 - 2021 (source : FAOSTAT⁸).

raison de ces facteurs de stress environnemental, il y a une limitation de l'atteinte du rendement potentiel des cultures (Fageria *et al.*, 2010). Cependant, les agriculteurs peuvent contrôler certains facteurs via des pratiques de gestion des cultures appropriées (par exemple : l'eau, les caractéristiques des cultivars⁹, les nutriments, la lutte contre les insectes et les maladies) afin d'augmenter le rendement des cultures. L'augmentation du rendement des cultures peut être ventilée entre les contributions des variétés de cultures à haut rendement et les contributions de tous les autres intrants (tels que les engrais, l'irrigation, la mécanisation et la main-d'œuvre).

Il est prouvé que l'irrigation stimule considérablement la productivité des cultures. Les investissements dans l'irrigation en Asie entre les années 1960 et 1980 ont joué un rôle essentiel en facilitant l'adoption d'un large éventail de technologies d'amélioration de la productivité lors la révolution verte¹⁰ (Pingali *et al.*, 2016). Malheureusement, l'ASS a connu une révolution verte peu performante en raison des difficultés de la région à produire des variétés de cultures à hauts rendements adaptées aux conditions agroécologiques complexes (Evenson et Gollin, 2003). Cette situation s'est traduite par une augmentation relativement faible du rendement des cultures de 38 % en ASS, contre une augmentation de plus de 75 % en Asie au cours de la période 1961-2007 (Alexandros et Bruinsma, 2012). Les pays d'Asie et d'Amérique latine ont connu une augmentation des rendements et une accélération de la production agricole au cours des années 1960 et 1970 grâce à l'adoption de variétés de blé, de riz et de maïs à hauts rendements, combinée à l'utilisation intensive d'intrants tels que les engrais et l'irrigation (Nin-Pratt et McBride, 2014). Aussi, la situation actuelle en ASS suggère que l'augmentation du rendement des

cultures peut être accomplie principalement grâce aux intrants agricoles, y compris l'irrigation, bien qu'il existe encore un potentiel pour le développement de variétés de cultures à hauts rendements.

Mueller *et al.* (2012) démontrent que la variabilité du rendement mondial est principalement dictée par la variabilité de l'utilisation des engrais, de la disponibilité de l'eau, y compris l'irrigation, et du climat. Si certaines cultures, par exemple le sorgho, sont plus sensibles à la température, d'autres, comme l'orge, sont

très réactives à une meilleure gestion des nutriments et de l'eau. Des augmentations de rendement de 45 % à 70 % sont possibles pour la plupart des cultures grâce à une meilleure gestion des nutriments et de l'eau. À titre d'exemple, l'ASS présente des possibilités considérables d'intensification à court terme pour les principales cultures : l'écart de rendement du maïs peut être augmenté jusqu'à 50 % de son rendement maximum à l'échelle mondiale en s'attaquant principalement aux carences en nutriments et peut être encore augmenté jusqu'à 75 % de son rendement maximum en augmentant à la fois l'irrigation et l'application de nutriments (Muller *et al.*, 2012).

Il existe plusieurs exemples dans le monde qui indiquent que l'irrigation des terres cultivées auparavant non irriguées a été la principale raison de l'augmentation du rendement et de la productivité des cultures. Fischer *et al.* (2014) démontrent que le rendement du blé en Nouvelle-Zélande a doublé entre 1990 et 2010 parce qu'il y a eu une transition de 0 à 80 % de surface irriguée au cours de cette période. Le rendement du riz dans les terres cultivées non irriguées en Asie du Sud-Est n'était que de 60 % du rendement obtenu dans les zones irriguées ; des différences de rendement similaires ont été constatées pour le blé en Asie centrale et les céréales en Argentine et au Brésil (Godfray *et al.*, 2010). Siebert et Döll (2010) ont calculé les pertes de production potentielles sans irrigation pendant la période 1998-2002. Ils montrent que la perte de production pour les céréales en Afrique est proche de 80 % en l'absence d'irrigation (par rapport à la production dans les zones irriguées), ce qui correspond à une hausse importante du rendement des cultures céréalières, passant de 1,02 t/ha dans les zones non irriguées à 4,28 t/ha dans les terres irriguées. L'irrigation joue donc un rôle important dans l'augmentation du rendement des cultures, de la

8. <https://www.fao.org/faostat/fr/#home>

9. Un cultivar est une variété de plante obtenue en culture, généralement par sélection (Wikipedia).

10. Le terme « révolution verte » a été utilisé pour la première fois par William Gaud en 1968 lors d'un discours intitulé « The Green Revolution : Accomplishments and Apprehensions » à la Society for International Development à Washington (USA) et se réfère maintenant à la période durant laquelle des améliorations spectaculaires des rendements dues au développement de variétés de cultures à haut rendement, à l'expansion des infrastructures d'irrigation, à la modernisation des techniques de gestion et à une meilleure et plus large utilisation des engrais et des pesticides ont eu lieu.

production alimentaire et de la sécurité alimentaire, surtout lorsqu'elle est complétée par une utilisation judicieuse des intrants (comme les engrais et pesticides).

Néanmoins, le développement de l'irrigation en Afrique a été très lent par rapport aux autres continents. Si on analyse les statistiques de la FAO, le taux de développement de la superficie équipée avec de l'irrigation semble être élevé en Asie par rapport à l'Afrique, qui n'a augmenté sa superficie équipée pour l'irrigation que de 8,4 millions d'hectares sur la période 1970-2020, alors que l'Asie a connu une augmentation de 126,7 millions d'hectares sur la même période. De même, l'augmentation du pourcentage de terres cultivées irriguées sur la période de 50 ans est importante en Asie (de 25,8 % à 41,5 % de la surface totale du continent) par rapport à l'Afrique (de 4,5 % à 6 %). En outre, l'Afrique présente le plus faible pourcentage d'augmentation et le plus faible niveau absolu de surface irriguée au monde par rapport à tout autre continent peuplé. La figure 2 illustre cette évolution lente des terres cultivées irriguées en Afrique et notamment en ASS où moins de 3% des terres cultivées étaient équipées avec de l'irrigation en 2020.

Plusieurs raisons expliquent la lenteur du développement de l'irrigation en Afrique. Après le développement initial de systèmes d'irrigation à proximité de grands fleuves pérennes (Niger, Sénégal, Nil, Volta, Zambèze), vers la fin des années 1980, sous l'impulsion des gouvernements et avec l'appui de nombreux donateurs, l'irrigation en Afrique a connu des changements fondamentaux, notamment la libéralisation de la chaîne de production, le transfert de la gestion des systèmes aux utilisateurs et l'émergence de préoccupations environnementales (Frenken, 2005). En outre, les coûts des projets ont été jugés

excessifs en Afrique par rapport au reste du monde (ADB *et al.*, 2007). L'intérêt des bailleurs de fonds pour le développement de l'irrigation en Afrique a diminué principalement en raison du manque de performance des systèmes d'irrigation publics, de la baisse des prix mondiaux des céréales dans les années 1980, qui a rendu les cultures irriguées africaines non compétitives par rapport aux importations en provenance des marchés étrangers subventionnés, et des préoccupations sociales et environnementales liées à des projets mal planifiés (Oates *et al.*, 2015). En outre, les politiques des institutions internationales (libéralisation des marchés par exemple) ont provoqué une chute des investissements agricoles dans le contexte de politiques nationales transitoires (Bryceson *et al.*, 2010). Cependant, le déclin des investissements publics dans l'irrigation à grande échelle après 1980 a engendré le développement de la petite irrigation privée, généralement non réglementée et « sous le radar » (Jamin *et al.*, 2011). Ce type de développement de l'irrigation a été rapide en Asie du Sud et au Maghreb dans le nord-ouest de l'Afrique (Algérie, Libye, Mauritanie, Maroc et Tunisie), et il est en train d'émerger en ASS (Lefore *et al.*, 2019 ; Shah *et al.*, 2020).

Malgré les difficultés passées, il existe un intérêt récurrent pour le développement de l'irrigation en Afrique. Les politiques et plans nationaux et régionaux africains (AU, 2020) ont mis l'accent sur le développement de l'irrigation et, plus largement, sur la gestion durable des terres et de l'eau, en tant qu'éléments clés de la réduction de la pauvreté et des gains de productivité alimentaire. Au vu de certaines expériences passées négatives où il a été décidé de ne pas utiliser les ressources en eau souterraine pour réduire la pauvreté, sur la base d'aspects dogmatiques du développement durable, il est important

d'apprécier que, dans les zones arides et semi-arides, le concept devrait être recentré vers un développement progressif (Issar, 2008). En se concentrant sur l'Afrique, où 21 % de la population était sous-alimentée en 2020 (FAO *et al.*, 2021), Altchenko *et al.* (2018) estiment qu'il existe un potentiel important pour le développement de l'irrigation par les eaux souterraines sur le continent : 19,18 x 10⁶ ha pourraient être développés durablement à travers l'ASS, ce qui représente une multiplication par huit des zones irriguées par les eaux souterraines

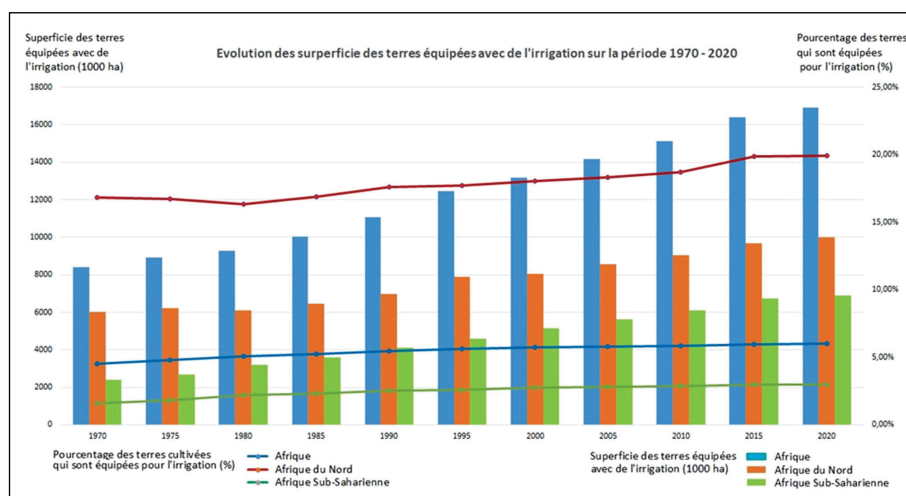


Figure 2. Évolution des superficies des terres équipées avec de l'irrigation de 1970 à 2020 (source : FAOSTAT).

existantes. Cette estimation tient compte de plusieurs facteurs socio-économiques limitant le développement de l'irrigation avec les eaux souterraines, tels que l'accès au marché ou l'adéquation du terrain à l'agriculture, ainsi que de l'utilisation des eaux souterraines pour d'autres besoins, y compris les besoins environnementaux. Elle ne tient pas compte des zones où les précipitations sont importantes ou de l'irrigation non durable par les eaux souterraines. La figure 3 montre la distribution de ce potentiel en Afrique.

Un besoin pour une irrigation durable et réglementée avec les eaux souterraines

L'impact socio-économique et environnemental de l'utilisation des eaux souterraines en agriculture est une préoccupation mondiale partagée (Gaye et Tindimgaya, 2019). Avec de nombreux exemples en Asie, en Afrique et en Europe, Shah *et al.* (2001) et De Stefano et Lopez-Gunn (2012) donnent un aperçu des impacts du

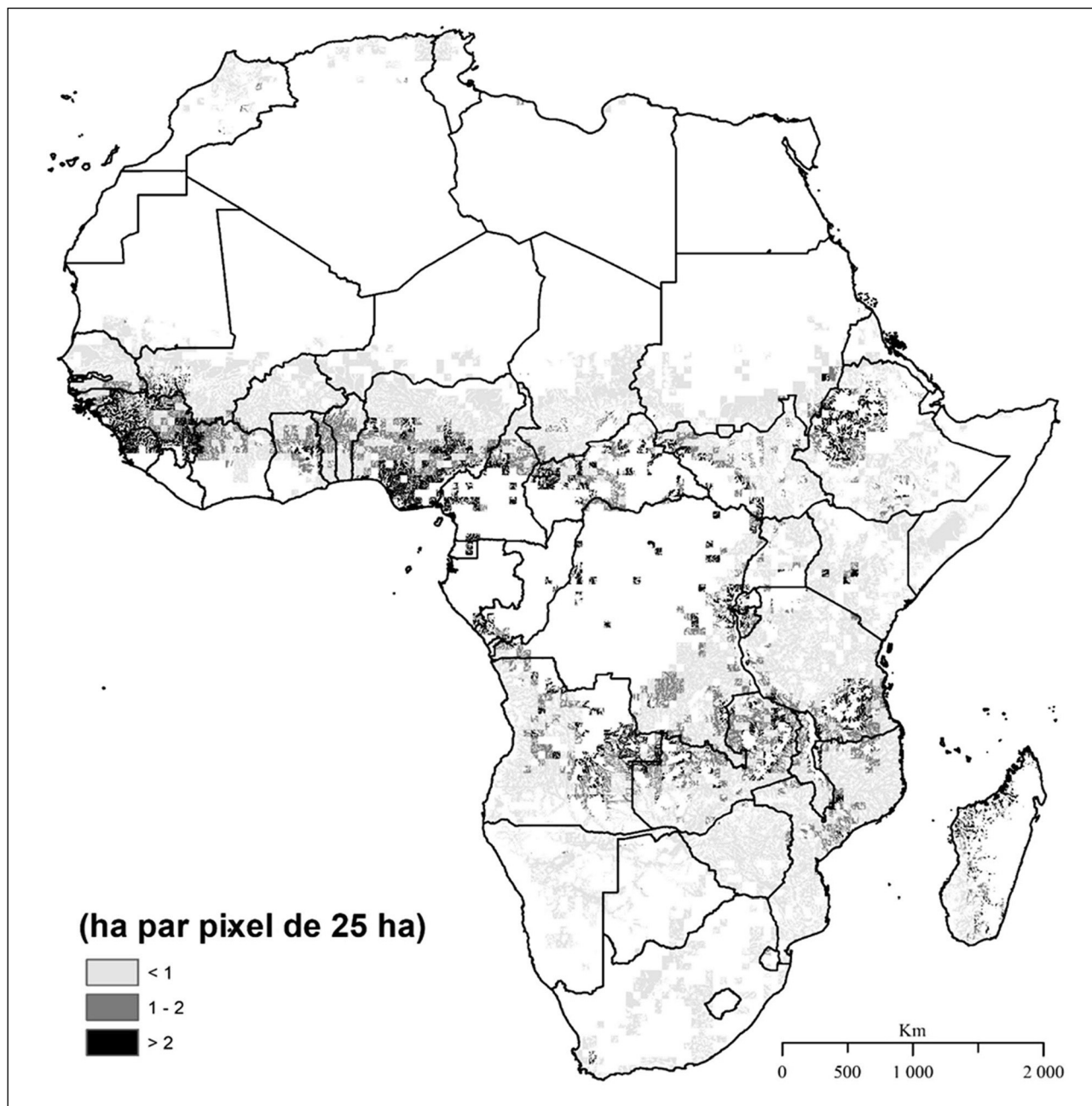


Figure 3. Distribution du potentiel de développement de l'irrigation par les eaux souterraines renouvelable en Afrique (adapté depuis Altchenko *et al.* (2018)).

développement non autorisé de l'irrigation des eaux souterraines (prélèvement au-delà des limites établies ou à partir de forages non autorisés). Ce problème est particulièrement lié au développement rapide et non planifié de l'irrigation avec les eaux souterraines qui s'est produit en Asie du Sud et en Afrique du Nord à la fin du siècle dernier (Shah, 2009 ; Kuper *et al.*, 2016). En ce qui concerne la quantité d'eau souterraine, on observe une baisse du niveau piézométrique dans les aquifères. De même, la diminution des flux d'eau des nappes vers les zones humides ou les rivières peut entraîner la dégradation (ou la disparition) des habitats des écosystèmes riverains. L'irrigation n'est qu'une des nombreuses utilisations des eaux souterraines, qui comprennent, entre autres, l'approvisionnement en eau domestique et industrielle et l'abreuvement du bétail. Le développement de l'irrigation au moyen des eaux souterraines ne devrait pas interférer avec les autres besoins fondamentaux en eau de l'homme ou de l'environnement. Cependant, les tendances de développement de l'irrigation avec les eaux souterraines indiquent que les gains en termes de moyens de subsistance, d'eau et de sécurité alimentaire peuvent être compromis à moyen et long termes si l'utilisation des eaux souterraines n'est pas bien gérée (Re *et al.*, 2022).

En ce qui concerne la qualité des eaux souterraines, l'irrigation et les pratiques agricoles intensives peuvent entraîner une contamination des eaux souterraines par des engrais ou des pesticides, et le captage dans les zones côtières peut générer une intrusion saline qui entraîne la pénétration d'eau salée dans les puits et les nappes. La salinisation des eaux souterraines (et des sols) peut également résulter d'une irrigation extensive dans les climats secs : directement par l'évapo-concentration des minéraux dans le sol cultivé et l'excédent d'irrigation qui entraîne les sels accumulés dans le sol vers l'aquifère, et/ou indirectement lorsque la surexploitation modifie la chimie des eaux souterraines (Pulido-Bosch *et al.*, 2018). En fait, Tweed *et al.* (2018) soulignent que l'irrigation au moyen des eaux souterraines peut aussi avoir un impact sur les écoulements d'eau souterraine avec, par exemple, un mélange d'eaux souterraines profondes avec les eaux souterraines moins profondes. Dans ce cas, un tel scénario peut être bénéfique puisqu'il réduit, par dilution, la concentration de nitrates provenant des pratiques agricoles dans les eaux souterraines peu profondes. Mais plus généralement, les eaux souterraines profondes peuvent avoir une forte salinité.

La surexploitation des nappes, également appelée épuisement des eaux souterraines, est l'une des préoccupations actuelles les plus importantes. Elle signifie que les prélèvements d'eau souterraine sont plus importants

que la recharge, ce qui se traduit par une baisse du niveau des nappes. En effet, en règle générale, les aquifères contiennent un stock d'eau souterraine très supérieur au flux (la recharge) qui circule en leur sein chaque année. Ainsi, le stock est souvent plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de fois supérieur à la recharge. Plusieurs études ont tenté d'estimer l'épuisement des eaux souterraines dû à l'irrigation (Bierkens et Yoshihide, 2019), mais les estimations mondiales de l'épuisement des eaux souterraines sont incertaines, allant, tous usages confondus, de 113 km³/an (Doll *et al.*, 2014) à 330 km³/an (Pokhrel *et al.*, 2015). Wada *et al.* (2010) ont estimé que l'épuisement des eaux souterraines était de 283 km³/an en 2000 et ont présenté sa distribution mondiale, indiquant que l'épuisement des eaux souterraines en Afrique était limité et se produisait dans quelques zones localisées en Afrique du Nord et du Sud. Dans ce contexte incertain, Wada *et al.* (2012) ont estimé que les prélèvements d'eaux souterraines non renouvelées ont contribué à hauteur d'environ 20 % à la demande brute mondiale en eau d'irrigation pour l'année 2000, l'Inde (68 km³/an) étant le contributeur le plus important, suivi du Pakistan (35 km³/an) et des États-Unis (30 km³/an). Une étude de Villholth *et al.* (2015) a estimé que 14,5 % de la production agricole irriguée mondiale provenait de l'épuisement des eaux souterraines et que 32,6 % de toute la production agricole basée sur l'irrigation avec les eaux souterraines reposait sur des prélèvements non durables. En fait, la contribution à la demande en eau d'irrigation par des eaux souterraines en état d'épuisement a plus que triplé au cours de la période 1960-2000 (Wada *et al.*, 2012). Les céréales et les cultures sucrières sont les cultures irriguées par les eaux souterraines les moins durables (Dalin *et al.*, 2017 ; Villholth *et al.*, 2015). A travers plusieurs exemples espagnols, De Stefano et Lopez-Gunn (2012) ont mentionné que la surexploitation des nappes avait aussi un impact indirect sur les finances publiques : la recherche de ressources alternatives aux eaux souterraines surexploitées ou les moyens mis en place pour réduire la surexploitation (ex: mise en place de recharge artificielle) pouvaient entraîner des investissements publics importants.

La dégradation de la qualité des eaux souterraines est un problème essentiel auquel les agriculteurs et les communautés locales doivent faire face dans de nombreuses régions du monde, notamment dans le cadre de l'approvisionnement en eau domestique, y compris l'eau potable. Ainsi, la pollution des eaux souterraines due aux engrais est devenue un problème important (Srivastav, 2020). Par exemple, on trouve des niveaux de nitrates dépassant les normes nationales d'eau potable dans les provinces fortement cultivées d'Inde (Soumyajit *et al.*,

2021) et de Chine (Yu *et al.*, 2020). Des concentrations élevées de nitrates sont également constatées dans plusieurs aquifères espagnols en raison de pratiques d'irrigation et de fertilisation mal optimisées (Arauzo et Martínez-Bastida, 2015). Dans d'autres cas, avec une agriculture très technique, comme à Campo de Cartagena (Espagne), une forte teneur en nitrates est aussi observée dans les eaux souterraines (Alcolea *et al.*, 2019), probablement due à des pratiques agricoles réalisées il y a des décennies, mais qui génèrent un grave problème environnemental actuel dans la lagune côtière associée de Mar Menor. Garduño et Foster (2010) décrivent le cas brésilien du système aquifère d'Apodi, où le développement rapide de l'irrigation au moyen des eaux souterraines a eu un impact sur la qualité de l'eau de l'aquifère calcaire vulnérable sous-jacent par la lixiviation des nutriments et des pesticides des sols agricoles. En Corée, le gouvernement a mis en place un programme visant à réduire l'intrusion d'eau de mer due au prélèvement d'eau souterraine, qui a entraîné une baisse de la productivité agricole (Lee et Song, 2007). Narayan *et al.* (2007) ont montré que l'irrigation de la canne à sucre par les eaux souterraines dans le delta du Burdekin (Australie) était la principale raison de l'intrusion saline ; des techniques de recharge artificielle y sont utilisées pour limiter l'intrusion d'eau de mer. Les agriculteurs marocains de la région de Chaouia ont adopté différentes stratégies (des forages plus profonds et des systèmes agricoles adaptatifs par exemple) pour faire face à l'intrusion d'eau de mer causée par l'utilisation agricole intensive des eaux souterraines depuis les années 1970 (Berahmani *et al.*, 2012).

En fait, les eaux souterraines sont une ressource « invisible » et leur dégradation en quantité ou en qualité prend souvent beaucoup de temps avant d'être découverte et reconnue comme un problème, surtout si les aquifères ne sont pas surveillés de manière adéquate. L'irrigation non planifiée au moyen des eaux souterraines peut entraîner la détérioration de la ressource en eau souterraine et celle de son potentiel pour améliorer durablement la sécurité alimentaire. Il est donc indispensable de comprendre et de surveiller les systèmes aquifères, et d'élaborer des politiques pertinentes et intégrées à plusieurs niveaux lors du développement de l'irrigation par les eaux souterraines. Il est important d'établir des systèmes d'alerte précoce à la fois dans le sol et dans la zone non saturée car, généralement, une fois que la contamination des eaux souterraines est détectée, cela signifie que le processus de contamination est bien avancé, puisque les aquifères comportent des volumes d'eau stockés importants. Le retour au bon état est lui aussi très lent.

Le lien entre eaux souterraines, alimentation et énergie

L'accès à l'énergie et le coût de l'énergie ont été identifiés comme des facteurs moteurs ou limitants au développement de l'irrigation avec les eaux souterraines (Villholth, 2013). Le coût du pompage et/ou de la mise en pression de l'eau pour sa distribution est étroitement lié à la quantité d'énergie utilisée. Il existe plusieurs sources d'énergie pour faire fonctionner les dispositifs de pompage, comme les humains (exemple : pompe manuelle), l'électricité, le diesel ou les énergies renouvelables. Les pompes à pédale, couramment utilisées en Afrique, n'ont pas de coût d'exploitation et nécessitent peu d'entretien, mais elles ne sont généralement pas adaptées aux eaux souterraines profondes et nécessitent de nombreuses heures de travail (IFPRI, 2012) pour un faible débit ; pratiquement, elles sont limitées à du petit maraîchage. Les coûts de fonctionnement des pompes à diesel et à essence sont plus élevés que ceux des pompes à électricité, de sorte que la faible électrification rurale en ASS tend à limiter l'irrigation par les eaux souterraines. Parmi le large éventail de solutions, l'irrigation à l'énergie solaire a gagné en importance (IRENA, 2016) et une attention particulière est actuellement accordée aux systèmes d'irrigation solaire en ASS (Wazeda *et al.*, 2018). Ces systèmes utilisent les technologies solaires photovoltaïques et solaires thermiques, ces dernières étant plus adaptées aux petits exploitants et aux opérations à petite échelle. L'ASS offre un potentiel important pour les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la bio-énergie, les deux premières étant des énergies à coût nul si l'on ne tient pas compte de l'investissement initial. En particulier, l'Afrique de l'Est et l'Afrique australe ont un potentiel important d'énergie solaire (Hermann *et al.*, 2014). Il apparaît donc que les dispositifs de pompage à énergie solaire et leur coût d'acquisition décroissant peuvent encourager l'irrigation par les eaux souterraines en ASS, même pour les petits exploitants. En fait, la petite irrigation privée (ou irrigation individuelle) est une tendance croissante dans les nations de la ASS (Nakawuka *et al.*, 2018 ; Lefore *et al.*, 2019) et certains affirment que les projets de petite irrigation sont plus performants que les projets à grande échelle (Fujiie *et al.*, 2011). Cependant, la croissance de la petite irrigation est spontanée et non réglementée (De Fraiture et Giordano, 2014), ce qui pose des problèmes environnementaux, notamment dans le contexte d'un accès à l'énergie à faible coût ou gratuit. L'Inde est un exemple typique d'une nation qui, fournissant de l'électricité subventionnée, encourage le développement de l'extraction non durable des eaux souter-

raines pour l'irrigation, ce qui a un impact négatif sur la ressource souterraine pouvant aller jusqu'à son épuisement (Fishman *et al.*, 2016). En particulier, l'utilisation non durable des eaux souterraines favorisée par une énergie à faible coût peut augmenter cette surexploitation, créant d'autres problèmes pour la production alimentaire en aval du bassin, car moins d'eau sera disponible pour être utilisée dans les parties aval du bassin versant. L'idée selon laquelle un excédent d'irrigation élevé contribuera à la reconstitution des eaux souterraines en aval est loin d'être vraie (Tweed *et al.*, 2018). D'autre part, ces subventions rendent moins pratique l'utilisation de l'irrigation à l'énergie solaire (FAO, 2018), augmentant les préoccupations environnementales en termes de pollution et d'émissions de CO₂.

Conclusion

Dans le contexte de la croissance démographique, de l'éradication de la faim et de l'incertitude de l'impact du changement climatique sur les précipitations, l'irrigation par les eaux souterraines est considérée comme un moyen fiable et abordable d'augmenter la sécurité alimentaire. Il existe une opportunité significative pour développer davantage l'irrigation durable par les eaux souterraines, principalement en ASS, augmentant ainsi la production des cultures et réduisant l'insécurité alimentaire. Cependant, si la connaissance sur les eaux souterraines, leurs processus et leur dynamique, et les outils

nécessaires à leur gestion sont maintenant matures, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques de chacun des aquifères ou groupes d'aquifères qu'il est envisagé de mettre en exploitation, pour l'irrigation notamment, afin de quantifier les volumes prélevables durablement et d'assurer la protection de la qualité des eaux souterraines. En particulier, le rôle et le comportement des eaux souterraines dites « fossiles » et la possibilité réelle d'une recharge artificielle des aquifères doivent être discutés, au cas par cas. Davantage de données sont donc nécessaires pour pouvoir surveiller ces ressources cachées qui jouent un rôle essentiel tant dans la fourniture d'eau pour les besoins humains que pour la santé environnementale. Cette connaissance est d'autant plus importante que nous disposons d'une énergie presque gratuite grâce à la technologie solaire et éolienne, ce qui risque d'entraîner la surexploitation des aquifères. La science existante (l'hydrogéologie) et les progrès dans les données et connaissances locales doivent fournir les éléments suffisants pour la planification, la gestion et la protection de la qualité des eaux souterraines et constituent la base nécessaire à la mise en œuvre de principes de gouvernance des ressources disponibles, qui est conditionnée par des aspects économiques, sociaux, éthiques et même moraux.

Bibliographie

- La bibliographie de cet article se trouve sur le site de la SGF : www.geosoc.fr