Chapitre 1

La tendance inquiétante du développement de l'irrigation à partir d'eau souterraine

Ce chapitre traite des difficultés liées à la gestion des eaux souterraines et brosse un tableau général de l'état de la ressource et de son utilisation en agriculture dans les pays de l'OCDE. Il examine les données récentes, les tendances et les indicateurs d'utilisation et de pression sur les eaux souterraines au niveau des pays, des régions et des aquifères, et passe en revue les données disponibles sur les effets attendus du changement climatique.

Les données statistiques concernant Israël sont fournies par et sous la responsabilité des autorités israéliennes compétentes. L'utilisation de ces données par l'OCDE est sans préjudice du statut des hauteurs du Golan, de Jérusalem Est et des colonies de peuplement israéliennes en Cisjordanie aux termes du droit international.

Principaux messages

En raison de l'expansion spectaculaire de l'irrigation à partir d'eau souterraine observée depuis une quarantaine d'années, appelée "révolution silencieuse", l'eau souterraine est devenue indispensable pour l'agriculture dans de nombreux pays. Cette expansion s'explique en grande partie par le fait que cette ressource peut constituer pour les agriculteurs une source d'eau fiable pour l'irrigation, accessible "à la demande", tout en étant relativement peu affectée par les variations hydrologiques de surface à court terme.

Il en résulte cependant que les ressources en eau souterraine sont exploitées au-delà de leur taux de recharge naturelle dans de nombreuses régions, avec dans certains cas d'importantes conséquences économiques et environnementales dommageables. La poursuite des prélèvements se traduit par un rabattement des nappes phréatiques, ce qui accroît le coût du pompage et peut créer une surenchère à la baisse entre les producteurs. La surexploitation des ressources en eau souterraine peut aussi avoir sur l'environnement des répercussions qui influent à leur tour directement sur la production agricole, affectant l'utilisation future de cette ressource pour l'agriculture.

Dans les pays de l'OCDE, l'irrigation à partir d'eau souterraine était pratiquée sur 23 millions d'hectares en 2010, soit un tiers de la superficie irriguée totale. Cette même année, un volume annuel estimé à 123.5 km^3 a été utilisé à des fins d'irrigation dans les pays de l'OCDE, soit 56 % du total des prélèvements d'eau souterraine dans ces mêmes pays, ou environ 20 % des prélèvements mondiaux d'eau souterraine destinés à l'irrigation. Parallèlement, on constate de grandes variations en termes aussi bien de superficie irriguée que de volumes d'eau souterraine prélevés pour l'irrigation, puisque dans certains d'entre eux l'agriculture n'a pratiquement pas recours à ces ressources, tandis que dans d'autres elle les utilise de façon intensive.

Dans certains de ces pays, situés en particulier en Amérique du Nord et dans la région méditerranéenne, l'utilisation d'eau souterraine en agriculture est en augmentation et contribue aux pressions exercées sur cette ressource. Les principaux pays de l'OCDE pratiquant l'irrigation à partir d'eau souterraine ont accru leur consommation au cours des 25 dernières années, tandis que d'autres l'ont maintenue à un niveau relativement stable. Au niveau national, l'indice de pression sur les eaux souterraines (ou indice GDS, pour *Groundwater Development Stress*) lié à l'agriculture, qui mesure le ratio entre l'extraction d'eau souterraine et la recharge naturelle, a été estimé pour les pays de l'OCDE à 7.6 % en moyenne en 2010, avec de grandes variations entre les pays membres puisqu'il varie entre zéro et plus de 100 %. On observe des variations à l'échelle régionale, voire au niveau des aquifères.

Avec l'accentuation des pressions sur les eaux souterraines que le changement climatique devrait provoquer dans un plus grand nombre de régions de l'OCDE, les problèmes de gestion des eaux souterraines se feront plus pressants. La volatilité des eaux de surface, la baisse des taux de recharge des aquifères et les chocs météorologiques accentueront grandement le rôle des eaux souterraines dans les zones actuellement irriguées et dans celles qui seront susceptibles de l'être à l'avenir. Parallèlement, le changement climatique devrait aggraver les problèmes de salinité et faire baisser le taux de recharge des aquifères, notamment dans certains des aquifères majeurs utilisés par l'agriculture dans les pays de l'OCDE, intensifiant les pressions.

Compte tenu de la grande diversité des niveaux de consommation et de l'évolution des contraintes entre et dans les pays de l'OCDE, il est indispensable de mieux appréhender les systèmes hydrogéologiques utilisés en agriculture avant d'aborder la question des mesures susceptibles d'être prises par les pouvoirs publics. Le chapitre 2 propose une caractérisation des systèmes hydrogéologiques.

L'importance croissante et les défis de l'irrigation à partir d'eau souterraine

Dans un contexte d'augmentation de la demande de denrées alimentaires, de concurrence entre les usages de l'eau et de variabilité climatique grandissante, la gestion de l'eau devrait occuper une place de plus en plus déterminante dans l'agriculture (OCDE, 2010b et 2014a). La volonté d'accroître la production agricole pour faire face à l'augmentation de la population va renforcer les besoins en eau, d'autant plus qu'une forte demande est à prévoir de la part d'autres secteurs. Le changement climatique continuera d'influer directement sur l'offre de ressources en eau douce, et l'adaptation de l'agriculture aux nouvelles conditions climatiques sera fortement tributaire de la gestion de l'eau (OCDE, 2014a et 2014b). L'action parallèle de ces trois tensions croissantes (augmentation de la demande de denrées alimentaires, changement climatique et concurrence pour l'accès aux ressources) rend nécessaire une utilisation efficiente et durable de toutes les ressources en eau dans l'agriculture, qu'il s'agisse des eaux de surface ou des masses beaucoup plus abondantes mais peut-être plus souvent ignorées que sont les eaux souterraines.

Les eaux souterraines sont contenues dans la matrice d'aquifères situés sous la surface, dont remplissent toutes les fissures et tous les pores, par opposition aux masses d'eau à surface libre que forment les cours d'eau, les réservoirs ou les lacs (par exemple, Giordano, 2009 ; Siebert et al., 2010 – on trouvera un glossaire complet en fin de rapport)[1]. À ce titre, elles constituent une portion spécifique du cycle de l'eau, en relation avec les eaux de surface mais souvent semi-indépendantes de celles-ci. Souvent utilisées en complément des eaux de surface, les eaux souterraines contribuent pour une part importante à l'approvisionnement public en eau et fournissent quelque 60 % de l'eau potable utilisée pour la consommation humaine (Margat, 2008). Elles apportent également une contribution essentielle à l'agriculture et aux activités industrielles dans de multiples pays. Dans l'ensemble, plus de 2.6 milliards de personnes sont sans doute tributaires des ressources en eau souterraine (OCDE, 2013a).

L'expansion de l'irrigation à partir d'eau souterraine : une révolution silencieuse

Les eaux souterraines représentent une part considérable de l'eau utilisée pour l'irrigation en agriculture (Giordano et Villholth, 2007). Plus de 60 % de la consommation d'eau souterraine est absorbée par l'agriculture dans les régions arides et semi-arides pour produire 40 % de la nourriture mondiale (Morris et al., 2003 ; OCDE, 2013a). Shah et al. (2007) ont estimé qu'à l'échelle mondiale, les eaux souterraines utilisées à des fins agricoles contribuaient à une production annuelle équivalant à 210-230 milliards USD, soit une productivité brute moyenne de 0.23-0.26 USD/m^3 prélevé. La consommation totale d'eau souterraine pour l'irrigation a été estimée en 2010 à 545 km^3/an, soit 43 % du volume total de l'eau utilisée à cette fin[2] (Siebert et al., 2010). En 2010, la superficie totale des terres irriguées à partir d'eau souterraine couvrait 98 millions ha, soit 39 % de la superficie irriguée totale (Siebert et al., 2010). Dans la mesure où ces estimations portent uniquement sur les sources d'eau souterraine, elles sont probablement sous-évaluées, car les eaux souterraines et les eaux de surface sont très souvent utilisées conjointement pour l'irrigation (Kemper, 2007).

Les ressources en eau souterraine ont permis de réaliser des gains de productivité agricole significatifs et continuent d'assurer une part non négligeable de la production végétale mondiale (OCDE, 2010a et 2012b). L'expansion spectaculaire de l'irrigation à l'aide d'eau souterraine observée depuis une quarantaine d'années, qui a été qualifiée de "révolution silencieuse", a fortement influé sur les niveaux de production agricole (Garrido et al., 2006). L'exploitation des eaux souterraines pour l'irrigation a commencé à se développer en Espagne, aux États-Unis, en Italie et au Mexique, avant de connaître une expansion rapide essentiellement en Asie (Shah et al., 2007 ; van der Gun, 2012). Elle représente aujourd'hui la moitié de l'irrigation en Asie du Sud et contribue à deux tiers de l'offre de céréales en République populaire de Chine (Giordano et Villholth, 2007). Elle joue aussi un rôle non négligeable dans l'agriculture des pays de l'OCDE, notamment ceux soumis à des conditions arides ou

Cette page a fait l'objet d'un corrigendum. Voir http://www.oecd.org/fr/apropos/editionsocde/Corrigendum-DryingWells-RisingStakes-FR.pdf

semi-arides. Plus de 60 % de l'agriculture irriguée et près de la moitié des agriculteurs utilisent des eaux souterraines aux États-Unis (Gollehon et Quinby, 2006 ; Scanlon et al., 2012). Ces eaux représentent plus de 70 % des activités d'irrigation en Espagne, et sont à l'origine de cinq fois plus de valeur et trois fois plus d'emplois que l'irrigation à partir d'eau de surface dans la région d'Andalucía (Hernandes-Mora et al., 2003). Les eaux souterraines constituent aussi un tiers de l'eau utilisée pour l'irrigation au Mexique, qui est le plus gros consommateur d'eau souterraine d'Amérique latine, avec plus de 100 000 pompes de forte capacité (Scott et al., 2010). On estime que leur utilisation en agriculture en Australie contribue à hauteur de 11 milliards AUD par an à l'économie nationale (Deloitte Access Economics, 2013).

L'ampleur de l'utilisation des eaux souterraines et leur importance peuvent largement s'expliquer par les caractéristiques physiques intrinsèques de cette ressource[3]. Premièrement, contrairement aux eaux de surface, les eaux souterraines se caractérisent par une capacité de stockage élevé comparée aux apports (Giordano, 2009). Deuxièmement, elles s'écoulent bien plus lentement que les eaux de surface (OCDE, 2011b). Troisièmement, leur qualité est généralement supérieure à celle des eaux de surface, notamment du point de vue de la contamination bactérienne (d'où son importance pour l'eau de boisson). Relativement peu exposées aux aléas météorologiques, elles assurent une forme de "stockage tampon" qui permet de compléter les ressources en eau de surface (Morris et al., 2003). De fait, la faiblesse des débits entrants et sortants qui caractérisent les réserves d'eau souterraine assure la viabilité de la ressource, même en période de sécheresse (Bovolo et al., 2009 ; OCDE, 2011b).

Les eaux souterraines sont effectivement utilisées en agriculture comme un moyen de stockage naturel, faisant office d'assurance contre la sécheresse (Garrido et Iglesias, 2006), ou de "compte d'épargne eau" en permettant aux producteurs de continuer à consommer de l'eau quand les ressources de surface ne suffisent pas. Par exemple, Howitt et al. (2014) ont estimé que la sécheresse de 2014 en Californie entrainerait une perte de 6.6 millions d'acres-pieds (environ 8 millions de mégalitres) d'eau de surface, dont 5 millions d'acres-pieds (6 millions de mégalitres) pourraient être récupérés par pompage des eaux souterraines. Dans les régions arides et semi-arides, l'irrigation à partir d'eau souterraine permet aussi d'allonger la période végétative et réduit les risques liés aux ravageurs et aux maladies (Siebert et al., 2010). Leur capacité à servir de réservoir en fait aussi un outil important pour accroître la résilience à long terme face au changement climatique (Green et al., 2011 ; Gleeson et Cardiff, 2013 ; OCDE, 2013d).

Même dans des régions où les contraintes climatiques sont moindres, ces eaux sont aussi utilisées par des exploitants de petites ou grandes fermes qui peuvent ainsi disposer d'eau "à la demande" – c'est-à-dire gérer l'eau en fonction de leurs besoins (OCDE, 2010b). Les ressources en eau souterraine se caractérisent par leur dimension *horizontale*, les aquifères couvrant de vastes zones qui ne sont pas toujours contiguës aux bassins hydrographiques, ce qui permet aux agriculteurs d'accéder, de façon relativement équitable, à l'eau présente sous leurs champs (Kemper, 2007). Dans de multiples régions comprenant des aquifères peu profonds, il est en outre facile et relativement abordable d'accéder à la ressource grâce au développement de technologies de pompage bon marché. Cette solution est donc considérée par les agriculteurs comme une source d'eau particulièrement intéressante, fiable et facilement accessible (Garrido et Iglesias, 2006), et rencontre beaucoup de succès auprès des agriculteurs (Garduño et Foster, 2010). De fait, plusieurs études menées dans différents pays ont montré que les agriculteurs préfèrent systématiquement l'irrigation à partir d'eau souterraine (Shah, 2008).

Qui provoque des pressions croissantes dans les zones d'irrigation intensive

Toutefois, ces avantages ont conduit à exploiter ces ressources au-delà de leur taux de recharge naturelle dans de nombreuses régions. Si le secteur agricole participe de manière importante à la recharge des aquifères à nappe libre, via l'irrigation à partir d'eau de surface et d'eau souterraine

(Taylor et al., 2012), il a cependant accru encore davantage ses prélèvements d'eau souterraine. Les prélèvements de ressources non renouvelables ont atteint 234 km^3/an, soit 20 % de la demande brute d'irrigation en 2000, et ont plus que triplé depuis 1960 (Wada et al., 2012). En partie du fait de l'accroissement de la variabilité climatique, qui affecte l'accès aux eaux de surface, les ressources en eau souterraine sont de plus en plus utilisées au point d'être surexploitées dans de très nombreuses régions agricoles (Taylor et al., 2012).

Cette utilisation intensive des ressources en eau souterraine au-delà du taux de recharge des nappes, autrement dit leur "surexploitation"[4], affectera les utilisateurs d'eau souterraine et notamment l'agriculture irriguée. De fait, cette situation a rendu l'utilisation des eaux souterraines "*l'un des principaux défis auxquels l'agriculture est confrontée*" (OCDE, 1998 ; 2011b). Comme le note la FAO (2011), "*étant donné que beaucoup des principales zones de production alimentaire dépendent des eaux souterraines, la baisse de niveau des aquifères et le captage continuel des nappes d'eaux souterraines non* renouvelables *font peser un risque croissant sur la production alimentaire aux niveaux local et mondial*". La poursuite des prélèvements se traduit par un rabattement des nappes phréatiques, ce qui accroît le coût du pompage et peut créer une surenchère à la baisse entre les producteurs. Dans les pays méditerranéens, les aquifères, qui contribuent en grande partie à l'approvisionnement en eau potable, sont exploités par les agriculteurs à un rythme supérieur à leur vitesse de recharge, ce qui a des conséquences pour les deux types d'utilisation (OCDE, 2011c). L'excès de pompage affectera sans doute aussi, via les liens commerciaux, les pays où les eaux souterraines ne constituent pas la principale source d'irrigation : ainsi, l'épuisement progressif des ressources en eau souterraine, en particulier en Asie du Sud et de l'Est, sur les terres agricoles qui nourrissent des centaines de millions de personnes, risque d'avoir des conséquences pour la sécurité alimentaire mondiale et une incidence sur les échanges et la production (Wada et al., 2012).

La surexploitation des ressources en eau souterraine dans les zones rurales a aussi des répercussions sur l'environnement (OCDE, 1998 ; 2011a), lesquelles peuvent à leur tour influer directement sur la production agricole. Elle peut en particulier affecter les cours d'eau, les lacs et autres masses d'eau, et se traduire par un affaissement des sols et par une augmentation de leur salinité (Bovolo et al., 2009). Le pompage des eaux souterraines peut provoquer un dessèchement des réserves naturelles comme aux Pays-Bas, et contribuer à l'assèchement de zones humides comme en Europe du Sud, entraînant d'importantes pertes de qualité liées au filtrage de l'eau (Hellegers et al., 2001 ; CEE-ONU, 2011). Au Mexique et dans l'Ouest des États-Unis, elle a ainsi provoqué d'importants affaissements de terrain (Foster, 2008 ; Sneed et al., 2013). Le pompage intensif pratiqué dans les aquifères côtiers ou dans les aquifères reliés à des masses d'eau salée est une cause importante de salinisation des eaux souterraines, ce qui influe sur le choix des cultures en agriculture et affecte les écosystèmes, en particulier des zones humides, cours d'eau, étangs et sources auxquels ils sont reliés (Schoengold et Zilberman, 2007 ; Fuentes, 2011 ; CEE-ONU, 2011 ; Amores et al., 2013)[5].

Enfin, la surexploitation des eaux souterraines peut affecter l'utilisation future de cette ressource pour l'agriculture. Les agriculteurs qui prélèvent les eaux souterraines au-delà de leur taux de recharge peuvent ainsi perdre une source de revenus à venir (soit une perte de valeur d'option, voir par exemple Howitt, et al., 2014). On estime que 97 % des eaux souterraines aboutissent dans les océans par ruissellement, évapotranspiration et précipitation (Wada et al., 2010) et la recharge des aquifères peut prendre un certain temps, allant de quelques années à plusieurs millénaires, en supposant que leur capacité reste inchangée. Dans les cas extrêmes, notamment dans les zones arides où les eaux superficielles ne sont pas aisément disponibles, les cycles d'expansion et de ralentissement auxquels est soumise l'agriculture pourraient se traduire par une baisse irréversible du niveau des nappes phréatiques, de sorte que l'agriculture ne serait plus rentable.

Trouver des solutions pour faire face aux problèmes grandissants et très divers que rencontre la gestion des ressources en eau souterraine dans le secteur agricole des pays de l'OCDE

Plusieurs rapports de l'OCDE ont été consacrés à des aspects particuliers des politiques relatives aux eaux souterraines, dans le cadre d'études plus générales concernant la gestion de l'eau. Cependant, aucun de ces rapports ne traite précisément des problèmes spécifiques auquels ces politiques sont confrontées. Ces études ont, par exemple, défini les principes généraux de la gestion durable de l'eau (OCDE, 2010b) et traité de l'utilisation des instruments économiques (OCDE, 2011b). La problématique des eaux souterraines a été examinée sous les angles de la tarification et du financement (OCDE, 2009a et 2009b), de l'énergie (OCDE, 2010a) et de la gestion des risques (OCDE, 2013e), ainsi que dans la perspective plus large du changement climatique (OCDE, 2013d et 2014a). Les eaux souterraines font aussi partie des aspects abordés dans les examens de la réforme des politiques de l'eau à l'échelle nationale (e.g. Fuentes, 2011 ; OCDE, 2013b). Tous ces rapports comportent des parties, sous-parties, paragraphes ou exemples concernant les eaux souterraines, mais ils ne formulent pas de conclusions spécialement destinées aux gestionnaires de certains types d'eaux souterraines, en particulier dans le secteur agricole.

Les publications plus générales sur l'agriculture et les eaux souterraines présentent plusieurs points communs. Tout d'abord, elles observent systématiquement qu'en règle générale, les eaux souterraines sont insuffisamment étudiées et qu'il est indispensable d'analyser plus en profondeur les stocks d'eau souterraine, leur utilisation et les pratiques de gestion dont ils font l'objet. Pour certains auteurs, l'insuffisance des connaissances relatives aux flux de ressources et aux pratiques de gestion rend difficile la prise en charge les problèmes à résoudre dans plusieurs régions (Struzik, 2013). Ensuite, plusieurs publications font valoir la nécessité d'analyser de manière plus approfondie les politiques relatives aux eaux souterraines (Koundouri, 2004 ; OCDE, 2007 ; 2010b). Enfin, certaines insistent sur le fait que la variété des aquifères et des contraintes qu'ils subissent est un élément essentiel dans la définition de plans de gestion durable destinés au secteur agricole (Giordiano et Villholth, 2007).

Le présent rapport examine les problèmes de gestion quantitative des eaux souterraines dans le secteur agricole et le rôle que pourraient jouer les politiques publiques, lorsque cela est possible, compte tenu de la variété des systèmes hydrogéologiques. L'objectif est de proposer une analyse globale des aspects économiques et des politiques publiques afin de trouver des réponses aux problèmes croissants et très divers que rencontre la gestion des ressources en eau souterraine dans le secteur agricole des pays de l'OCDE, notamment en ce qui concerne les externalités associées à l'épuisement à long terme des eaux souterraines.

Plusieurs réserves sont à formuler. Premièrement, l'analyse sera en grande partie axée sur l'utilisation des eaux souterraines associée à l'agriculture irriguée. Cela signifie en particulier que la consommation d'eau relative à la production animale ne sera pas analysée sous tous ses aspects, notamment faute de données et d'informations complètes. Deuxièmement, la gestion des niveaux excessifs d'eaux souterraines (et du débordement des eaux souterraines) sans rapport avec les usages agricoles mais affectant l'agriculture ne sera pas abordée[6]. Troisièmement, si le rapport traite des externalités induites par l'utilisation des eaux souterraines en agriculture, il ne se focalise pas de manière explicite à la préservation des flux environnementaux nécessaire au maintien des écosystemes. Quatrièmement, les enjeux associés à la qualité des eaux souterraines ne seront pas non plus examinés, sauf dans le cas de la salinité induite par le pompage des eaux souterraines. Qualité et volume sont manifestement liés, notamment par le biais de la concentration, mais ces aspects ne seront pas non plus traités dans ce rapport[7]. Cette réserve n'implique pas que les problèmes de qualité ne sont pas importants – de fait, certains constituent sans doute des problèmes émergents, et leur importance est reconnue surtout lorsque les eaux souterraines sont utilisées comme eau de boisson (OCDE, 2012c). Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines peuvent aussi être affectées par des

changements de qualité de l'eau. Une analyse plus approfondie des problèmes de qualité induits par l'agriculture, notamment l'infiltration d'azote dans les aquifères et l'interaction qualité-quantité, fera l'objet de travaux futurs. Cinquièmement, comme on l'a noté plus haut, tous les pays de l'OCDE ne sont pas concernés par les problèmes soulevés dans ce rapport, mais certains pourraient le devenir. Enfin, les recommandations adressées aux pouvoirs publics dans ce rapport ne seront peut-être pas applicables en tant que telles au niveau national dans de nombreux pays ; elles devront s'inscrire dans de plus vastes réformes des régimes d'allocation de l'eau telles que définies et analysées par l'OCDE (2014c). Elles ne visent donc pas à supplanter les efforts de réforme plus généraux, mais à les compléter en proposant des instruments de gestion spécifiques aux eaux souterraines dans les régions où celles-ci sont utilisées de manière intensive.

Le rapport se compose de cinq chapitres. Le chapitre 1 présente une vue synthétique de la situation actuelle des pays de l'OCDE concernant les ressources en eau souterraine et leur utilisation à des fins agricoles, les indicateurs de pression et les projections établies dans la perspective du changement climatique. Le chapitre 2 passe en revue les caractéristiques particulières des aquifères et les principaux problèmes auxquels ils sont actuellement confrontés ou sont appelés à l'être. Le chapitre 3 décrit les politiques de gestion des eaux souterraines d'après une enquête menée en 2014 auprès des pays de l'OCDE. Le chapitre 4 rend compte des politiques en place dans les pays de l'OCDE et le dernier chapitre recense les lacunes et formule des propositions d'amélioration des politiques en matière de gestion des eaux souterraines dans le secteur agricole.

L'utilisation des eaux souterraines en agriculture compte pour plus de la moitié des prélèvements totaux d'eau souterraine des pays de l'OCDE, avec de grandes différences entre les pays

Les difficultés liées à la collecte d'informations sur une ressource "invisible"

Du fait de leur caractère essentiellement non visible, de la complexité des processus hydrogéologiques et des connaissances spécialisées nécessaires pour les comprendre, des particularités inhérentes à chaque aquifère et de la difficulté connexe d'en mesurer l'état et les flux, les eaux souterraines sont souvent perçues comme une ressource "invisible" (Monginoul et Rinaudo, 2013)[8]. Bien qu'imparfaites, diverses approches ont été élaborées et sont utilisées pour évaluer les quantités et les flux d'eau souterraine, mais en raison de l'insuffisance des investissements en la matière et du manque de connaissances relatives aux eaux souterraines au sein des groupes assurant la gestion des ressources hydriques — qui axent généralement leur action davantage sur les eaux de surface — l'évaluation de ces ressources est souvent incomplète dans certains pays de l'OCDE (Struzik, 2013). À l'échelle de la région méditerranéenne, on manque cruellement de données sur l'utilisation totale d'eau souterraine, le nombre de forages, l'évolution de la qualité des eaux souterraines (y compris la salinité), le coût et le prix de l'eau souterraine ainsi que ses interactions avec l'eau de surface (EASAC, 2010a)[9]. La difficulté et le coût de la mesure des ressources en eau souterraine disponibles, et le fait que, soit l'utilisation des eaux souterraines n'est pas mesurée, soit les données ne sont pas systématiquement partagées dans de nombreuses régions, parfois pour les raisons politiques, contribuent à l'insuffisance apparente de connaissances fiables sur l'état et l'utilisation de ces ressources (BGS, 2009).

Même s'il est plus facile de mesurer les flux d'eau souterraine que les stocks, compte tenu de la complexité intrinsèque des structures aquifères, les flux entrants et sortants des aquifères sont très difficiles à évaluer avec exactitude et de manière exhaustive (Giordano, 2009). S'agissant de la résurgence, les utilisations naturelles et les flux verticaux et horizontaux au sein des aquifères ajoutent à la complexité du panorama. L'absence de suivi et/ou de communication de données sur le pompage dans de nombreux pays joue également un rôle important, en particulier dans l'agriculture. En outre, les différents types d'outils de suivi peuvent donner des résultats divergents, comme on le constate

pour l'irrigation en Arizona (Cohen et al., 2013). De même, il est très difficile d'évaluer la recharge en raison de la diversité des situations, des profils pédologiques et des sols de couverture, ainsi que de leurs liens avec les masses d'eau de surface[10]. On sait que dans bien des cas, les grandes cultures contribuent activement à la recharge des nappes souterraines, parfois même nettement plus que les écosystèmes naturels (Taylor et al., 2012), mais là encore, il est difficile de tirer des conclusions générales en raison de la présence de contraintes locales particulières.

Les efforts entrepris pour effectuer différents types de mesures à l'échelle locale et régionale, notamment au moyen d'outils satellitaires, ont amélioré les évaluations mais les perspectives demeurent imparfaites. Les données satellitaires, en particulier celles issues de la mission *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) de la NASA, ont permis de calculer des variations globales mensuelles et annuelles des stocks d'eau souterraine dans plusieurs régions. Elles ont démontré, par exemple, l'amenuisement progressif des ressources en Californie (voir Famiglietti et al., 2011), mais la résolution reste insuffisante et ne fournit d'évaluations que sur des périodes de temps importantes, et il est nécessaire de les compléter par des mesures classiques.

Le paysage des ressources et des données disponibles est donc hétérogène, en particulier à l'échelle nationale. Des pays relativement petits, où l'eau souterraine représente une source majeure d'eau douce, dont les terres agricoles présentent des profils géologiques plus homogènes et qui recueillent et échangent des données, sont ainsi capables d'assurer un suivi convenable de leurs ressources en eau souterraine dans le temps. Le Danemark, par exemple, a mis en place un programme de cartographie et de gestion des eaux souterraines au niveau national qui est financé par les consommateurs d'eau privés et publics, quui utilise de nouveaux outils de suivi de l'eau souterraine (DWF, 2012). Des pays plus grands peuvent disposer d'informations d'ordre général et assurer un suivi plus fin des ressources hydriques souterraines d'importance critique (États-Unis, par exemple). Enfin, les pays où les précipitations sont abondantes, où les eaux souterraines ne constituent pas une ressource majeure et où l'agriculture reste majoritairement pluviale, consacrent peu de moyens à la mesure de ces ressources, ce qui se traduit globalement par une absence de données (voir, par exemple, Conseil des académies canadiennes, 2013:93).

Sans perdre de vue ces réserves, la section qui suit fournit des informations sur les ressources en eau souterraine et leur utilisation à des fins agricoles, sur la base de données recueillies au moyen d'un questionnaire adressé aux pays de l'OCDE à l'été 2014 (voir les détails au chapitre 3), complétées par des données secondaires reposant principalement sur des estimations et des hypothèses plutôt que sur des mesures réelles[11], ainsi que sur la consultation de plusieurs experts du domaine de l'eau[12].

L'utilisation d'eau souterraine à des fins agricoles dans les pays de l'OCDE : de l'absence d'utilisation à l'utilisation intensive

Le tableau 1.1 présente une série de chiffres sur les stocks, apports et prélèvements d'eau souterraine, issus de diverses estimations analytiques des ressources hydriques au niveau mondial (Margat et van der Gun, 2013). Globalement, les eaux souterraines représentent une forte proportion des ressources hydriques utilisables, puisqu'elles constituent 96 % de l'eau douce liquide (UNESCO, 2008). On estime que les réserves d'eau souterraine dépassent les 20 millions de kilomètres cubes (km^3), l'eau douce représentant 40 % de ce total. Le volume annuel des recharges s'élève à environ 12 000 km^3, et les prélèvements à 600-1 100 km^3 ou, selon des estimations récentes, à 950-1 000 km^3 (OCDE, 2009b ; van der Gun, 2012 ; Margat et van der Gun, 2013)[13].

L'agriculture utilise les eaux souterraines principalement pour l'irrigation, mais aussi pour abreuver le bétail et pour la transformation des produits agricoles. La plupart des chiffres disponibles, cependant, ne concernent que l'irrigation, ce qui explique l'importance donnée à cet aspect dans la présente analyse (voir à l'annexe 1.A1 les données relatives à l'élevage, souvent limitées, comme

indiqué dans Deloitte Access, 2013). Au niveau mondial, l'irrigation représente deux tiers des prélèvements d'eau souterraine, soit au total entre 545 et 688 km^3/an selon les estimations (Siebert et al., 2010 ; Margat et van der Gun, 2013). Si l'on retient l'estimation de 545 km^3/an, cela représente environ 43 % de l'irrigation totale.

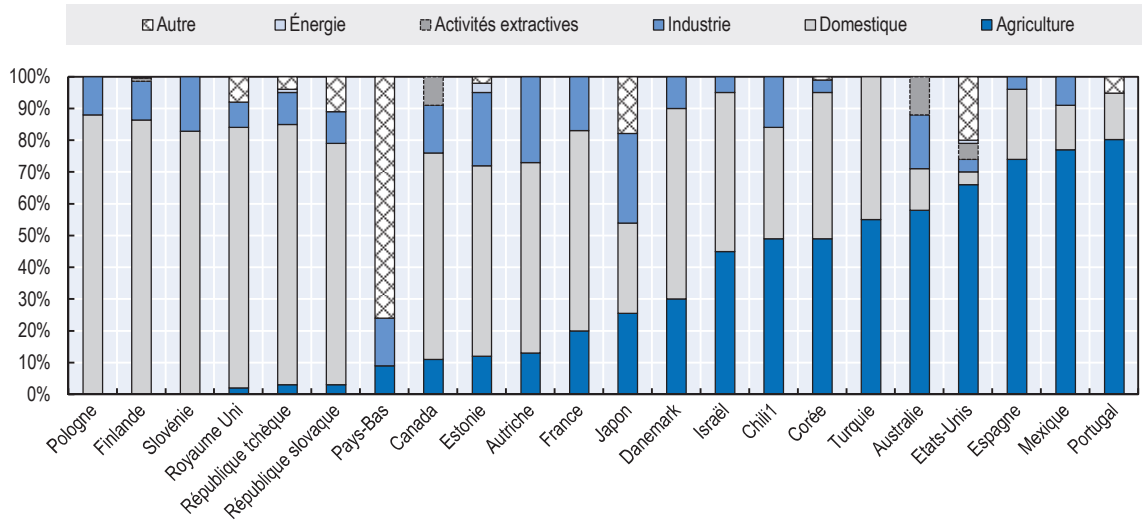
Tableau 1.1. Estimation des stocks, apports et prélèvements d'eau souterraine au niveau mondial

	Type	Estimations (km^3)	Part du stock total
Stocks	Eau douce	8 à 10 millions	~40 %
	Eau saumâtre ou saline	12 à 14 millions	~60 %
	Total	20 à 24 millions	100 %
Recharge annuelle	Total	11 000 à 15 000	0.05-0.08 %
Prélèvement annuel	Total	600 à 1 100	0.0025-0.0055 %
	Irrigation agricole seule	545 à 688	0.0023-0.0034 %

Sources : Margat et van der Gun (2013), d'après les estimations existantes de stocks et de recharge ; Siebert et al. (2010), van der Gun (2012) et Margat et van der Gun (2013) pour l'agriculture.

Si l'on a des raisons de penser qu'au niveau local, des risques peuvent peser sur les ressources hydriques futures, ces estimations montrent que l'utilisation de ces ressources pour l'irrigation agricole est relativement négligeable au niveau mondial, puisqu'elle concerne environ 5 % des apports d'eau naturels annuels et seulement 0.003 % des réserves totales d'eau souterraine. Cependant, le tableau 1.1 montre aussi que l'agriculture est responsable d'une très forte proportion des prélèvements totaux, estimée à 70 % en 2010. Cette estimation globale combine toutefois des taux très différents d'un pays à l'autre, et des taux tout aussi variables au niveau infranational (Margat et van der Gun, 2013).

Graphique 1.1. Part de l'utilisation des eaux souterraines par secteurs dans les pays de l'OCDE (2008-2013)



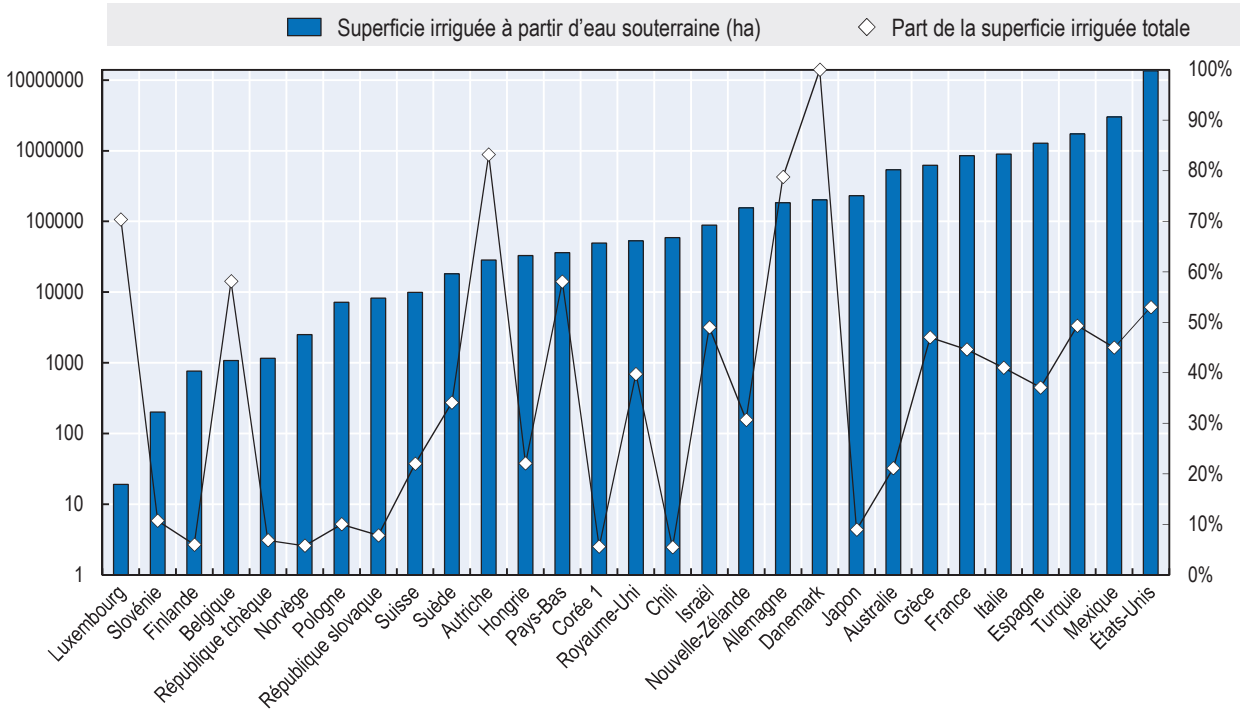
Le secteur de l'agriculture englobe a priori l'élevage.1.Données correspondant à l'année 2003.

Source : Questionnaire OCDE 2014 sur l'utilisation des eaux souterraines en agriculture.

L'industrie et les services publics d'approvisionnement en eau figurent parmi les utilisations concurrentes, les eaux souterraines étant la seule source d'eau potable dans nombre de régions. Comme le montre le graphique 1.1, les usages agricoles représentent une part non négligeable de l'utilisation des eaux souterraines (plus de 45 %) dans au moins neuf pays de l'OCDE : Israël, Chili, Corée, Turquie, Australie, États-Unis, Espagne, Mexique et Portugal. Le secteur domestique (eau de boisson) est l'autre utilisateur principal dans ces pays de l'OCDE, et sa part est particulièrement importante dans les pays européens (Finlande, Slovénie, Estonie, Autriche, Danemark et Royaume-Uni). En revanche, l'utilisation des eaux souterraines dans ces pays est relativement limitée dans les secteurs de l'industrie et de l'énergie.

Le graphique 1.2 présente des estimations des superficies irriguées à partir d'eau souterraine et de la part qu'elles représentent dans la superficie irriguée totale des pays de l'OCDE pour l'année 2010 (voir aussi le tableau 1.A2. 1de l'annexe 1.A2). Les superficies irriguées à l'aide d'eau souterraine dans les pays de l'OCDE représentent quelque 23 millions d'hectares, soit environ 26 % du total des terres irriguées au niveau mondial (Siebert et al., 2010). Plus de la moitié sont situées aux États-Unis. Viennent ensuite le Mexique, la Turquie, l'Espagne, l'Italie, la France, la Grèce et l'Australie avec au moins 500 000 hectares de champs irrigués à partir d'eau souterraine.

Graphique 1.2. Superficie irriguée à partir d'eau souterraine et part dans la superficie irriguée totale dans les pays de l'OCDE (2010)



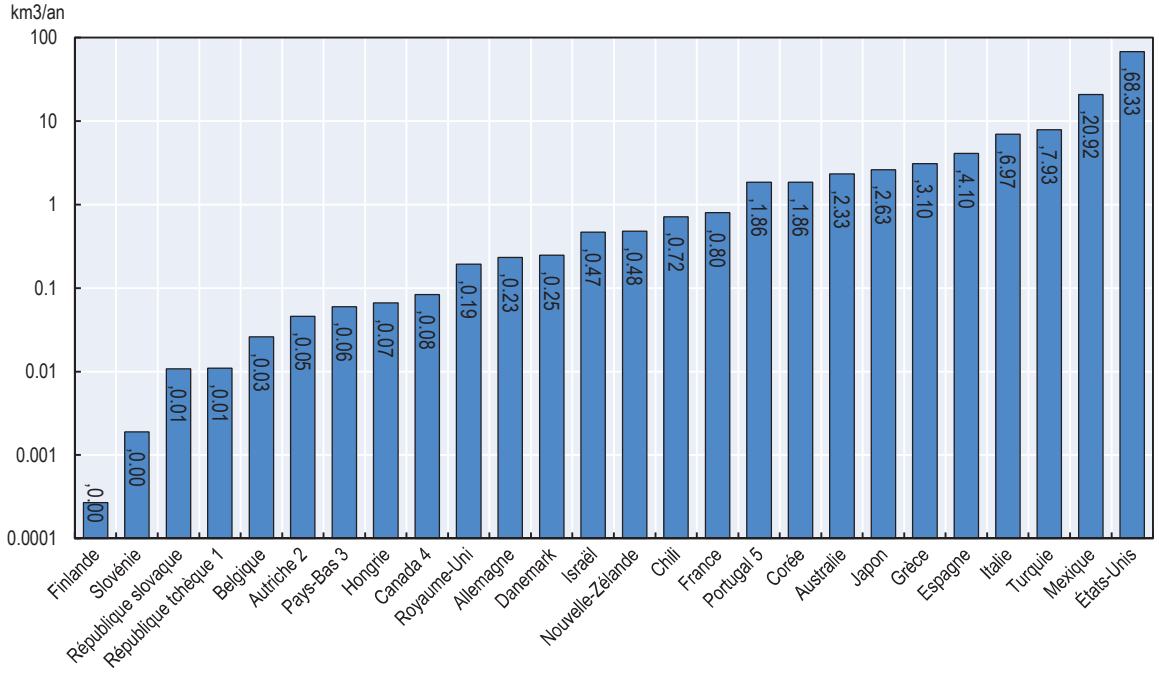
Pour faciliter la lecture du graphique, une échelle logarithmique a été utilisée. Le Canada et le Portugal sont exclus pour manque de données comparables. 1. La superficie irriguée en eau souterraine de la Corée ne comprend que les rizières ; il se peut qu'elle soit sous-estimée. *Source* : IGRAC (2012), ggmn.e-id.nl/ggmn/globaloverview.html, Questionnaire OCDE 2014 sur l'utilisation des eaux souterraines en agriculture.

Ce type d'irrigation est pratiqué pour diverses activités agricoles. Aux États-Unis, il concerne principalement les céréales (riz, blé, maïs), les oléagineux (soja et coton) et les cultures spécialisées (légumes, fruits, fruits à coque), pour lesquels les eaux souterraines constituent une source d'eau secondaire, notamment les années de sécheresse (NGWA, 2013 ; Esnault et al., 2014 ; voir annexe 1.A1). Il sert aussi pour la canne à sucre, le coton, le riz et les fruits à coque en Australie

(Deloitte Access, 2013), ainsi que dans les oliveraies, les vignobles, et la serriculture en Espagne et en Grèce (Garrido et al., 2006 ; Molinero et al., 2011 ; EASAC, 2010b). Compte tenu des exigences sanitaires et techniques associées à certaines techniques d'irrigation — dont les systèmes de goutte-à-goutte, qui nécessitent d'éviter les résidus sédimentaires risquant de les obstruer — l'irrigation à partir d'eau souterraine se prête relativement mieux à l'horticulture que l'irrigation à partir d'eau de surface.

D'après ces estimatiosn de 2010, les terres irriguées à l'aide d'eau souterraine représentent en moyenne 33 % du total des superficies irriguées dans les pays de l'OCDE, et plus de 30 % des terres irriguées dans la moitié des pays de l'OCDE (contre seulement un tiers en 2002) (OCDE, 2008). Égale à quelques pourcents dans les pays disposant de ressources en eau de surface relativement abondantes (l'Estonie et la Norvège, par exemple), cette part est plus élevée pour des pays s'appuyant plus sur leurs ressources en eau souterraines (comme l'Allemagne et le Danemark). Comme on pouvait s'y attendre, elle est aussi plus élevée dans les pays où les superficies irriguées sont les plus importantes, où elle varie entre 35 et 60 % (à l'exception de l'Australie).

Graphique 1.3. Estimations des prélèvements d'eau souterraine destinés à l'irrigation agricole (2010)



Pour faciliter la lecture du graphique, une échelle logarithmique a été utilisée. Les estimations présentées sont des estimations brutes, elles ne prennent pas en compte la recharge des aquifères associée aux activtiés agricoles. L'Estonie, l'Islande, le Luxembourg, la Pologne, la Norvège, la Suède et la Suisse ne sont pas inclus car ces pays déclarent une irrigation nulle ou négligeable.

1. Les chiffres concernant la République tchèque sont tirés d'OCDE (2013c).

2. Les chiffres concernant l'Autriche sont fondés sur les données de 2008-10.

3. Données correspondant à l'année 2011.

4. Données correspondant à l'année 2012.

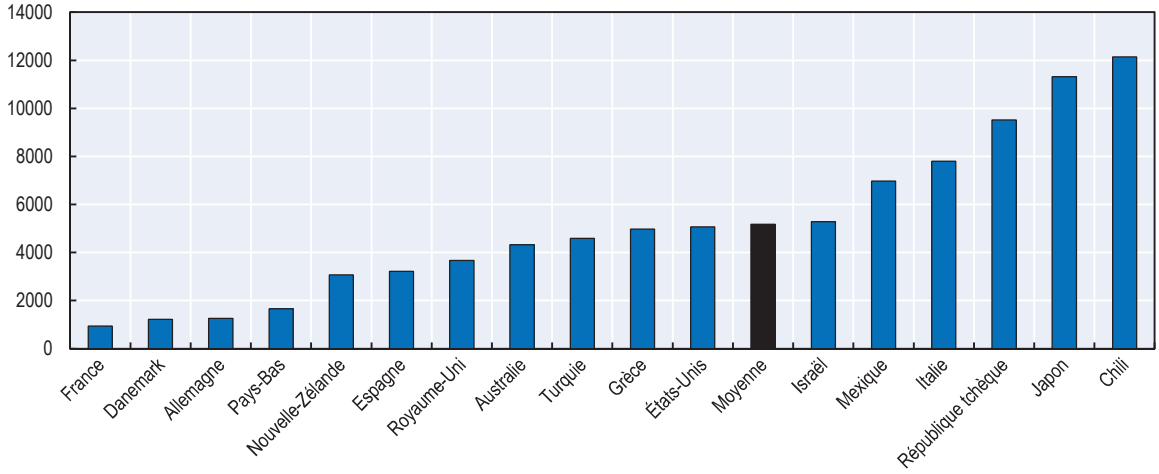
5. Données correspondant à l'année 2009.

Source : Questionnaire OCDE 2014 sur l'utilisation des eaux souterraines en agriculture et Margat et van der Gun (2013).

Le graphique 1.3 représente les prélèvements nationaux estimés d'eau souterraine destinés à l'agriculture en 2010 pour 2010, complétées par les données estimées par Margat et van der Gun (2013) pour la même année[14.] Les prélèvements d'eau souterraine de l'ensemble des pays de l'OCDE en 2010 sont estimés à 221.5 km^3/an, dont 56 %, soit 123.5 km^3/an, utilisés à des fins d'irrigation. Ces quantités prélevées pour l'irrigation représentent entre 18% et 23 % des prélèvements totaux d'eau souterraine pour l'irrigation à l'échelle mondiale pour la même année. Les États-Unis, le Mexique, la Turquie, l'Italie, l'Espagne et la Grèce affichent les prélèvements totaux pour l'irrigation les plus élevés. Les pays d'Europe du Nord et centrale, notamment la Pologne, la Suisse, la Norvège, la Suède et l'Estonie, n'utilisent quasiment pas de ressources en eau souterraine pour l'irrigation en agriculture.

Pour permettre une comparaison plus cohérente entre pays, le graphique 1.4 présente les ratios des prélèvements estimés d'eau souterraine à la superficie irriguée à partir d'eau souterraine pour certains pays de l'OCDE. Ce graphique aide à déterminer l'intensité relative de l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation. Six pays se démarquent avec des ratios sensiblement supérieurs à la moyenne de l'OCDE. Parmi eux, le Mexique, l'Italie et le Japon ont aussi recours à des quantités importantes d'eau souterraine. Le Portugal présente aussi une intensité d'irrigation importante, mais ne figure pas ici en l'absence d'information spécifique sur la superficie irriguée en eau souterraines, qui ne sont pas recensées au niveau national dans les statistiques de manière comparable a celles utilisées ici.[15] Les États-Unis, la Turquie, la Grèce, l'Espagne et l'Australie, en revanche, bien que parmi les plus importants utilisateurs, affichent une intensité d'irrigation en eau souterraine inférieure à la moyenne estimée de l'OCDE, de 5 194 m^3/ha en 2010.

Graphique 1.4. Prélèvements d'eau souterraine à des fins agricoles, par superficie, dans les pays de l'OCDE (2010)(m^3/ha)

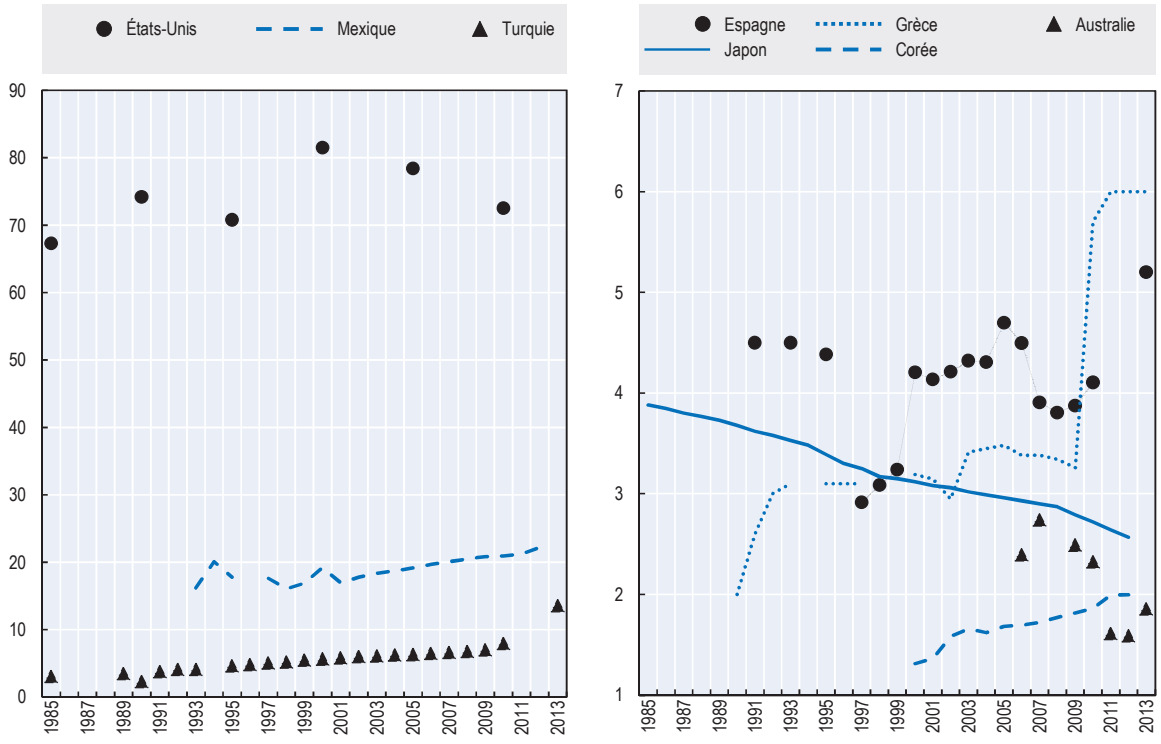


La Corée (en raison d'une superficie sous-estimée), le Portugal (en raison d'absence de données comparables sur les superficies) et les pays prélevant moins de 0.1 km^3/an ne sont pas représentés.

Source : D'après le Questionnaire OCDE 2014 sur l'utilisation des eaux souterraines en agriculture, Margat et van der Gun (2013) et les données IGRAC pour 2010, ggmn.e-id.nl/ggmn/globaloverview.html. Voir l'annexe 1.A2 pour de plus amples détails.

Graphique 1.5. Évolution des prélèvements totaux d'eau souterraine pour l'agriculture dans certains pays de l'OCDE (1985 -2010) (km^3/an)

Les chiffres englobent l'élevage et autres utilisations agricoles lorsque ces données sont disponibles



Source : OCDE (2013b), Questionnaire OCDE 2014 sur l'utilisation des eaux souterraines en agriculture et Margat et van der Gun (2013) pour 2010.

Encadré 1.1. Principes fondamentaux de l'écoulement des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont contenues dans la couche géologique saturée en eau située sous le plafond des aquifères (la surface de la zone saturée). La surface piézométrique peut être définie comme la limite entre les couches géologiques saturée et non saturée. Son niveau varie considérablement selon les endroits, mais aussi dans le temps en fonction des écoulements : c'est ainsi qu'il fluctue naturellement au rythme des précipitations saisonnières et baisse au fil du temps sous l'effet du pompage intensif destiné à l'irrigation.

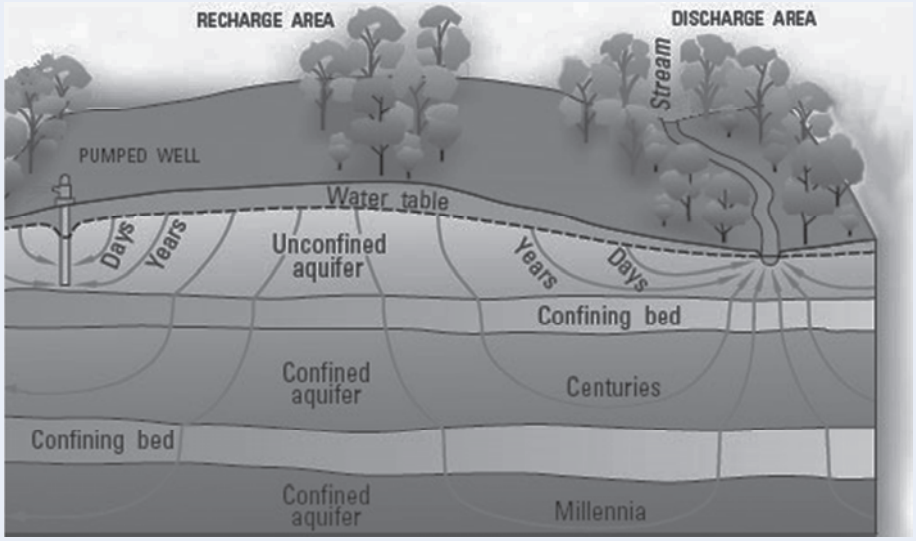
On distingue en général deux types d'aquifères : confinés et non confinés. Les aquifères confinés sont situés sous des couches géologiques peu perméables, de sorte que la pression de l'eau dans l'aquifère peut provoquer la remontée de l'eau au-dessus de la couche de confinement de faible perméabilité (ce qui produit un effet artésien lorsqu'un puits traverse l'unité de confinement et que l'eau jaillit à la surface). Les aquifères non confinés ne présentent pas d'unité de confinement entre l'aquifère et la surface terrestre, aussi la limite supérieure de l'aquifère est-elle représentée par la surface piézométrique. Dans de nombreuses régions, des aquifères confinés peuvent être surmontés par des aquifères non confinés, et les bassins hydrographiques de nombreuses régions du monde comportent de multiples couches d'aquifères confinés séparés par des unités peu perméables (souvent appelées aquitards). Les deux types d'aquifères peuvent être constitués de matériaux non consolidés (par exemple sables ou graviers meubles) et de matériaux consolidés (par exemple, roches sédimentaires, ignées ou métamorphiques perméables/fracturées). Les aquifères non confinés sont généralement situés à une moindre profondeur et présentent souvent une connexion hydraulique plus directe avec les masses d'eau de surface, mais ils sont aussi fréquemment moins étendus en superficie que les systèmes confinés, et plus susceptibles de contamination en provenance d'activités terrestres. Les aquifères confinés, plus profonds, peuvent être plus coûteux à exploiter.

suite

Encadré 1.1. Principes fondamentaux de l'écoulement des eaux souterraines *(suite)*

Outre leur structure, les caractéristiques fondamentales des aquifères sont les stocks et les flux qu'ils facilitent (Foster et al., 2013). Tous les aquifères présentent deux propriétés communes. D'une part, comme pour les eaux de surface, la gravité est la principale force motrice qui déplace les eaux souterraines des continents vers les cours d'eau et les océans. D'autre part, tous les aquifères sont soumis à des flux d'eau entrants et sortants naturels, mais les taux et la vitesse de recharge et de résurgence varient considérablement en fonction des caractéristiques locales (topographie, profil pédologique, géologie, etc.). Lorsque l'eau s'écoule sur de courtes distances (voir graphique 1.6), pour des caractéristiques locales similaires, et traverse des aquifères peu profonds non confinés, les flux évoluent en général beaucoup plus vite que lorsqu'elle s'écoule sur de longues distances à travers des aquifères confinés plus profonds.

Graphique 1.6. Représentation schématique des flux entrants et sortants d'eaux souterraines



Traduction des légendes : Recharge area : zone de recharge ; Discharge area : zone de résurgence ; Pumped well : puits pompé ; Stream : cours d'eau ; Days : jours ; Years : années ; Water table : surface piézomètrique ; Unconfined aquifer : aquifère non confiné ; Confined aquifer : aquifère confiné ; Confining bed : couche confinée ; Centuries : centaines d'années ; Millenia : milliers d'années.

Source: USGS Water Science School, Groundwater Discharge - The Water Cycle, http://water.usgs.gov/edu/watercyclegwdischarge.html.

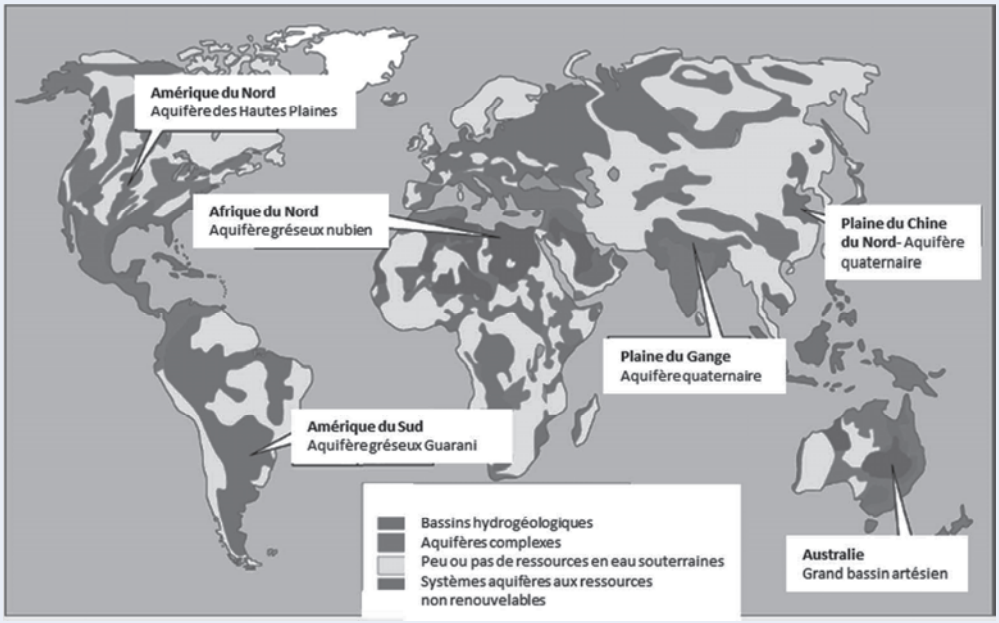
Un troisième aspect est le caractère renouvelable ou non de ressources en eau souterraine données. La valeur de cette caractéristique doit être interprétée en termes relatifs et reste sujette à débat. Tous les aquifères pourraient être renouvelés au moins en partie au bout d'un certain temps dans les conditions climatiques actuelles, mais le temps nécessaire à la recharge peut varier considérablement, allant de quelques jours à plusieurs centaines de milliers d'années. Dans ce contexte, les ressources hydriques de la grande majorité des aquifères, y compris ceux utilisés par les agriculteurs des pays de l'OCDE, peuvent être considérées comme renouvelables. La plupart des aquifères strictement non renouvelables[1] sont les grands aquifères profonds et captifs d'Afrique du Nord et de la péninsule Arabique (voir graphique 1.7). Ces masses d'eau souterraine, également appelées "aquifères fossiles", ont été formés dans le passé géologique et ne reçoivent pas de quantités significatives d'eau de recharge (Margat et van der Gun, 2013).

Naturellement, cela n'empêche pas un certain nombre d'aquifères renouvelables dans les pays de l'OCDE et ailleurs de s'appauvrir considérablement. Cependant, le ralentissement ou l'arrêt de leur exploitation pourraient permettre une reconstitution progressive de leurs réserves, tandis que l'utilisation même faible des aquifères non renouvelables s'apparente à une extraction irréversible semblable à celle des minéraux ou des combustibles fossiles.

Enfin, les eaux souterraines peuvent être extraites de multiples manières, impliquant généralement soit de tirer parti de la force de gravité soit d'utiliser une source d'énergie (Margat et van der Gun, 2013). Dans le premier cas, aucun apport énergétique extérieur n'est requis pour effectuer les prélèvements. Ces méthodes, qu'il s'agisse de drainages, de puits artésiens, de galeries d'infiltration ou de barrages souterrains, ne sont cependant pas adaptées à toutes les situations. La seconde catégorie comprend des moyens plus classiques destinés à l'agriculture, notamment des puits de pompage foncés ou forés au trépan, qui conviennent à un plus grand nombre de situations et se prêtent à une gestion plus souple, mais nécessitent une source d'énergie.

Encadré 1.1. Principes fondamentaux de l'écoulement des eaux souterraines (*suite*)

Graphique 1.7. Répartition des ressources en eau souterraine au niveau mondial



Source : Dérivé de Foster et al. (2013),"Groundwater — a global focus on the 'local resource'", in *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Volume 5, Issue 6, December 2013, pp. 685-695.

1. D'après Margat et van der Gun (2013), le temps moyen de renouvellement (ratio flux/réserve de ces aquifères) est très long (1 000 à 100 000 ans ou plus) par rapport à celui des aquifères renouvelables (de moins de 1 an à plusieurs centaines d'années).

Source : Travaux de l'auteur, d'après Foster et al. (2013) ; Margat et van der Gun (2013), et USGS (2014).

Les tendances historiques peuvent aussi fournir des informations complémentaires. Le graphique 1.5 montre l'évolution des prélèvements dans certains pays de l'OCDE affichant une utilisation relativement élevée d'eau souterraine pour l'agriculture entre 1985 et 2010. Elle illustre bien le caractère incomplet des séries de données. Les États-Unis, le Mexique et la Turquie sont représentés dans un graphique distinct pour des raisons d'échelle. Ces trois pays ont accru leur consommation au cours de la période de 25 ans considérée — encore qu'à un rythme fluctuant aux États-Unis. L'Espagne et la Grèce (graphique de droite) ont aussi sensiblement accru leurs prélèvements, mais à un rythme moins régulier. Le Japon a sensiblement réduit son utilisation des eaux souterraines à des fins agricoles, et celle de l'Australie semble relativement stable depuis quelques années. Certaines de ces évolutions pourraient être liées, d'une part, aux variations des conditions climatiques ainsi que de la disponibilité et de l'accès aux eaux de surface et, d'autre part, à l'évolution des utilisations concurrentes[16].

Il existe aussi dans certains pays des évaluations spécifiques au niveau des aquifères ; l'attention s'est focalisée en particuliers sur les 37 "grands" aquifères, définis par l'importance de leur étendue et de leur volume. L'encadré 1.1 donne un aperçu des principaux types d'aquifères et de leur incidence sur l'écoulement des eaux souterraines ; tous les aquifères ne sont pas considérés comme renouvelables, mais cette qualification reste relative. Le tableau 1.2 présente les caractéristiques fondamentales de huit grands systèmes aquifères présents dans les pays de l'OCDE.

Tableau 1.2. Grands systèmes aquifères des pays de l'OCDE

Pays	Nom	Superficie (milliers de km^2)	Épaisseur maximum (m)	Réserves théoriques (km^3)	Taux de recharge (km^3/an)
Australie	Grand bassin artésien	1 700	3 000	65 000	1.1
	Bassin de Canning	430	1 000	n.d.	n.d.
France	Bassin parisien	190	3 200	500-1 000	20-30
Canada et États-Unis	Aquifère des Grandes plaines du Nord	~2 000	n.d.	n.d.	n.d.
Mexique et États-Unis	Aquifère des plaines côtières de l'Atlantique et du Golfe du Mexique	1 500	12 000	n.d.	n.d.
États-Unis	Système aquifère cambro-ordovicien	250		n.d.	n.d.
	Système aquifère de la vallée centrale de Californie Système aquifère	80	600	1 130	7
	Système aquifère des Hautes Plaines (aquifère d'Ogallala)	450	150	~15 000	6-8

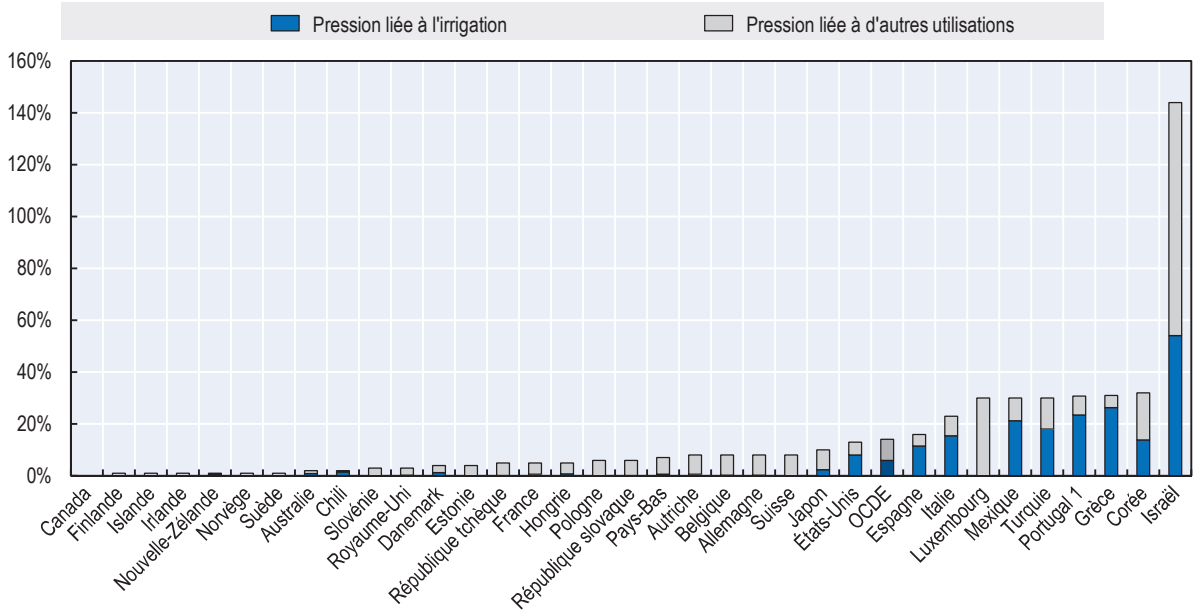
Note : n.d. = non disponible.
Source : Margat et van der Gun (2013) ; www.environment.gov.au/water/publications/watermatters/water-matters-may-2009.html.

De l'utilisation des eaux souterraines aux pressions sur les eaux souterraines

Si les volumes et les superficies constituent des indicateurs de l'importance des ressources hydriques souterraines destinées à l'irrigation, ils ne renseignent pas sur les risques de surexploitation. Le calcul de l'indice de pression sur les eaux souterraines (ou indice GDS, pour *Groundwater Development Stress*), à savoir le ratio des prélèvements d'eau souterraine à la recharge diffuse totale (naturelle et artificielle), offre un moyen simplifié d'évaluer le risque qui pèse sur ces ressources. D'importantes mises en garde s'imposent concernant cette mesure, en raison des erreurs possibles dans les données des deux côtés, qui peuvent influer sur la valeur absolue des ratios, et du fait que la durée des phénomènes de prélèvement et de recharge les nappes varie en fonction des caractéristiques de l'aquifère et de la saison (voir par exemple Vrap et Lipponen, 2007 : 101). Si ces indicateurs sont plus utiles au niveau des aquifères, ils donnent une idée de l'importance globale des prélèvements par rapport à la recharge à l'échelle nationale (Margat et van der Gun, 2013: 175-6). Les indices GDS nationaux sont présentés pour 2010 dans le graphique 1.8 sous forme de pourcentages de recharge pour les pays de l'OCDE, les utilisations agricoles (part de l'usage agricole multipliée par l'indice GDS) étant distinguées des autres.

L'indice dérivé de pression sur les eaux souterraines (GDS), qui s'élève à 14.1 % en moyenne dans les pays de l'OCDE, est pour 42 % (6%) attribuable à l'agriculture. Il est supérieur à cette valeur dans neuf pays membres, la part liée à l'utilisation agricole étant prédominante dans sept d'entre eux, à savoir Israël, la Grèce, le Portugal, la Turquie, le Mexique, l'Italie et l'Espagne. Il est légèrement inférieur aux États-Unis, mais la part imputable à l'agriculture (8.1 %) dépasse la moyenne des pays de l'OCDE[17]. En revanche, on constate sans surprise qu'il reste faible dans les pays bien dotés en ressources hydriques comme le Canada et les pays d'Europe du Nord. Entre les deux, en Europe en particulier, les pays affichent des indices de pression sur les eaux souterraines assez faibles (moins de 10 %) et en général, l'utilisation agricole n'en est pas la cause première.

Graphique 1.8. Estimations de la pression moyenne sur les eaux souterraines dans les pays de l'OCDE (2010)



Note : Les indicateurs sont calculés comme le ratio [ensemble des prélèvements nationaux d'eau souterraine estimés (agriculture plus autres secteurs) / recharge naturelle globale estimée] x 100, ce qui peut être interprété comme la proportion de la recharge moyenne utilisée pour l'agriculture par rapport aux autres utilisations. 1. L'indice GDS du Portugal est calculé en utilisant des estimations de 2013, suivant la réponse obtenue au Questionnaire OCDE 2014 sur l'utilisation des eaux souterraines en agriculture.
Source : D'après Margat et van der Gun (2013), Questionnaire OCDE 2014 sur l'utilisation des eaux souterraines en agriculture.

Ces chiffres nationaux peuvent masquer d'importantes différences au niveau local ou infranational. Pour mettre en évidence ces différences, des mesures de la pression exercée sur les eaux souterraines ont été compilées à l'échelle des aquifères. Des valeurs moyennes de l'indice GDS ont été estimées pour les aquifères de plusieurs pays, à partir de données du passé (voir tableau 1.3)[18]. Ces chiffres, qui remontent souvent à une période distante, ne distinguent pas l'agriculture des autres utilisations, mais dans nombre de ces régions, les eaux souterraines sont utilisées de manière intensive pour l'irrigation des terres agricoles. Au sein de l'OCDE, les indices GDS moyens correspondant aux systèmes aquifères plus intensément exploités d'Israël, d'Espagne, du Mexique et des États-Unis vont de 106 % en Israël à 1 022 % pour les aquifères alluviaux de l'Arizona.

Gleeson et al. (2012) ont obtenu une autre mesure en calculant l'empreinte "eau souterraine", en particulier dans les régions agricoles. Cette empreinte est définie comme "*la surface requise pour permettre d'utiliser les eaux souterraines et d'assurer les services écosystémiques tributaires de ces eaux dans une région considérée, par exemple un aquifère, un bassin versant ou une communauté*". Elle est calculée comme un indice GDS modifié — tenant compte des débits écologiques — multiplié par la superficie correspondant à ces flux[19]. Dans les pays de l'OCDE, les systèmes aquifères du Mexique et des États-Unis semblent se distinguer par l'importance de l'empreinte eau souterraine de leur secteur agricole.

Tableau 1.3. Estimation de la pression exercée sur les eaux souterraines renouvelables (indice GDS) dans certains aquifères des pays de l'OCDE

Pays	Système aquifère	Année de l'estimation	Taux de prélèvement (km^3/an)	Pression sur les eaux souterraines renouvelables
Israël	Aquifère côtier	1999-2000	0.55	178 %
	Aquifère de montagne	1999-2000	0.76	106 %
Mexique	Vallée de Mexico	1998	0.63	~200 %
	Baja California	1980	0.12	150 %
Espagne	Mancha Occidental	1989	0.58	171 %
	Campo de Cartagena	1989	0.075	231 %
	Sierra de Crevillente	1989	0.015	750 %
	Campo de Dalias	1989	0.11	123 %
	Îles Baléares	1989	0.285	109 %
	Îles Canaries	1989	0.34	110 %
États-Unis	Arizona (aquifères alluviaux)	1990	3.78	1022 %
	Vallée centrale de Californie	1990	20	286 %
	Aquifère des Hautes Plaines	2000	21.5	~300 %

Source : Margat et van der Gun (2013).

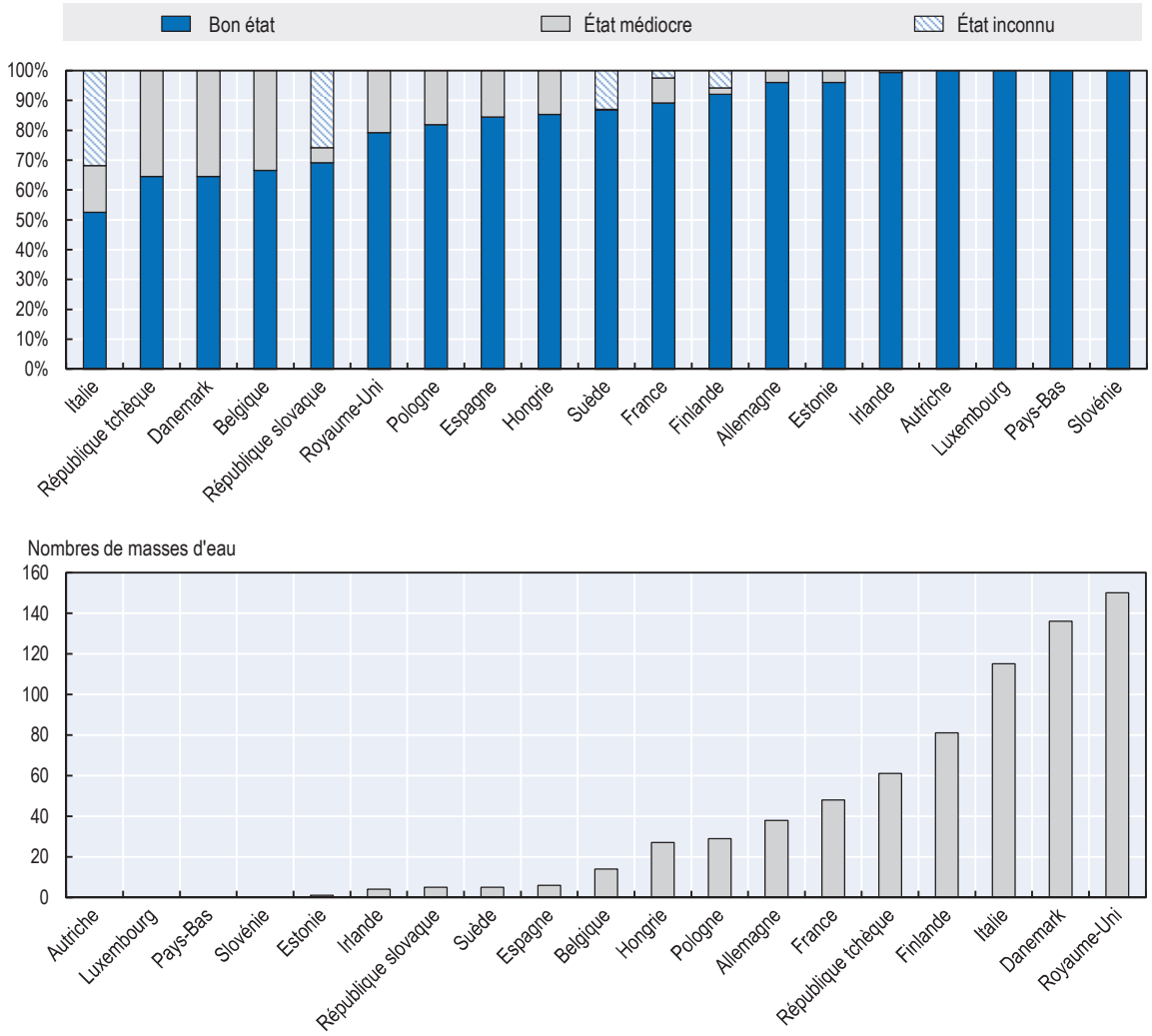
Des évaluations multicritères ont aussi été utilisées pour assurer le suivi des bassins hydrogéologiques dans l'Union européenne (UE). En application de la directive-cadre européenne sur l'eau (DCE), adoptée en 2000, chaque État membre de l'UE a été tenu de définir des districts hydrographiques à des fins de gestion (eaux superficielles et souterraines), et pour chacune de ces unités, d'évaluer si l'état quantitatif et l'état chimique des ressources en eau souterraine sont bons ou médiocres. Du point de vue quantitatif, plusieurs critères ont été définis pour déterminer le "bon" état d'une masse d'eau souterraine. Il faut notamment que le taux de captage d'eau souterraine ne dépasse pas une moyenne annuelle à long terme, et n'entraîne pas d'externalités environnementales (voir l'encadré 4.2 dans le chapitre 4). Cette définition multicritères n'est pas axée uniquement sur les stocks et les flux, mais renvoie aussi aux implications plus larges de l'utilisation des eaux souterraines.

Or, même avec cette définition, la mesure des quantités d'eau souterraine n'est pas une opération simple, et les méthodes pratiques utilisées varient sensiblement d'un pays à l'autre. Compte tenu de ces limites, le graphique 1.9 montre l'état annoncé des masses d'eau souterraine dans 19 pays européens de l'OCDE, compte tenu des informations disponibles en 2009. Le graphique du haut représente la part dans le nombre total de masses d'eau souterraine dont l'état quantitatif est bon ou mauvais, et la part des masses d'eau souterraine qui doivent encore être évaluées. Si seulement 6 % des 11 897 masses d'eau de ces pays ont été estimées en état médiocre (et 7 % encore indéterminées), le graphique montre que cette part est non négligeable dans certains pays de l'UE. Le graphique du bas montre le nombre absolu de masses d'eau souterraine dont l'état était médiocre dans les mêmes pays en 2009. Sur les 15 pays dont les masses d'eau souterraine sont dans un état "médiocre", six seulement sont d'importants utilisateurs d'eau souterraine pour l'agriculture (graphique 1.3).

Graphique 1.9. État quantitatif des masses d'eau souterraine dans certains pays européens de l'OCDE soumis à la directive-cadre sur l'eau en 2009

En haut : Part des masses d'eau souterraine dont l'état est bon, médiocre ou inconnu.

En bas : Nombre de masses d'eau souterraine dont l'état quantitatif est médiocre



Source : AEE (2012), www.eea.europa.eu/data-and-mps/data/wise-wfd.

Les flux entrants et sortants d'eau souterraine ont aussi été étudiés plus en détail pour certains des grands aquifères. Aux États-Unis, l'aquifère des Hautes Plaines (également appelé aquifère d'Ogallala) et celui de la vallée centrale de Californie sont peut-être les plus étudiés dans le contexte de l'agriculture. À elles deux, ces régions contribuent pour moitié environ à l'appauvrissement total des ressources en eau souterraine constaté aux États-Unis depuis 1900 (Scanlon et al., 2012). Comme le montre le graphique 1.10, ces deux systèmes ont été soumis à une forte surexploitation, et la chute du niveau des nappes phréatiques a pu atteindre, voire dépasser, les cinquante mètres dans certains portions de l'aquifère sur la période étudiée. Néanmoins, le graphique 1.10 montre que cette baisse varie au sein des régions concernées. Dans le cas de l'aquifère des Hautes Plaines, les parties centrales et méridionales de l'aquifère (sud-ouest du Kansas et nord du Texas) sont particulièrement touchées par l'abaissement des nappes sous l'effet de l'irrigation agricole (voir, par exemple, Chaudhuri et Ale, 2014), tandis que toute la partie nord de l'aquifère, qui reçoit des flux de recharge naturelle plus

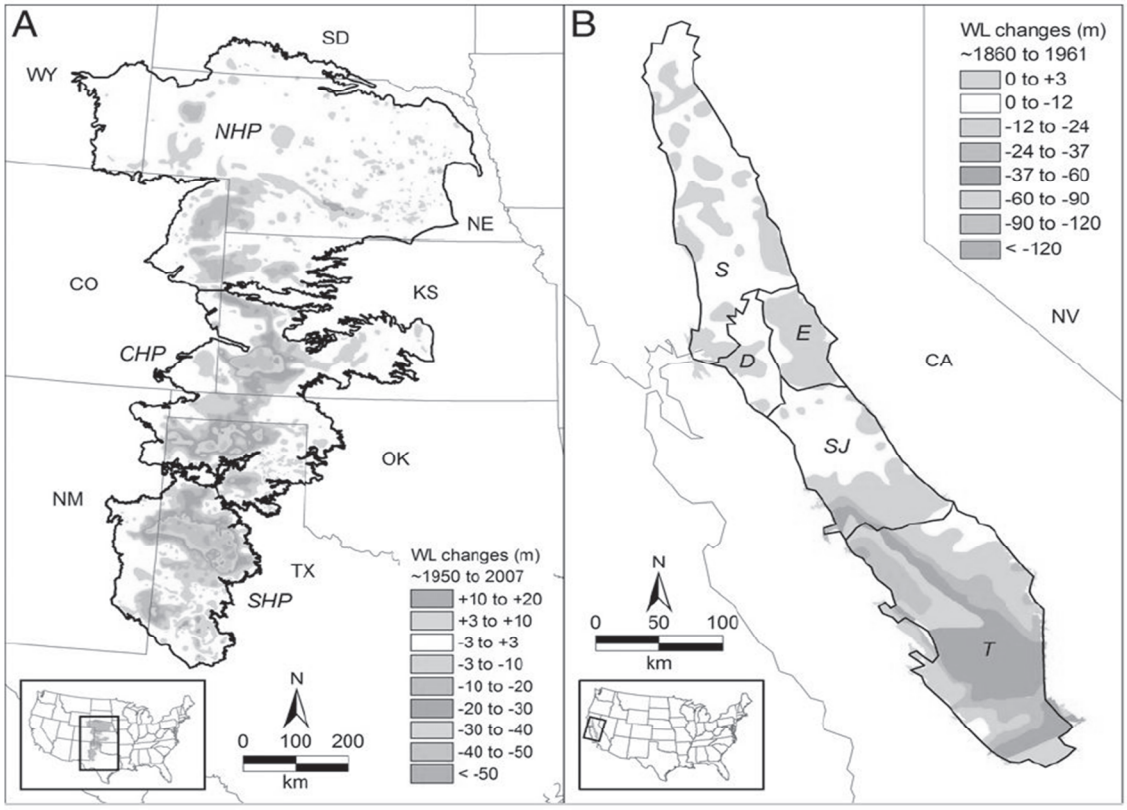
conséquents, n'est guère concernée et a même vu les niveaux d'eau souterraine remonter par endroits. De même en Californie, le sud du comté de San Joaquin (SJ) et Tulare (T) sont les principaux "points noirs" au regard de la baisse du niveau des ressources en eau souterraine, alors que le nord de la vallée, mieux doté en ressources hydriques et en eaux de surface, ne connaît pas vraiment d'appauvrissement de ses ressources en eau souterraine.

L'incidence de ces risques d'épuisement des ressources en eau souterraine sur l'agriculture n'a été étudiée au niveau local que dans un contexte plus dynamique pour certaines régions critiques. Steward et al. (2013) se sont intéressés à la portion de l'aquifère Ogallala située au Kansas. À l'aide d'un modèle de simulation, ils ont établi qu'aux taux de pompage actuels — sans amélioration de l'efficacité d'irrigation — la production de maïs et de bétail atteindrait un pic vers 2040-2050, puis diminuerait. Ces auteurs ont également montré que, pour assurer le maintien de la production agricole aux niveaux du milieu des années 1990 au-delà de 2070, il faudrait réduire le taux d'irrigation d'au moins 20 %.

Graphique 1.10. Variation du niveau des eaux souterraines de deux grands systèmes aquifères des États-Unis

(A) : Variation du niveau des nappes phréatiques (m) de l'aquifère des Hautes Plaines, mesurée entre 1950 et 2007,

(B) : Variation du niveau des nappes phréatiques (m) dans la vallée centrale de Californie entre 1860 et 1961 (simulation)



Source : Scanlon et al. (2012).

Les effets attendus du changement climatique : recours accru aux eaux souterraines, baisse du taux de recharge et salinité croissante

On sait que les aquifères réagissent beaucoup plus lentement aux fluctuations du climat que les réserves d'eau de surface, et qu'ils pourraient par conséquent constituer une importante option d'adaptation dans l'agriculture (GWP, 2012 ; OCDE, 2014a ; Wijnen et al., 2012). Or l'augmentation de la demande sous l'effet du changement climatique se traduira sans doute par une utilisation accrue des eaux souterraines (Bovolo et al., 2009). Jusqu'à présent, les facteurs climatiques n'ont pas eu autant d'impact sur les eaux souterraines que les facteurs non climatiques (Kundzewicz et al., 2007). Cependant, avec les variations des précipitations et l'intensification de l'évapotranspiration, le changement climatique aura nécessairement une incidence sur les ressources hydriques souterraines, directement du fait de la modification du taux de recharge, et indirectement sous l'effet du recours accru aux eaux souterraines (Taylor et al., 2012). Ces répercussions devraient varier sensiblement d'une région à l'autre (Green et al., 2011), par exemple avec l'augmentation (la diminution) des précipitations et de la recharge des nappes souterraines en Europe du Nord (du Sud) (Hiscock et al., 2008 ; Negrel et Petelet-Giraud, 2011). Conjuguée à l'élévation du niveau des océans, l'augmentation de l'utilisation d'eau souterraine dans les zones côtières pourrait aussi contribuer à aggraver la salinité des eaux souterraines (Green et al., 2011).

Dans une certaine mesure, les effets attendus du changement climatique sur l'agriculture s'observent d'ores et déjà dans les régions subissant des inondations et des sécheresses. Les régions confrontées à la sécheresse qui exploitent à la fois les eaux souterraines et les eaux de surface pour l'irrigation substituent les premières aux secondes, ce qui se traduit par une extraction et une utilisation accrues de la ressource. On a ainsi estimé qu'en Californie centrale, la baisse du volume des ressources en eau souterraine a été 48 fois plus rapide qu'auparavant au cours de la sécheresse de 2007-2009 (Christian-Smith et Levy, 2011). Par ailleurs, les régions où l'agriculture repose principalement sur les eaux souterraines intensifieront leur exploitation de cette ressource[20]. Les régions côtières, par exemple aux Pays-Bas, seront sans doute confrontées à une probabilité accrue d'intrusion d'eau marine et par conséquent d'augmentation de la salinité (de Louw, 2013). Dans ces deux types de régions, les profils de culture et les activités agricoles peuvent aussi être amenés à évoluer. À l'inverse, les régions confrontées à des crues prolongées pourraient subir des inondations par débordement des eaux souterraines, ce qui empêcherait la plupart des activités agricoles et limiterait l'utilisation des terres agricoles au seul drainage, comme dans le cas de l'aquifère crayeux du Sud de l'Angleterre (Marsh et al., 2013).

Faute de données représentatives sur les ressources en eau souterraine de nombreuses régions, et compte tenu des incertitudes liées au changement climatique, simuler l'incidence de ce phénomène sur l'irrigation à l'aide d'eau souterraine n'est pas une tâche aisée (Green et al., 2011). Deux types d'approches ont été adoptés pour donner une indication de futures évolutions : les exercices de prospective et les simulations à l'aide de modèles climat-eau.

L'OCDE (2013d) s'est penchée sur les risques futurs pour les ressources hydriques dans le cadre d'une étude plus générale sur l'eau et le changement climatique. Au cours de cet exercice, on a demandé aux experts des pays de définir les principaux risques liés à l'eau qu'ils prévoyaient, de dresser une liste des risques quantitatifs et qualitatifs prioritaires et des principaux domaines de vulnérabilité. Le tableau 1.4 résume les réponses mentionnant explicitement les risques quantitatifs liés aux ressources en eau souterraine. Ce tableau montre que les pays de l'OCDE qui n'utilisent pas de grands volumes d'eau souterraine nourrissent pourtant des préoccupations notables liées au changement climatique. La diminution de la recharge, tant en rythme qu'en quantité, devrait être prévalente dans des pays comme l'Autriche, le Luxembourg et la Slovénie. La salinisation des eaux souterraines constitue l'autre source d'inquiétude, en particulier dans les pays possédant des zones

côtières étendues, comme le Chili ou le Japon. Les experts au Danemark et dans le sud de l'Europe agriculture, en particulier, considèrent que l'agriculture pourrait être un secteur potentiellement affecté.

Tableau 1.4. Problèmes liés à l'impact du changement climatique sur les ressources en eau souterraine dans les pays de l'OCDE

Pays	Impact prévu	Problème principal	Principales vulnérabilités
Autriche	Réduction de la durée de l'enneigement, diminution de la recharge des nappes souterraines	Diminution de la recharge des nappes souterraines	
Chili	Le retrait des glaciers aura un impact sur les eaux souterraines	Diminution de la recharge moyenne des nappes souterraines, salinisation des eaux souterraines dans les zones côtières	
Corée	Épuisement des ressources en eau souterraine		
Danemark	Le ralentissement de la formation d'eau souterraine en été et son accélération le reste de l'année auront une incidence sur l'irrigation. Intrusion d'eau de mer dans les nappes souterraines		Demande accrue de ressources en eau souterraine
Estonie	Augmentation de la recharge des nappes souterraines, en fonction des conditions hydrogéologiques propres aux bassins hydrographiques.		
Finlande	Réduction de la recharge des nappes souterraines en raison de l'allongement de la période sèche en été dans le sud du pays.		
Hongrie			Surexploitation des ressources en eau souterraine
Japon	Salinisation des eaux souterraines due à l'élévation du niveau de la mer.		
Luxembourg	Décalage dans le temps de la principale période de recharge des nappes souterraines.		Recharge des nappes souterraines
Mexique	Intrusion d'eau salée dans les nappes souterraines		
Nouvelle-Zélande	Diminution des ressources en eau souterraine et augmentation de la demande d'eau en été		
Pays-Bas	Possibilité de salinisation des eaux souterraines et de baisse du niveau des ressources en été.		
République tchèque		Baisse du niveau des nappes souterraines	
Slovénie		Diminution du taux annuel de recharge des nappes souterraines	
Union européenne	Expansion des masses d'eau souterraine saumâtre ou salée		Ressources en eau douce d'Europe méridionale, en particulier dans le secteur agricole

Source : OCDE (2013d), http://dx.doi.org/10.1787/9789264200647-fr.

Un certain nombre d'études publiées, qui ne sont pas spécifiquement axées sur le changement climatique, font état d'une augmentation probable de l'utilisation des eaux souterraines pour l'agriculture, alors même que les projections globales relatives à l'irrigation ne laissent pas toutes prévoir une telle augmentation. L'irrigation à partir d'eau souterraine continuera de soutenir l'intensification de l'agriculture (FAO, 2003 ; Garrido et al., 2006). Les facteurs économiques contribueront à accroître la consommation d'eau à usage agricole et les pressions exercées sur les aquifères, en particulier dans la région méditerranéenne (Garrido et Iglesias, 2006). En Australie, la valeur et l'utilisation des eaux souterraines sont aussi appelées à augmenter compte tenu des projections relatives à la demande, de l'insuffisance des ressources en eau de surface et du fait que les eaux souterraines sont exploitées en deçà des taux de recharge dans plusieurs régions à l'exception des aquifères fossiles (Deloitte Access Economics, 2013). Or, les projections globales relatives à l'irrigation ont tendance à diverger (OCDE, 2015) ; les Perspectives de l'environnement de l'OCDE laissent prévoir une baisse de la demande d'irrigation en 2050, à l'inverse d'autres travaux de modélisation. Une diminution de l'irrigation totale parallèlement à une croissance de l'irrigation à l'aide d'eau souterraine propulserait la part de cette dernière forme d'irrigation à un niveau beaucoup plus élevé. Dans ce scénario, les eaux souterraines prendraient encore plus d'importance pour l'agriculture dans le contexte du changement climatique.

Plusieurs simulations des effets du changement climatique sur les ressources en eau souterraine ont été réalisées. Ces analyses utilisent généralement le taux de recharge des nappes comme variable représentant les impacts du changement climatique sur les ressources en eau souterraine. Leterme et Maillants (2011) ont étudié l'incidence du changement climatique sur les eaux souterraines et l'agriculture en Belgique. Ils sont parvenus à la conclusion que d'ici à 2100, on pourrait observer une diminution de 9 % de la recharge globale du bassin versant de la Nèthe. D'après l'étude des mesures d'adaptation envisageables en matière d'utilisation des terres, une conversion des terres à la culture du maïs contribuerait à augmenter la recharge des nappes souterraines et, par conséquent, à réduire la sensibilité au climat, tandis qu'une conversion en superficie forestière produirait l'effet inverse. Selon une étude de modélisation consacrée à l'évolution prévue des ressources en eau souterraine dans différents scénarios de changement climatique en France, la baisse du taux de recharge pourrait varier en moyenne entre 0 % et 50 % d'ici à 2070, avec des écarts plus importants au niveau des bassins versants, et s'accompagner de risques d'intrusion d'eau saline dans les aquifères côtiers (MEDDE, 2012). D'après le rapport du GIEC (2007), un réchauffement de 2.4 °C entraînerait une baisse de 20 % du taux de recharge dans l'aquifère Ogallala aux États-Unis. Cependant, en fonction du scénario et de la portion d'aquifère considérée, la recharge pourrait soit croître soit décroître, aussi est-il difficile de tirer des conclusions significatives (Crosbie et al., 2013). Dans un modèle hydrogéologique à haute résolution axé sur l'aquifère de Grand Forks en Colombie britannique (Canada), Scibek et al. (2007) montrent que la réduction des taux de recharge sous l'effet du changement climatique pourrait se traduire non seulement par un abaissement du niveau des nappes, mais aussi par d'importants rejets dans les masses d'eau de surface (avec les conséquences que cela peut entraîner pour le débit minimal des cours d'eau).

Après cet aperçu de l'utilisation et de l'évolution des ressources en eau souterraine dans le secteur agricole, le chapitre 2 analyse la nature et l'hétérogénéité des systèmes d'irrigation à partir d'eau souterraine et les défis auxquels ils sont confrontés.

Notes

1. Un aquifère peut être défini comme « une unité géologique perméable saturée (roche, sédiment ou sol) pouvant transmettre des quantités d'eau significatives ou présentant un intérêt économique » (Freeze et Cherry, 1979).
2. La consommation de l'eau peut être définie comme l'utilisation d'eau sans restitution directe au cycle de l'eau, c'est-à-dire via l'évapotranspiration.
3. Dans ce cas, les caractéristiques physiques intrinsèques sont à interpréter en l'absence de régulation des flux, c'est-à-dire dans le contexte d'un système hydrologique naturalisé.
4. On parle aussi d'« épuisement des ressources en eau souterraine » pour désigner ce phénomène (voir, par exemple, OCDE, 2012a).
5. Les variations du niveau des nappes phréatiques peuvent aussi affecter les processus biogéochimiques, qui à leur tour peuvent influer sur les écosystèmes.
6. L'ampleur du drainage des eaux souterraines à des fins agricoles et pour la gestion des crues ne sera pas examinée de près.
7. Les préoccupations relatives à la qualité des eaux souterraines ne semblent pas limiter les superficies irriguées de façon intensive et continue à partir de ces ressources, sauf en ce qui concerne la salinité, même s'il ressort de l'enquête que certaines des régions de l'OCDE faisant appel aux eaux souterraines pour l'agriculture rencontrent des problèmes de qualité.
8. Comme le souligne Giordano (2009), cette ressource invisible a connu une révolution silencieuse, ce qui illustre la différence de point de vue entre les besoins en matière d'extraction au niveau des exploitations agricoles et les diagnostics à plus grande échelle.

9 C'est ainsi qu'en Espagne, aucun aperçu des ressources hydrogéologiques et de leurs usages au niveau national n'a été réalisé depuis 2000-2001 (De Stefano et al., 2013).

10. Par ailleurs, les estimations du bilan des aquifères sont rarement prises en compte dans les bilans des bassins versants et des eaux de surface, de sorte que le volet des bilans hydriques globaux relatif aux débits de base manque de précision.
11. Un certain nombre d'estimations générales figurant dans la présente section s'appuient sur les travaux de Margat et van der Gun (2013), essentiellement du fait que ces auteurs sont parmi les seuls à avoir compilé des données cohérentes et comparables sur les ressources et leur utilisation dans différents pays, en choisissant une date de référence commune, et en utilisant et harmonisant des données provenant de multiples bases de données nationales et internationales. Leurs travaux ont à l'origine été lancés sous les auspices du programme UNESCO-PHI ; voir Margat (2008) et van der Gun (2012).
12. Notamment chercheurs de l'Institut international de la gestion de l'eau (IWMI), de l'Institut international de recherche sur les politiques alimentaires (IFPRI), du Pacific Institute et du Programme hydrologique international de l'UNESCO (PHI), J. Margat et J. van der Gun, ainsi que diverses universités (Université complutense de Madrid, Georgetown University, Oregon State University, Université Polytechnique de Madrid, University of California-Davis et Université de Wageningen).
13. À partir de différentes sources (comme expliqué à l'annexe 1.A3), Margat et van der Gun (2013) estiment ces prélèvements à 982 km3/an en 2010.

14. L'année 2010 a été utilisée à des fins de cohérence, pour effectuer la compilation des données et calculer les ratios. Les données officielles pour les autres années ont servi à dériver les tendances indiquées dans le graphique 1.5. On trouvera à l'annexe 1.A3 des informations complémentaires sur la méthode utilisée par Margat et van der Gun (2013).

15. Le rapport "utilisation totale/superficie" pour l'agriculture irriguée au Portugal, pregnant en compte l'irrigation à base d'eau de surface et à base d'eau souterraine, a été estimée à 7 300m3/ha en 2009 (INE, 2011), tandisque le rapport "utilisation des eaux souterraines/superficie"calculée en utilisant les données de l'enquête OCDE 2014 (pour l'année 2012) et IGRAC (2012) (pour l'année 2010) est estimée à 13 636 m3/ha.

16. Les tendances pour les autres pays de l'OCDE où l'utilisation agricole des eaux souterraines est moindre sont présentées à l'annexe 1.A2.

17. Israël affiche un indice GDS particulièrement élevé, puisqu'il dépasse les 100 % en ce qui concerne la pression imputable à l'agriculture, mais cet indice a pu être surévalué, le recyclage de l'eau n'ayant pas été pris en compte dans les réserves d'eau souterraine. Le chiffre officiel du Portugal pour le stress hydrique total (eaux de surface et eaux souterraines) est de 31%, dont 24% sont imputables à l'agriculture (INE, 2011).

18. Ces chiffres correspondent aux taux de recharge des ressources renouvelables pour l'ensemble des utilisations.

19. Plus précisément, Gleeson et al. (2012) calculent l'empreinte eau souterraine comme A[C/(R-E)], où C, R et E représentent respectivement la superficie correspondant au prélèvement annuel moyen d'eau souterraine, le taux de recharge des nappes souterraines et la contribution des eaux souterraines aux débits environnementaux, tous exprimés en unités de longueur/temps. A est l'aire de la région considérée où C, R et E peuvent être définis.

20. Dans ces cas, il convient de distinguer les effets de l'adaptation à court terme et à long terme. Hornbeck et Keskin (2014) ont montré, par une analyse empirique, que les utilisateurs de l'aquifère Ogallala qui adoptaient précocement des pratiques d'irrigation les rendant moins vulnérables à la sécheresse finissaient à long terme par se convertir à des cultures intensives en eau, perdant ainsi leur avantage et retrouvant leur vulnérabilité à la sécheresse.

Références

Amores, M.J. et al. (2013), "Biodiversity impacts from salinity increase in a coastal wetland", *Environmental science & technology*, 47(12), 6384–92.

AQUASTAT (2013), "FAO's global information system on water and agriculture", www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm

Bovolo, C.I., G. Parkin and M. Sophocleous (2009), "Groundwater resources, climate and vulnerability", *Environmental Research Letters*, Vol. 4 (035001).

British Geological Survey (BGS) (2009), "Groundwater Information Sheet", London, UK.

Chaudhuri, S., and S. Ale (2014), "Long-term (1930-2010) trends in groundwater levels in Texas: Influences of soils, land cover and water use", *Science of the Total Environment*, Vol. 490, pp. 379–90. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.05.013

Christian-Smith, J. and M. Levy (2011), "Impacts of the California Drought from 2007 to 2009", Pacific Institute, Oakland, CA, www.circleofblue.org/waternews/wp-content/uploads/2013/04/ca_drought_impacts_full_report.pdf

Cohen, M., J. Christian-smith, and J. Berggren (2013), "Water to Supply the Land: Irrigated Agriculture in the Colorado River Basin", Pacific Institute, Oakland, CA.

Council of Canadian Academies (2013), "Water and Agriculture in Canada: Towards Sustainable Management of Water Resources", CCA, Ottawa, www.scienceadvice.ca/en/assessments/completed/water-agri.aspx.

Crosbie et al. (2013), "Potential climate change effects on groundwater recharge in the High Plains Aquifer, USA", *Water Resources Research*, Vol. 49, pp. 3936–3951.

Deloitte Access Economics. (2013), "Economic Value of Groundwater in Australia", Report for the National Centre on Groundwater Management, Melbourne.

de Louw, P. (2013), "Saline seepage in deltaic areas", Vrije Universiteit Amsterdam, the Netherlands. Retrieved from http://dare.ubvu.vu.nl/bitstream/handle/1871/48937/title_page.pdf?sequence=5.

De Stefano, L., et al. (2013), "Easier Said Than Done? The Establishment of Baseline Groundwater Conditions for the Implementation of the Water Framework Directive in Spain", *Water Resources Management*, Vol. 27(7), pp. 2691–2707.

DWF (Danish Water Forum)(2012), "Higher water security with groundwater", White Paper, Water Resources, October 2012.

EASAC (European Academies Science Advisory Council)(2010a), "Groundwater in the Southern Member States of the European Union", *EASAC Policy Report* 12, EASAC, Halle.

EASAC (European Academies Science Advisory Council) (2010b), "Groundwater in the Southern Member States of the European Union: an assessment of current knowledge and future prospects- Country report for Greece", EASAC, Brussels, Belgium. www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Greece_Groundwater_country_report.pdf

Esnault, L., et al. (2014), "Linking groundwater use and stress to specific crops using the groundwater footprint in the Central Valley and High Plains aquifer systems, USA", *Water Resources Research*, Vol. 50, pp. 1–21.

EEA (European Environmental Agency) (2012), WISE Water Framework Directive Database, Copenhagen. www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/wise_wfd.

EUROSTAT (2013), "Statistics on the EU and candidate countries", website: epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/.

Famiglietti, J. and M. Rodell (2013), "Water in the Balance", *Science*, Vol. 340, pp. 1300–1301.

Famiglietti et al. (2011), "Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley", *Geophysical Research Letters*, Vol. 38(3).

FAO (United Nations Food and Agricultural Organization) (2011), "The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing systems at risk", Food and Agricultural Organization Publications, Rome.

FAO (2003), "Groundwater management: the search for practical approaches", *Water Reports*, Vol. 25, Food and Agricultural Organization Publications, Rome.

Foster, S., et al. (2013) "Groundwater — a global focus on the "local resource"", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 5(6), pp. 685–695.

Foster, S. (2008), "The use of non-renewable groundwater resources", Presentation at the International Groundwater Resource Assessment Center (IGRAC) 5th Anniversary Symposium, The World Bank, Washington DC.

Freeze, R.A. and J.A. Cherry (1979), *Groundwater*, Prenctice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Fuentes, A. (2011), "Policies towards a sustainable use of water in Spain", OECD Economics Department Working Paper No. 840, OECD, Paris, France. http://www.oecd-ilibrary.org/economics/oecdeconomics- department-working-papers_18151973, accessed July 2013.

Garduño, H, and S. Foster. (2010), "Irrigated agriculture and groundwater resources-towards an integrated vision and sustainable relationship", *Water Science & Technology*, Vol. 67(6), 1165.

Garrido, A. et al. (2006), "Groundwater irrigation and its implications for water policy in semiarid countries: the Spanish experience", *Hydrogeology Journal*, Vol. 14(3), pp. 340–349.

Garrido, A and A. Iglesias (2006), "Groundwater's role in managing water scarcity in the Mediterranean Region", International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS), pp. 113–138.

Giordano, M. (2009), "Global Groundwater? Issues and Solutions", *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 34(1), pp. 153–178.

Giordano, M. and K. G. Villholth (eds.) (2007), *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development*, CABI, Oxford.

Gleeson, T. et al. (2012), "Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint", *Nature*, Vol. 488(7410), pp.197–200, doi:10.1038/nature11295.

Gleeson, T. and M. Cardiff (2013), "The return of groundwater quantity: a mega-scale and interdisciplinary "future of hydrogeology"?", *Hydrogeology Journal*, Vol. 21(6), pp. 1169–1171.

GWP (Global Water Partnership) (2012), "Groundwater Resources and Irrigated Agriculture", GWP, Stockholm, Suède.

Gollehon, N. and W. Quinby (2006), "Irrigation resources and water costs", in US Department of Agriculture (USDA), *Agricultural Resources and Environmental Indicators*, 2006 Edition, EIB-16, Economic Research Service, USDA, Washington, D.C., pp. 24-32.

Green, T. R. et al. (2011), "Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater", *Journal of Hydrology*, Vol. 405(3-4), pp. 532–560.

Hellegers, P. et al. (2001), "Dynamics of agricultural groundwater extraction", *Ecological Economics*, Vol. 37(2), pp. 303–311.

Hernandez-Mora N. et al. (2003), "Intensive Groundwater Use in Spain", in Llamas, R. and E. Custodian (eds.), *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*, Balkemapp, Lisse, pp 387–414.

Hiscock, K. et al. (2008), "Evaluation of future climate change impacts in Europe on potential groundwater recharge", *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, 3pp.

Hornbeck, R. and P. Keskin (2014), "The Historically Evolving Impact of the Ogallala Aquifer: Agricultural Adaptation to Groundwater and Drought", *American Economic Journal: Applied Economics*, Vol. 6(1), pp. 190–219, doi:10.1257/app.6.1.190

Howitt et al. (2014), "Economic Analysis of the 2014 Drought for California Agriculture", Center for Watershed Sciences, University of California Davis, CA.

IGRAC (2012), "Global groundwater information system, Global overview", updated May 2012, IGRAC, Delfts, the Netherlands. htpp://ggmn.e-id.nl/ggmn/GlobalOverview.html.

IGRAC (2008), "GGIS Content of IGRAC's Global Groundwater Information System as accessible since the update of 2008" (IGRAC's web site currently under reconstruction: http://www.un-igrac.org/)

INE (Instituto Nacional de Estatistico) (2011), "Use of water in Agriculture: 2011", INE, Lisbon. www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=119577896&PUBLICACOESmodo=2&xlang=en.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007), "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability", in M.L. Parry, et al. (Eds.), *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.

Kemper, K.E. (2007), "Instruments and institutions for groundwater management" in Giordano and Villholth (eds.), *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development*, CABI, Oxford.

Koundouri, P. (2004), "Current Issues in the Economics of Groundwater Resource Management", *Journal of Economic Surveys*, Vol. 18(5), pp. 703–740.

Kundzewicz, Z.W. et al. (2007), "Freshwater resources and their management", in Parry et al. (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 173–210.

Leterme, B. and D. Mallants (2011), "Climate and land-use change impacts on groundwater recharge", Proceedings of the ModelCARE 2011, 1-7. Retrieved from www.pc-progress.com/documents/customer_projects/Mallants_ModelCARE2011.pdf.

Margat, J. (2011), "National freshwater withdrawal statistics (56 countries)", unpublished.

Margat, J. (2008), "Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde", UNESCO-IHP and BRGM Report, Paris and Nancy.

Margat, J. and J. van der Gun (2013), *Groundwater around the World: A Geographic Synopsis*, CRC Press/Balkema, Taylor and Francis, London.

Marsh, T. et al. (2013), "The 2010-12 drought and subsequent extensive flooding: a remarkable hydrological transformation", Met Office, London.

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) (2012), "Hydrologie Souterraine – Synthèse", Report from the Explore 2070 project, Paris.

Molinero, J.E. et al. (2011), "Groundwater in Spain: legal framework and management issues", Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Madrid, upcommons.upc.edu/handle/2117/14364.

Montginoul, M. and J. Rinaudo (2013), "Quels mécanismes de régulation des prélèvements en eau souterraine? Comparaison du point de vue des agriculteurs, des institutionnels et des citoyens" *Science Eaux et Territoires*, Vol. 11, pp. 64–69.

Morris, B.L. et al. (2003), "Groundwater and its Susceptibility to Degradation: A Global Assessment of the Problem and Options for Management", UNEP, Nairobi, Kenya.

Negrel, P. and E. Petelet- Giraud (2011), "Isotopes in groundwater as indicators of climate changes", *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 30, pp. 1279-1290.

NGWA (National Ground Water Association) (2013), "Groundwater use for American agribusiness", NGWA, Westerville, OH. http://www.ngwa.org/PublishingImages/Fundamentals/NGWA_Fact_sheet1.pdf.

OECD (2015a), "Policy approaches to droughts and floods", [COM/TAD/CA/ENV/EPOC(2014)43/FINAL], OECD, Paris, http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=COM/TAD/CA/ENV/EPOC(2014)42/FINAL&docLanguage=En.

OECD (2015b), *Water Resources Allocation: Sharing Risks and Opportunities*, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/9789264229631-en.

OECD (2014a), *Changement climatique, eau et agriculture: Vers des systèmes résilients*, Études de l'OCDE sur l'eau, OECD Publishing, Paris. http://dx.doi.org/10.1787/9789264235076-fr.

OECD (2014b), "Modelling adaptation to climate change in agriculture", [COM/TAD/CA/ENV/EPOC(2013)19/FINAL], OECD, Paris, http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=COM/TAD/CA/ENV/EPOC(2013)19/FINAL&docLanguage=En.

OECD (2013a) "Costs and distributional impacts of inaction", in OECD, Water Security for Better Lives, OECD Publishing, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/9789264202405-10-en.

OECD (2013b), *Making Water Reform Happen in Mexico*, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/9789264187894-en.

OECD (2013c), "Compendium des indicateurs agro-environnementaux", questionnaires par pays non publiés, disponibles sur demande (tad@oecd.org).

OECD (2013d), *L'eau et l'adaptation au changement climatique: Des politiques pour naviguer en eaux inconnues*, Études de l'OCDE sur l'eau, OECD Publishing, Paris. DOI: http://dx.doi.org/10.1787/9789264200647-fr.

OECD (2013e), *Water Security for Better Lives*, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris. DOI: http://dx.doi.org/10.1787/9789264202405-en.

OECD (2012a), "Environmental Outlook to 2050" [ENV/EPOC(2011)7/FINAL], OECD, Paris, http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EPOC/WPRPW/WPEI(2011)1/FINAL&docLanguage=En.

OECD (2012b), *Meeting the Water Reform Challenge*, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/9789264170001-en.

OECD (2011a), *Bénéfices liés aux investissements dans l'eau et l'assainissement: Perspectives de l'OCDE*, Études de l'OCDE sur l'eau, OECD Publishing, Paris. http://dx.doi.org/10.1787/9789264101043-fr.

OECD (2011b), *Évaluation des réformes de la politique agricole en Turquie*, OECD Publishing, Paris. DOI: http://dx.doi.org/10.1787/9789264113244-fr.

OECD (2010), *Gestion durable des ressources en eau dans le secteur agricole*, Études de l'OCDE sur l'eau, OECD Publishing, Paris.DOI: http://dx.doi.org/10.1787/9789264083592-fr.

OECD (2009a), "Agriculture water pricing: United States" [COM/TAD/CA/ENV/EPOC/RD(2008)52/FINAL], OECD, Paris, http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=COM/TAD/CA/ENV/EPOC(2013)19/FINAL&docLanguage=En.

OECD (2009b), *De l'eau pour tous: Perspectives de l'OCDE sur la tarification et le financement - Messages clés pour les décideurs*, OECD Publishing, Paris. http://dx.doi.org/10.1787/9789264060555-fr.

OECD (2008), *La performance environnementale de l'agriculture dans les pays de l'OCDE depuis 1990*, OECD Publishing, Paris. http://dx.doi.org/10.1787/9789264040946-fr.

OECD (1998), "OECD Workshop on the sustainable management of water in agriculture – the Athens Workshop – Case studies" [COM/AGR/CA/ENV/EPOC(98)87], OECD, Paris, http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=COM/AGR/CA/ENV/EPOC%2898%2987&docLanguage=En.

Scanlon, B R., et al. (2012), "Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* Vol. 109(24), pp. 9320–5, doi:10.1073/pnas.1200311109.

Schoengold, K. and D. Zilberman (2007), "The economics of water, irrigation, and development", *Handbook of Agricultural Economics*, Vol. 3(06).

Scott, C., S. Dall'erba and R.D. Caravantes (2010), "Groundwater Rights in Mexican Agriculture: Spatial Distribution and Demographic Determinants", *The Professional Geographer*, Vol. 62(1), pp. 1–15.

Scibek, J. et al. (2007), "Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model", *Journal of Hydrology*, Vol. 333 (2-4), pp. 165-181.

Shah, T. (2008), *Taming the anarchy: groundwater governance in South Asia, Resources for the Future*, Washington, DC, and International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

Shah, T. et al. (2007), "Groundwater: a global assessment of scale and significance", in D. Molden (ed.), *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management* (pp. 395–423), International Water Management Institute, Sri Lanka.

Siebert, S. et al. (2010), "Groundwater use for irrigation – a global inventory", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 14(10), pp. 1863–1880.

Sneed, M., J. Brandt and M. Solt (2013), "Land Subsidence Along the Delta-Mendota Canal in the Northern Part of the San Joaquin Valley, California, 2003-10", *Scientific Investigations Report 2013–5142*, United States Department of Interior and United States Geological Survey, Washington, DC, http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5142/.

Sophocleous, M. (2009), "Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA—lessons and recommended actions", *Hydrogeology Journal*, Vol. 18(3), pp. 559–575, http://www.springer.com/earth+sciences+and+geography/hydrogeology/journal/10040.

Sophocleous, M. (2012), "Conserving and extending the useful life of the largest aquifer in North America: the future of the High Plains/Ogallala aquifer", *Groundwater*, Vol. 50(6), pp. 831–9.

Steward et al. (2013), "Tapping unsustainable groundwater stores for agricultural production in the High Plains Aquifer of Kansas, projections to 2110", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1220351110.

Struzik, E. (2013), "Underground Intelligence: The need to map, monitor, and manage Canada's groundwater resources in an era of drought and climate change", Munk School of Global Affairs, University of Toronto, Toronto, powi.ca/wp-content/uploads/2013/05/POWIUndergroundIntelligence- Struzik-June25.pdf, consulté juillet 2013.

Taylor, R.G. et al. (2012), "Ground water and climate change", *Nature Climate Change*, Vol. 3, pp. 322-329.

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (2011), "Second Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters" Executive Summary, UNECE, Geneva.

UNESCO (2008), "Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change (GRAPHIC): A Framework Document", GRAPHIC Series Number 2, UNESCO, Paris.

USGS (United States Geological Survey) (2014), USGS Water Science School Website, USGS, Washington, DC, ga.water.usgs.gov/edu/watercyclegwdischarge.html.

van der Gun, J. (2012), "Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges", United Nations World Water Assessment Programme, UNESCO, Paris. www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/Groundwater%20and%20Global%20Change.pdf.

Vrba, J. and A. Lipponen (eds.) (2007), "Groundwater resources sustainability indicators", *IHP-VI, Series on Groundwater*, No. 14, UNESCO-IHP, Paris.

Wada, Y., L.P.H. van Beek and M.F.P. Bierkens (2012), "Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment", *Water Resources Research*, Vol. 9, W00L06.

Wada, Y. et al. (2010), "Global depletion of groundwater resources", *Geophysical Research Letters*, L20402.

Wijnen et al. (2012), "Managing the Invisible: Understanding and Improving Groundwater Governance", The Water Partnership Programme, Banque mondiale, Washington, DC.

Annexe 1.A1

Activités agricoles faisant appel aux ressources en eau souterraine dans les pays de l'OCDE

Cette section présente quelques graphiques complémentaires concernant les activités agricoles faisant appel aux ressources en eau souterraine. Faute de cartes représentant toutes les activités, ces graphiques ont été établis pour différents pays et à partir de différentes sources.

L'utilisation des eaux souterraines pour l'élevage et l'aquaculture

On néglige souvent de tenir compte des quantités d'eau utilisées pour l'élevage, car elles sont proportionnellement moins importantes que celles utilisées pour l'irrigation des champs. Or, cette consommation peut être non négligeable dans certains pays.

- Aux États-Unis, l'élevage représente, avec l'aquaculture, 4 % de la consommation totale d'eau souterraine, mais c'est aussi un secteur dont la valeur atteint 60 milliards USD par an, soit beaucoup plus que la contribution des cultures de plein champ (NGWA, 2013). L'élevage tributaire des eaux souterraines est l'un des piliers de l'économie des Hautes plaines (Sophocleous, 2012). On estime que l'aquifère des Hautes plaines fournit l'eau nécessaire à l'élevage de 15 millions de bovins et de 4.25 millions de porcs (Sophocleous, 2009).

- Dans les zones arides d'Australie, l'eau souterraine constitue la seule source d'eau potable pour le bétail, notamment bovins et ovins, pour une valeur estimée à 393 millions AUD (Deloitte Access 2013).

L'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation

Le tableau 1.5 présente les données disponibles sur l'importance de l'eau souterraine pour certaines cultures de plein champ aux États-Unis, mais d'autres cultures sont tributaires de l'irrigation à partir d'eau souterraine, comme le sorgho (production de graines ou de semences), les haricots (secs comestibles) et d'autres céréales à paille, la luzerne, la betterave sucrière, les légumes et les pommes de terre. Esnault et al. (2014) estiment l'empreinte "eau souterraine" de 19 cultures spécifiques dans les deux bassins hydrogéologiques les plus utilisés des États-Unis, l'aquifère des Hautes Plaines et la Vallée centrale de Californie. Ils constatent que le fourrage et le maïs-grain sont responsables de la plus grande partie de cette empreinte, soulignant le rôle de la production fourragère dans la surexploitation des nappes phréatiques. Le coton représente également une part non négligeable de l'empreinte mesurée dans les Hautes Plaines du Sud. Les vergers, les vignobles et les arbres à fruits secs sont d'importants utilisateurs d'eau souterraine, notamment en Californie. Cette ressource est aussi utilisée pour irriguer des prairies dans de nombreuses régions des États-Unis.

Tableau 1.A1.1. Ampleur de l'irrigation à partir d'eau souterraine pour certaines cultures de plein champ aux États-Unis

Culture	Nombre d'exploitations utilisant des eaux souterraines pour l'irrigation	Superficie irriguée (ha)	Part de la superficie totale irriguée à l'aide d'eau souterraine
Maïs	28 085	4.3 millions	32 %
Soja	21 340	2.6 millions	19 %
Blé	9 535	1.1 million	8.2 %
Coton	5 451	1.1 million	8.1 %
Riz	3 861	0.73 million	5.4 %

Source : D'après NGWA (2013). Les chiffres de la dernière colonne ont été calculés à partir des estimations de la superficie totale fournies par Margat et van der Gun (2013).

Les réponses au questionnaire 2014 de l'OCDE confirment la diversité des situations au regard de l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation dans les autres pays. L'eau souterraine est utilisée pour des cultures de plein champ, comme le blé (France), le maïs (France et Mexique), le riz (Japon), le coton (Mexique), la betterave sucrière (France), les légumes (France et Italie) et les pépinières (Italie). Elle sert aussi toutefois pour des cultures permanentes ou des productions arboricoles comme les oliveraies (Italie) et les cultures de fruits à coque (Mexique).

Annexe 1.A2

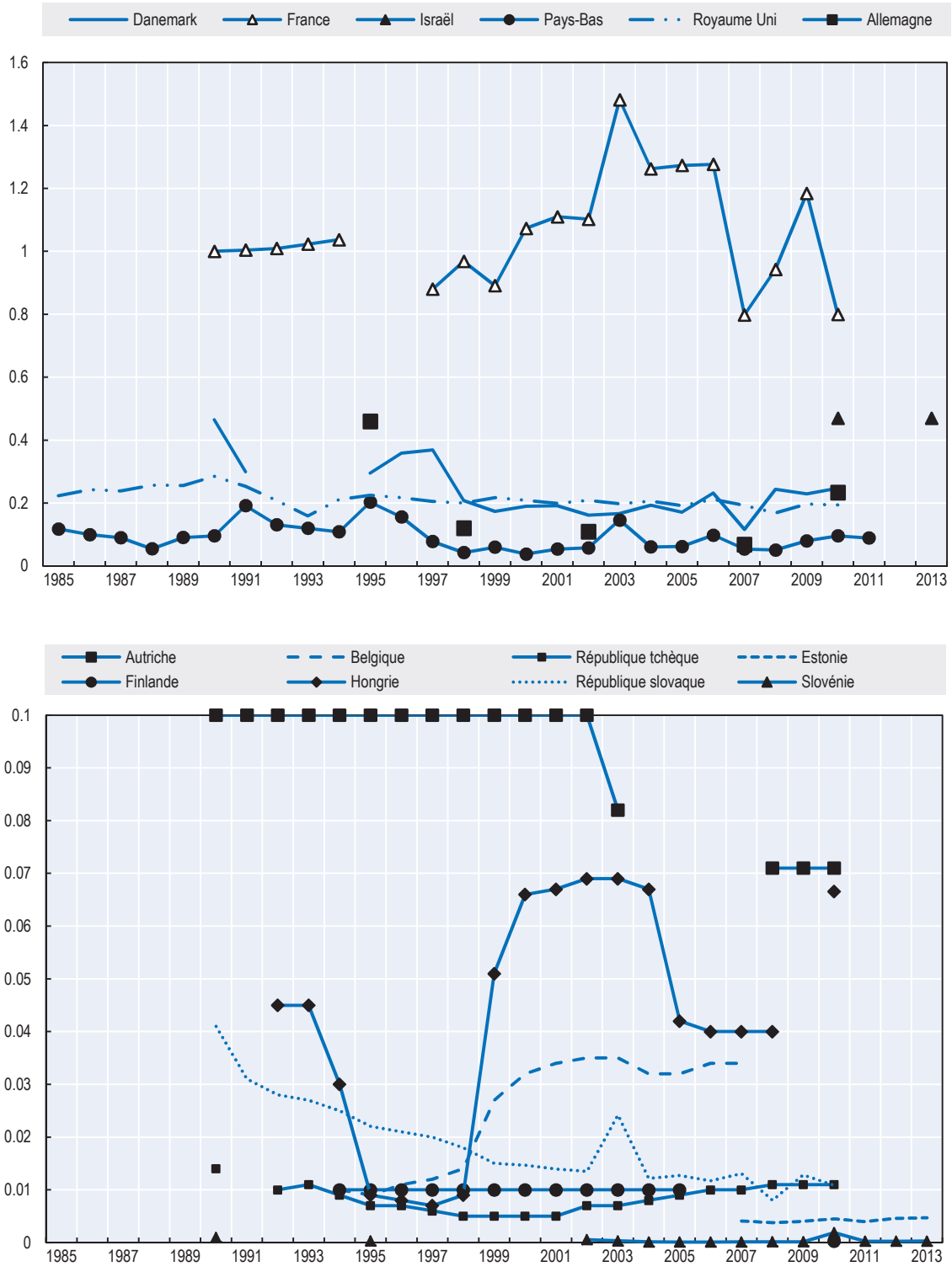
Utilisation des eaux souterraines : Estimations pour 2010 et évolutions à l'échelle nationale dans les autres pays de l'OCDE

Tableau 1.A2.1. Superficie irriguée en eau souterraine et estimation des ressources utilisées dans les pays de l'OCDE en 2010

	Superficie irriguée en eau souterraine (ha)*	Part de la superficie irriguée*	Prélèvements d'eau souterraine à des fins d'irrigation (km^3/an)**	Part du prélèvement total d'eau souterraine**	Prélèvement total d'eau souterraine (km^3/an)**
Allemagne	184 796	78.80%	0.2332	4%	5.83
Australie	537 030	21.10%	2.32***	47%***	4.96
Autriche	28 481	83.20%	0.046***	8%***	0.55***
Belgique	1 075	58.10%	0.026	4%	0.65
Canada	n.d.	n.d.	0.084***	10.6%***	0.79***
Chili	58 900	5.40%	0.7154***	73%	0.98
Corée	49 639	5.60%	1.861***	43%***	4.31
Danemark	201 480	100.00%	0.247***	38%	0.65
Espagne	1 275 563	37.10%	4.104***	72%	5.7
Estonie	0	0.00%	0	0%	0.33
États-Unis	13 468 649	53%***	68.33***	62%***	109.65***
Finlande	765***	6.0%***	0.00027***	0.1%***	0.28
France	854 248	44.60%	0.7994***	14%	5.71
Grèce	622 765	47%***	3.1025	85%	3.65
Hongrie	32 782	22.00%	0.0666	18%	0.37
Irlande	0***	0.00%***	0***	0%***	0.21
Islande	0	0.00%	0	0%	0.16
Israël	88 969	49.00%	0.47***	38%***	1.25
Italie	893 565	41%***	6.968***	67%	10.4
Japon	232 143	8.90%	2.6256***	24%	10.94
Luxembourg	19	70.40%	0	0%	0.02
Mexique	3 000 000***	45%***	20.92***	71%***	29.45
Norvège	2 505	5.80%	0	0%	0.41
Nouvelle-Zélande	156 144	30.70%	0.48	60%	0.8
Pays-Bas	36 089	58.00%	0.060***	6%***	0.992***
Pologne	7 206	10.0%***	0	0%	2.59
Portugal	n.d.	n.d.	1.857***	76%***	2.43***
République slovaque	8 193	7.80%	0.0108***	3%	0.36
République tchèque	1 156	6.90%	0.011	3%	0.38
Royaume-Uni	53 039	39.80%	0.1944***	9%	2.16
Slovénie	201	10.70%	0.0019***	1%	0.19
Suède	18 232	34.10%	0	0%	0.35
Suisse	9 900	22.00%	0	0%	0.79
Turquie	1 729 578	49.30%	7.932***	60%	13.22
Total OCDE	23 768 066		124		223
Moyenne OCDE		33 %		56 %	

Note : n.d. Non disponible. Les données relatives aux prélèvements d'eau souterraine pour l'irrigation et aux prélèvements d'eau souterraine totaux correspondent à l'année 2009 pour le Portugal, à 2011 pour les Pays-Bas, et à 2011 (total) et 2012 (agriculture) pour le Canada. La superficie irriguée reportée par la Corée ne comprend que le riz, elle est peut être donc sous-estimée.
Source : * IGRAC (2012), ** Margat et van der Gun (2013) et OCDE (2013) pour la République tchèque, *** Questionnaire OCDE 2014 sur l'utilisation des eaux souterraines en agriculture).

Graphique 1.A2.1. Utilisation d'eau souterraine pour l'agriculture dans les autres pays de l'OCDE (1985-2013)



Source : OCDE (2013c), Questionnaire OCDE 2014 sur l'utilisation des eaux souterraines en agriculture et Margat et van der Gun (2013) pour 2010.

Annexe 1.A3

Note explicative sur les données de Margat et van der Gun (2013)

Cette annexe, rédigée par M. Jac van der Gun, donne des explications sur les valeurs des prélèvements d'eau souterraine agrégés à l'échelle des pays pour l'année 2010, qui figurent dans l'appendice 5 de Margat et van der Gun (2013) et ont été utilisées comme valeurs par défaut pour les pays n'ayant fourni aucune estimation dans le chapitre 1.

Estimation des prélèvements annuels d'eau souterraine (année 2010)

La procédure suivante a été suivie pour dériver des estimations nationales synchronisées des prélèvements d'eau souterraine :

- Les valeurs agrégées des prélèvements d'eau souterraine sont inventoriées pour tous les pays du monde, en retenant les valeurs les plus récentes pour chacune des cinq sources de données suivantes (qui se recoupent partiellement) : IGRAC (version 2008 du GGIS), Margat (2008), Margat (2011), AQUASTAT (2013) et EUROSTAT (2013), et en inscrivant – notamment – le volume annuel total pompé (en km^3/an) et l'année de référence correspondante, telle qu'indiquée dans la source des données.
- Sur un maximum de cinq possibilités (voir ci-dessus), on choisit pour chaque pays une valeur privilégiée. C'est en général la valeur la plus récente qui est retenue, à moins que sa fiabilité ou sa précision soient considérées comme relativement faibles. On obtient ainsi une série de données "brutes" non synchronisées sur les prélèvements d'eau souterraine.
- On procède ensuite à une extrapolation afin de synchroniser les valeurs et d'obtenir un ensemble provisoire d'estimations des prélèvements d'eau souterraine, valable pour l'année 2010. À cette fin, on utilise un taux de croissance annuelle pour extrapoler les données brutes sur les prélèvements d'eau souterraine depuis leur année de référence jusqu'à l'année 2010. Pour la majorité des pays de l'OCDE, le taux de croissance adopté est de 0 % ; les exceptions sont le Chili (1 %), la République de Corée (3 %), Israël (3 %), le Mexique (1 %) et la Turquie (3 %).
- Puis des calculs préliminaires sont effectués, soit pour vérifier la plausibilité des estimations normalisées provisoires pour 2010, soit afin d'obtenir une valeur pour les pays pour lesquels une telle estimation est manquante.
- Ces calculs complémentaires estiment : (i) les prélèvements d'eau souterraine à des fins d'irrigation à partir des données de Siebert sur la consommation d'eau souterraine pour l'irrigation ou sur la superficie effectivement irriguée à l'aide d'eau souterraine, en supposant une efficacité d'irrigation de 70 % et une demande d'eau d'irrigation de 10 000 m^3/ha, respectivement ; et (ii) les prélèvements d'eau souterraine à d'autres fins, à partir du nombre d'habitants du pays et de la moyenne calculée des prélèvements d'eau souterraine par habitant destinés aux "autres usages" (c'est-à-dire autres que l'irrigation) pour la région concernée.
- La somme du résultat de ces deux estimations complémentaires sert à remplacer non seulement les valeurs manquantes, mais aussi les valeurs provisoires lorsque celles-ci sont inférieures à 30 % de la somme mentionnée. Dans tous les autres cas, les estimations

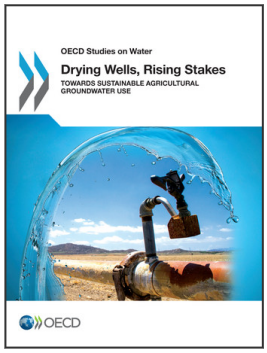
provisoires des prélèvements d'eau souterraine deviennent les estimations finales des prélèvements d'eau souterraine pour 2010.

Estimation de la répartition des prélèvements annuels d'eau souterraine (année 2010)

On distingue trois grands secteurs d'utilisation des eaux souterraines : les usages agricoles (irrigation), les usages domestiques et les usages industriels. Chacun d'entre eux doit être interprété au sens large, afin d'assurer que les prélèvements imputables aux trois secteurs représentent bien le total des prélèvements d'eau souterraine. Il convient de noter que les statistiques disponibles en pratique ne sont pas rigoureusement structurées selon les critères correspondant à la définition des catégories d'usages de l'eau. Elles suivent en fait les principaux objectifs des dispositions prévues en matière de prélèvement d'eaux souterraines, de sorte que l'eau potable fournie par les puits d'irrigation dans les zones rurales pourra être incluse dans les statistiques relatives aux usages agricoles, tandis que l'eau fournie par les services publics d'approvisionnement en eau mais utilisée pour de petits projets d'irrigation ou des activités commerciales ou industrielles à petite échelle pourra relever des "usages domestiques". Les données relatives à la répartition des prélèvements d'eau souterraine concernant les secteurs d'utilisation de l'eau sont beaucoup plus rares que les données sur les prélèvements totaux, et les séries chronologiques sont pratiquement inexistantes. C'est pourquoi l'on suppose, dans un premier temps, que la répartition entre les secteurs d'utilisation de l'eau ne varie guère dans le temps, de sorte que même des données datant d'une dizaine d'années auparavant pourraient demeurer représentatives pour 2010.

La procédure suivante a été suivie pour obtenir des estimations optimales de la répartition des prélèvements d'eau souterraine pour 2010 entre les trois principaux secteurs d'utilisation :

- Les données relatives à la répartition des prélèvements totaux d'eau souterraine selon les secteurs d'utilisation de l'eau (pourcentages + année de référence) ont été recensées et consignées. Elles englobent les données IGRAC de 2008 (pour 117 pays) ; les données de Margat (2008) (42 pays) et les données de Margat (2011) (56 pays).
- Pour chaque pays pour lequel ces données sont disponibles, on choisit un ensemble de pourcentages parmi les possibilités offertes (éventuellement). C'est en général l'ensemble le plus récent qui est retenu, à moins que sa fiabilité ou sa précision soient considérées comme relativement faibles (par exemple si le total des pourcentages n'est pas égal à 100 %). On obtient ainsi les données adoptées sur la répartition (en %) des prélèvements d'eau souterraine dans les trois secteurs d'utilisation de l'eau.
- La répartition correspondante des prélèvements d'eau souterraine pour 2010 (en km^3/an) a pu être définie de cette façon pour 114 pays. Ces derniers représentent néanmoins 95 % des prélèvements totaux d'eau souterraine à l'échelle mondiale. Les données manquantes correspondent donc principalement à des pays qui prélèvent de faibles quantités d'eau souterraine.
- À partir de la liste des 114 pays pour lesquels des pourcentages de répartition ont été adoptés, on calcule des pourcentages moyens de répartition pour chacune des sept régions. Ces pourcentages peuvent servir à produire une première estimation grossière dans le cas des pays des différentes régions pour lesquelles des données sont manquantes.
- Note : dans le calcul des prélèvements totaux d'eau souterraine à l'échelle mondiale, quelques pays (principalement de petits pays) ont été omis. Or, ils représentent globalement 0.029 % seulement de la population mondiale ou 0.245 % de la surface terrestre du globe. C'est pourquoi l'omission de ces pays n'influe pas sensiblement sur les statistiques globales.



Extrait de :

Drying Wells, Rising Stakes

Towards Sustainable Agricultural Groundwater Use

Accéder à cette publication :
https://doi.org/10.1787/9789264238701-en

Merci de citer ce chapitre comme suit :

OCDE (2015), « La tendance inquiétante du développement de l'irrigation à partir d'eau souterraine », dans *Drying Wells, Rising Stakes : Towards Sustainable Agricultural Groundwater Use*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: https://doi.org/10.1787/9789264248427-3-fr

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.