



Organisation des Nations
Unies pour l'éducation,
la science et la culture



Programme
hydrologique
international



GRAPHIC

GRAPHIC

EAUX SOUTERRAINES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Petits États insulaires en développement (PEID)





Puits de surveillance des eaux souterraines sur l'île de Roi-Namur, dans l'atoll de Kwajalein (République des Îles Marshall)

INTRODUCTION : EAUX SOUTERRAINES, CHANGEMENT CLIMATIQUE ET PETITS ÉTATS INSULAIRES EN DÉVELOPPEMENT (PEID)

I. ÉTAT ACTUEL DES EAUX SOUTERRAINES DES PEID

II. IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES EAUX SOUTERRAINES DES PEID

III. IMPORTANCE DES EAUX SOUTERRAINES DANS L'ATTÉNUATION DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DANS LES STRATÉGIES D'ADAPTATION DES PEID

GRAPHIC

UN ENGAGEMENT MONDIAL POUR LES EAUX SOUTERRAINES DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le Programme hydrologique international (PHI) de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) a lancé en 2004 le projet d'évaluation des ressources en eaux souterraines soumises aux pressions liées à l'activité humaine et au changement climatique (GRAPHIC) afin de mieux comprendre les effets de ce changement sur les ressources mondiales en eaux souterraines.

La vision de GRAPHIC :

- Faire progresser la gestion durable des eaux souterraines compte tenu des changements climatiques prévus et des effets humains associés.

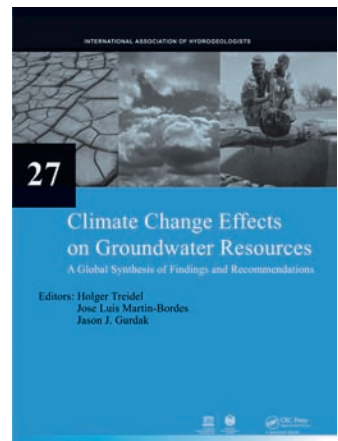
La mission de GRAPHIC :

- Offrir une plateforme d'échange d'informations au travers d'études de cas, de groupes de travail thématiques, d'études scientifiques et de communications.
- Servir la communauté mondiale en offrant des recommandations scientifiquement fondées et pertinentes.
- Utiliser les réseaux régionaux et mondiaux pour améliorer la capacité à gérer les ressources en eaux souterraines.

GRAPHIC aide à comprendre la façon dont les eaux souterraines interagissent avec les autres composantes du cycle de l'eau, soutiennent les écosystèmes et l'humanité et, à leur tour, font face à la pression complexe et conjointe des activités humaines et du changement climatique. GRAPHIC coordonne et facilite, au niveau mondial, la collaboration d'activités internationales de recherche, d'éducation et de sensibilisation. GRAPHIC conduit la réflexion sur les recherches à mener dans les grandes régions géographiques, sur les thèmes liés aux ressources en eaux souterraines, et sur les moyens d'aider à faire progresser les connaissances requises pour traiter aussi bien les aspects scientifiques que sociaux de la crise mondiale des eaux souterraines dans le contexte du changement climatique.

GRAPHIC utilise une approche scientifique multidisciplinaire qui va au-delà des études physiques, chimiques et biologiques, en incluant les systèmes humains de gestion des ressources et les politiques publiques. GRAPHIC a été décomposé en plusieurs sujets, méthodes et régions. Les sujets comprennent (i) la quantité d'eaux souterraines (recharge, décharge et stockage), (ii) leur qualité et (iii) leur gestion. GRAPHIC utilise de nombreuses méthodes scientifiques, y compris l'analyse des données de terrain, la géophysique, la géochimie, la paléohydrologie, la télédétection et la modélisation. GRAPHIC mène des études régionales en Afrique, en Asie et en Océanie, en Europe, en Amérique latine et dans les Caraïbes, ainsi qu'en Amérique du Nord.

Pour tout complément d'information, voir le site www.graphicnetwork.net.



Climate Effects on Groundwater – A Global Synthesis of Findings and Recommendations est une compilation de 20 études réalisées dans plus de 30 pays du réseau GRAPHIC

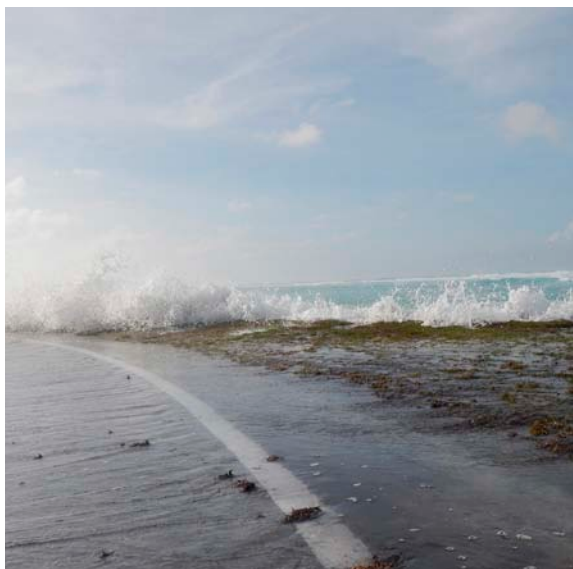
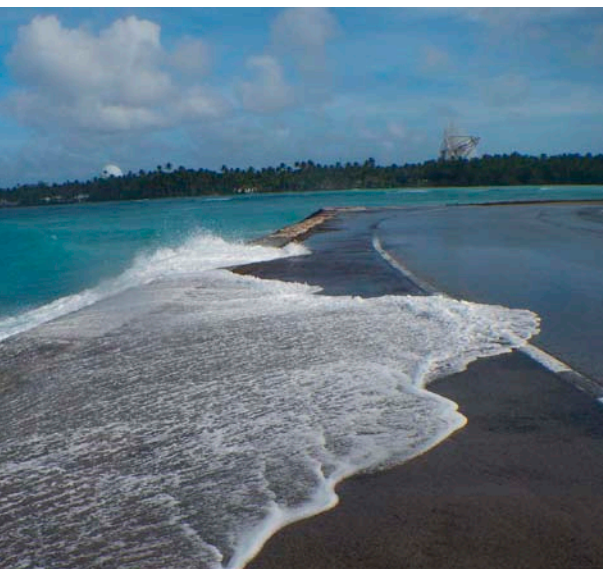
INTRODUCTION : EAUX SOUTERRAINES, CHANGEMENT CLIMATIQUE ET PETITS ÉTATS INSULAIRES EN DÉVELOPPEMENT (PEID)

LES EAUX SOUTERRAINES constituent une partie essentielle du cycle hydrologique et sont une ressource naturelle précieuse en tant que source primaire d'eau pour les activités agricoles, domestiques et industrielles dans le monde. Près de la moitié de l'eau potable consommée dans le monde¹ et environ 43 % de l'eau utilisée pour l'irrigation² proviennent d'eaux souterraines. Ces dernières sont essentielles à l'alimentation de nombreux cours d'eau, lacs, terres humides et autres écosystèmes qui en dépendent³. Cependant, les ressources mondiales en eaux souterraines sont menacées⁴ par la surexploitation pratiquée dans de nombreuses régions arides et semi-arides, et par les conséquences incertaines du changement climatique⁵.

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE devrait modifier considérablement le cycle hydrologique mondial. Il existe un large consensus sur le fait que ses effets seront ressentis par les êtres humains principalement par ses incidences sur les ressources mondiales en eau, y compris les eaux souterraines^{6,7}, ainsi que par des catastrophes liées à l'eau telles que des inondations et des sécheresses.

Ses effets directs sur les processus naturels (ruissellement, recharge, stockage et qualité des eaux souterraines) pourraient être exacerbés par la réponse apportée par les hommes à ces effets (par exemple, augmentation du prélèvement d'eau en raison de sécheresses prolongées et plus fréquentes). Ses effets sur les ressources en eaux souterraines sont donc étroitement liés aux objectifs de développement durable et aux facteurs de changements mondiaux que sont, notamment, la croissance démographique, les changements d'utilisation des terres et l'urbanisation⁸.

LES PETITS ÉTATS INSULAIRES EN DÉVELOPPEMENT (PEID) sont un groupe de 52 pays en développement qui occupent des îles carbonatées et volcaniques de faible altitude situées dans le Pacifique, dans les Caraïbes, en Afrique, dans l'océan Indien et en mer de Chine du Sud, et connaissent tous les mêmes problèmes de développement durable⁹. Bien que petits, individuellement, par leur superficie, les PEID, collectivement, ont une population de 63,2 millions d'habitants et un produit intérieur brut (PIB) de 575,3 milliards de dollars¹⁰.



Submersion par les vagues lors d'une tempête sur l'île de Roi-Namur, dans l'atoll de Kwajalein (République des Îles Marshall)

Les PEID comptent parmi les systèmes humains et naturels les plus vulnérables du fait de leur petite taille, de leur isolement, de leur croissance démographique rapide, de leurs capacités restreintes, de leurs ressources naturelles limitées, et de leur sensibilité aux catastrophes naturelles (cyclones, ouragans, tremblements de terre, éruptions volcaniques) ainsi qu'à la variabilité et à la modification du climat. Les problèmes économiques tiennent souvent à la petitesse des marchés intérieurs et à la forte dépendance de quelques marchés éloignés, au coût élevé de l'énergie, des infrastructures, des transports et des communications, à l'éloignement des marchés d'exportation et des sources d'importation, et à la forte volatilité de la croissance économique⁹.

La vulnérabilité des PEID est directement liée à la rareté de l'eau douce (eaux souterraines et de surface), ressource qui risque d'être gravement compromise par l'élévation du niveau de la mer ainsi que par la variabilité et le changement climatiques. Pour attirer l'attention sur ces pays, l'Organisation des Nations Unies a proclamé 2014 Année internationale des petits États insulaires en développement¹⁰.

Le présent document a pour but de résumer (i) l'état actuel des eaux souterraines des PEID,

(ii) les impacts que le changement climatique peut avoir sur ces eaux souterraines, et (iii) l'importance que revêtent les eaux souterraines dans l'atténuation des effets des changements climatiques et l'adaptation à ses effets dans ces pays. Des études menées par GRAPHIC sur les PEID y sont présentées, notamment dans le Pacifique, dans les Caraïbes et dans d'autres régions du globe. Ce document fait partie d'une série de publications GRAPHIC qui font suite au document de synthèse GRAPHIC¹¹ publié en 2015.



I. ÉTAT ACTUEL DES EAUX SOUTERRAINES DES PEID

Dans les PEID, les ressources en eau sont limitées et particulièrement vulnérables aux pressions anthropiques et naturelles. La fiabilité et la pérennité de l’approvisionnement en eau propre posent actuellement, dans de nombreux PEID, un problème crucial dont l’urgence va croître à l’avenir¹².

Une évaluation récente (2014) documente l’état des aquifères et des ressources en eaux souterraines de 43 PEID¹³. Cette étude a été menée par le PHI de l’UNESCO et le Centre International sur les eaux souterraines IGRAC, dans le cadre du Programme d’évaluation des eaux transfrontalières du Fonds pour l’environnement mondial (FEM).

Les eaux souterraines sont une importante source d’eau douce dans de nombreux PEID (Fig. 1). Elles s’y présentent principalement sous deux formes : lentille d’eau douce et aquifère perché. Une lentille d’eau douce flotte sur de l’eau salée plus dense qui sature souvent les parties plus profondes de la base d’une île (Fig. 2). La lentille d’eau douce et l’eau salée plus profonde sont séparées par une zone de transition relativement mince d’eau saumâtre. La lentille d’eau douce est souvent plus épaisse sous le centre de l’île, où la nappe phréatique dépasse alors le niveau de la mer, et plus mince près de la côte. La taille et l’étendue de la lentille d’eau douce sont fonction du volume des eaux qui rechargent

(précipitations, retour d’irrigation, infiltration sous les rivières et les lacs) et déchargent (vers l’océan et les puits d’extraction) la lentille. Les aquifères perchés se trouvent sur des couches encaissantes horizontales (peu perméables) ou dans des compartiments formés par une série de digues volcaniques verticales¹⁴.

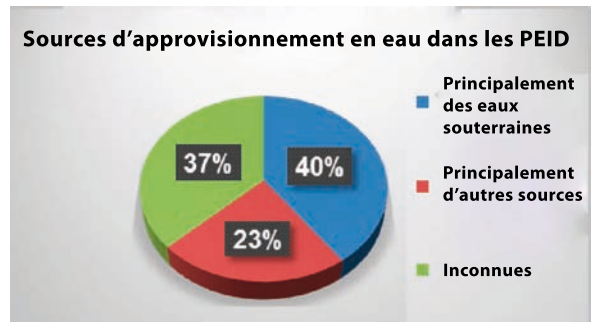


Fig. 1. Sources d’approvisionnement en eau dans les PEID¹³

COUPE HYDROGÉOLOGIQUE CONCEPTUELLE

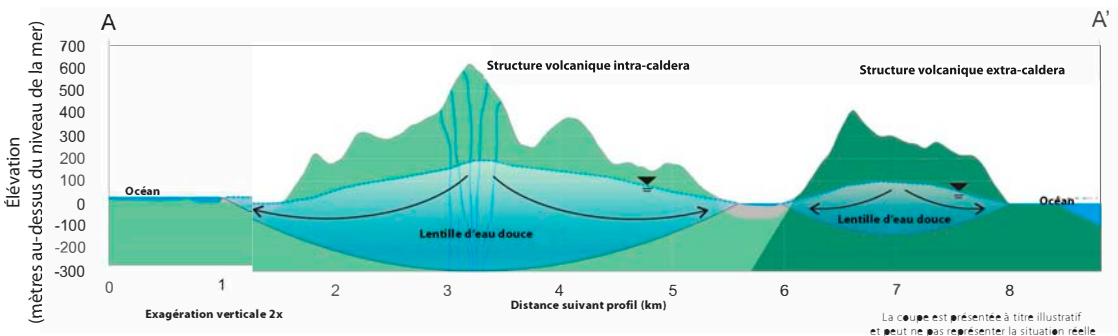


Fig. 2 Exemple de lentille d’eau douce dans les Samoa américaines¹³

II. IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES EAUX SOUTERRAINES DES PEID

Les PEID sont vulnérables aux facteurs de stress anthropiques et naturels.

Les PEID partagent de nombreuses similitudes (taille physique, éloignement, croissance démographique, prédisposition aux catastrophes naturelles et sensibilité aux phénomènes climatiques extrêmes, extrême ouverture des économies, et capacités et ressources limitées¹²) qui accroissent leur vulnérabilité et réduisent leur capacité d'adaptation à la variabilité et au changement climatique. La plupart disposent de réserves limitées d'eau douce, présentes sous la forme de lentilles d'eau douce entourées d'eaux souterraines salines. Ces ressources sont donc particulièrement vulnérables aux facteurs de stress anthropiques et naturels.

Les eaux souterraines des PEID sont menacées par la surexploitation et la contamination.

Les eaux souterraines des PEID, comme de nombreuses régions côtières du monde, sont menacées par des taux de prélèvements et d'épuisement qui ont fortement augmenté ces dernières décennies¹⁵⁻¹⁷. La surexploitation des eaux souterraines pratiquée pour soutenir l'agriculture irriguée, l'approvisionnement des villes et l'industrie touristique, importante pour l'économie, est particulièrement problématique pour les PEID. L'intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers est causée par des prélèvements excessifs d'eau souterraine pratiqués pour aider à satisfaire la demande d'eau douce de plus d'un milliard de personnes qui vivent dans les zones côtières^{7, 18}. Ce phénomène s'est globalement intensifié entre 2000 et 2010 (Fig. 3)¹³, et est exacerbé par le fait que les régions côtières sont généralement pauvres en eau et connaissent une croissance démographique rapide^{18, 19}.

Évolution de l'ampleur de l'intrusion d'eau salée

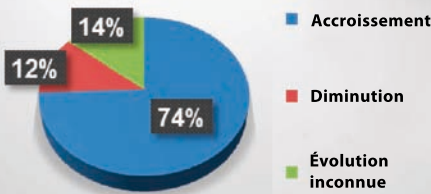


Fig. 3. Évolution de l'ampleur de l'intrusion d'eau salée dans les PEID, 2000-2010¹³





Évolution prévue de la recharge

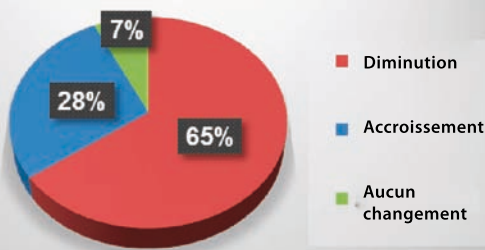


Fig. 4. Évolution prévue de la recharge dans les PEID¹³

La fiabilité de l’approvisionnement en eau douce pose un problème critique dans les PEID.

La fiabilité et la pérennité de l’approvisionnement en eau propre posent actuellement, dans de nombreux PEID, un problème critique dont l’urgence va croître à l’avenir¹². Dans la plupart des scénarios de changement climatique, les ressources en eau douce des PEID risquent d’être gravement compromises par les changements prévus de la répartition des précipitations, ce qui pourrait diminuer la recharge (Fig. 4).

L’élévation du niveau de la mer induite par le changement climatique va réduire les réserves d’eaux souterraines des PEID.

L’élévation du niveau de la mer devrait accroître l’intrusion d’eau salée et la salinisation des eaux souterraines littorales, ce qui entraînera une diminution des réserves d’eau douce pour les habitants et les écosystèmes des PEID et des autres zones côtières^{12,20,21}. Cette élévation

pourrait également affecter la qualité des eaux souterraines par ses effets négatifs sur le drainage des eaux pluviales urbaines et l’élimination des eaux usées¹². L’effet d’amplification entre l’élévation du niveau de la mer et la diminution de l’épaisseur de la lentille d’eau douce dans les PEID²² est également particulièrement inquiétant. Les effets de cette élévation sur les aquifères côtiers et insulaires seront exacerbés par la réduction de la recharge. En outre, les changements qui interviennent dans le ruissellement de l’eau douce et l’écoulement sous-marin d’eaux souterraines²³ risquent d’altérer la qualité des eaux côtières dont dépend la productivité des écosystèmes marins littoraux^{12, 24}. L’infrastructure d’approvisionnement en eau située dans les zones côtières de faible altitude risque également d’être endommagée par l’élévation du niveau de la mer, les inondations, les ouragans et autres tempêtes.

Dans les PEID, les eaux souterraines sont particulièrement vulnérables aux précipitations extrêmes, aux ondes de tempête et à d’autres effets similaires de la variabilité et du changement climatique.

Dans de nombreux PEID, en particulier dans les îles carbonatées de faible altitude, les ressources en eaux souterraines sont intrinsèquement vulnérables en raison de la rareté des surfaces terrestres et des quantités d’eaux souterraines potables, de l’accroissement de la population et de la demande par rapport à l’offre, de ressources en eau de surface proches des limites de la viabilité, de la surexploitation de la lentille d’eau douce, de l’intrusion d’eau salée et de la pollution par les déjections humaines et



animales^{5, 25, 26}. Ces vulnérabilités sont exacerbées par les tempêtes tropicales ainsi que par la variabilité et le changement climatiques, y compris la diminution prévue des précipitations, l'augmentation de l'évapotranspiration et les possibles diminutions des taux de recharge.

En 2004, par exemple, une onde de tempête produite par l'ouragan Frances a contaminé les eaux souterraines de l'île de North Andros, aux Bahamas^{27, 28}. Après cela, les concentrations de chlorure dans ces eaux ont augmenté de près de 30 fois, dépassant largement la valeur de 250 mg/l recommandée par l'Organisation mondiale de la Santé pour l'eau potable. Les résultats indiquent que ce n'est pas l'onde de tempête qui a directement compromis la lentille d'eau douce, mais plutôt le système de tranchées et de conduits qui a permis l'infiltration directe et l'intrusion rapide d'eau salée dans le système après qu'il a été inondé d'eau de mer. Par conséquent, le système de tranchées et de conduits a été vidé afin de favoriser la recharge et la dilution des eaux souterraines saumâtres^{27, 28}.

La sécheresse induite par le phénomène El Niño/oscillation australe (ENSO) peut réduire la recharge et l'épaisseur des lentilles d'eau douce dans certains PEID.

Les ressources en eaux souterraines des PEID de faible altitude situés dans l'océan Pacifique, dans l'océan Indien et en mer de Chine du Sud sont particulièrement sensibles à la variabilité du climat sur des échelles de temps interannuelles à multidécennales. La sécheresse induite par le phénomène ENSO peut réduire les taux de recharge et, dans une mesure considérable, l'épaisseur et l'étendue des lentilles d'eau douce²⁹. Dans certains PEID du Pacifique, en outre, la salinité des eaux souterraines est corrélée avec la température de surface de la mer et l'indice d'oscillation australe. De graves sécheresses ont même contraint à abandonner plusieurs très petites îles où l'eau douce souterraine était épuisée²⁹. Pendant les sécheresses, il est essentiel, sur les îles, de modifier le pompage des eaux souterraines pour préserver les lentilles d'eau douce. Dans les PEID, en outre, plusieurs essences d'arbres puisent directement dans les eaux souterraines pendant les sécheresses ; cela peut fortement réduire le volume de ces eaux et aggraver les effets de la sécheresse sur ces ressources²⁹.



Système de tranchées sur l'île de North Andros²⁷.

III. IMPORTANCE DES EAUX SOUTERRAINES DANS L'ATTÉNUATION DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DANS LES STRATÉGIES D'ADAPTATION DES PEID

Les eaux souterraines jouent un rôle important dans l'adaptation des PEID au changement climatique.

Dans de nombreux PEID, les eaux souterraines assurent un approvisionnement en eau plus sûr, suffisant et économique que les eaux de surface. L'utilisation des eaux souterraines y jouera un rôle important pour ce qui est de préserver l'approvisionnement en eau potable. Cependant, la sensibilité des lentilles d'eau douce oblige à pratiquer une gestion prudente des eaux souterraines.

STRATÉGIE ET GOUVERNANCE

Il faut améliorer la gouvernance pour assurer la pérennité des ressources en eaux souterraines des PEID.

Dans de nombreux PEID, les ressources en eaux souterraines sont vulnérables au changement climatique et aux activités humaines associées en raison d'une législation et d'une réglementation inappropriées, de politiques nationales de l'eau qui ne donnent pas de priorités ou d'orientations claires aux agences gouvernementales concernées, et de moyens financiers et humains trop limités pour que l'on puisse gérer correctement les ressources en eaux souterraines et les systèmes d'approvisionnement en eau^{13,29} (Fig. 5 (a), (b)).

Une gestion adaptative des eaux souterraines doit intégrer les politiques régionales relatives à l'eau et à l'agriculture.

Les PEID peuvent pérenniser leurs ressources en eaux souterraines en intégrant efficacement les politiques régionales relatives à l'eau et à l'agriculture mises en place pour contrôler les abstractions illégales d'eaux souterraines, créer une infrastructure et une politique de mise en réserve de l'eau (voir « Recharge contrôlée des aquifères », ci-après) et diversifier les cultures et mettre en œuvre des pratiques d'irrigation optimales, économes en eau⁵. Ces méthodes de gestion doivent ménager un équilibre entre protection de l'environnement, développement humain et coût socioéconomique acceptable.

Pour définir les objectifs de viabilité pour une utilisation durable eaux souterraines, il faut associer et mobiliser la collectivité dans les PEID.

Il est essentiel d'associer la collectivité à la définition des objectifs de viabilité pour que les stratégies de gestion à court et à long terme réussissent. Cela vaut particulièrement dans de nombreuses régions où, du fait de leur déconnexion des pouvoirs publics, les collectivités ne participent pas à la gestion et à la planification des ressources en eau²⁹.

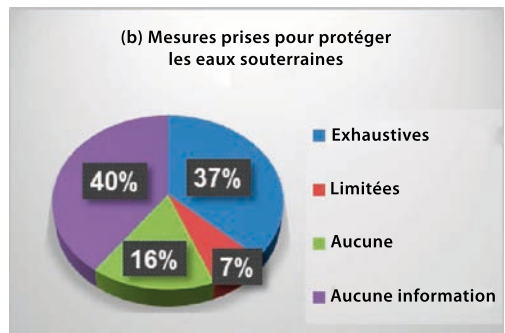
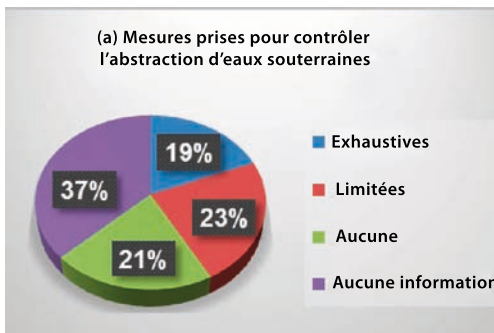


Fig. 5. Politique et réglementation (a) de contrôle de l'abstraction d'eaux souterraines et (b) de protection des eaux souterraines dans les PEID¹³.

UTILISATION DES TERRES

Il faut utiliser les sols de manière à optimiser l'économie et les pratiques d'adaptation au profit du secteur de l'eau dans les PEID.

.....
L'adoption d'une politique d'utilisation des terres et de pratiques de gestion qui stabilisent l'offre d'eau est l'un des moyens de s'adapter à la variabilité accrue des précipitations et aux sécheresses qui pourront toucher les PEID au XXI^e siècle⁵. En abattant de manière sélective, par exemple, des phréatophytes (plantes et arbres gourmands en eau) tels que les cocotiers dans certains PEID, on pourra accroître la recharge et le rendement durable des eaux souterraines tout en réduisant leur salinité²⁹. Il faudra, toutefois, pondérer le bénéfice qui pourrait en termes d'offre d'eaux souterraines vis-à-vis les communautés de subsistance et le tourisme, qui bénéficient de ces arbres.

Le régime de propriété foncière peut entraver la gestion durable des ressources en eaux souterraines.

.....
Dans certains PEID du Pacifique, la terre est souvent détenue par des propriétaires traditionnels. Cela entraîne souvent des conflits entre les gouvernements et les propriétaires lorsque des réserves d'eau veulent être créées sur des terres privées. Étant donné que le droit coutumier de nombreux PEID du Pacifique attribue la propriété des eaux souterraines aux propriétaires fonciers, les gouvernements sont souvent réticents à adopter une loi qui précise que l'eau appartient à tous ou à l'État, ou interdit de polluer les terres, par crainte de porter atteinte aux droits de propriété²⁹. De ce fait, il n'existe, dans certains PEID, aucune protection juridique des eaux souterraines contre la surexploitation ou la contamination.

FAIRE PROGRESSER LES SCIENCES ET TECHNIQUES DANS LES PEID

Mieux relier la surveillance et l'abstraction durable des eaux souterraines dans les PEID.

.....
Une stratégie d'adaptation essentielle, dans les PEID, consiste à améliorer l'abstraction des eaux souterraines par une meilleure surveillance. La mise en place de puits d'observation et la surveillance régulière de la zone de transition sont essentielles pour mieux comprendre le comportement de la lentille d'eau douce. Il



faut comprendre la façon dont cette dernière réagit à diverses situations (sécheresses prolongées, influence des marées, fortes pluies, etc.) pour pouvoir optimiser l'abstraction des eaux souterraines afin d'équilibrer l'offre et la demande. Le recours à des puits horizontaux est un bon moyen de prévenir tout début de soulèvement de l'eau saline.

La recharge contrôlée des aquifères, stratégie d'adaptation prometteuse pour certains PEID.

.....
Dans certains PEID, il sera utile d'évaluer, dans le cadre des stratégies d'adaptation au changement climatique, l'opportunité de mettre en œuvre des projets de recharge contrôlée et artificielle des aquifères. Cette technique permet, pour un coût relativement faible, de capter et de stocker les eaux pluviales excédentaires dans les aquifères locaux pendant les périodes humides, ces eaux pouvant être utilisées pour alimenter la lentille d'eau douce et compenser la pénurie d'eau de surface pendant les périodes sèches.

La recharge contrôlée des aquifères est utilisée, par exemple, sur l'île artificiellement jointe de Roi-Namur, dans l'atoll de Kwajalein

(République des Îles Marshall)³⁰. Roi est le lobe ouest et Namur le lobe est de l'île (voir l'image Google Earth ci-dessous). L'alimentation en eau de l'île est limitée au captage et au stockage de l'eau de surface pendant la saison des pluies, et au pompage de la lentille d'eau douce pendant la saison sèche et en période de sécheresse.

Sur Roi, l'eau souterraine est pompée au moyen d'un puits horizontal de 1 000 m de long. Ce puits comporte plusieurs pompes qui prélèvent l'eau du haut de la nappe pour prévenir la création d'un cône de dépression et la remontée d'eau de mer dans la lentille d'eau douce.

Namur présente un important couvert végétal et l'eau souterraine se recharge naturellement, sans recharge contrôlée. Cette partie de l'île comprend un puits horizontal, qui n'est cependant pas utilisé activement pour l'approvisionnement en eau. De ce fait, la lentille d'eau douce de Namur est plus représentative des paramètres des atolls naturels, avec un volume estimé à 15,9 millions de litres³¹. Sur Roi, à l'opposé, la lentille d'eau douce est environ 50 fois plus importante (estimée à 855,5 millions de litres) du fait de la recharge contrôlée, de la relative rareté de la végétation et de la perte d'eaux souterraines par l'évapotranspiration³¹.

Avec les modèles de circulation générale (MCG), la capacité actuelle pour générer des scénarios de changement climatique pour les PEID est limitée.

Ces modèles n'offrent actuellement pas, pour de nombreux PEID, une résolution spatiale suffisamment fine pour générer des scénarios sans réduction statistique d'échelle²⁹. Nombre de ces modèles présentent également une grande incertitude en ce qui concerne les prévisions de précipitations sous les tropiques,

car ils ne simulent pas correctement la convection tropicale et ne reproduisent pas encore certains des principaux modes de variabilité interannuelle à multidécennale du climat, y compris le phénomène ENSO²⁹. L'amélioration des techniques de réduction d'échelle, la production de modèles climatiques régionaux, et la mise au point de modèles de circulation générale à meilleure résolution couplés à des modèles d'écoulement des eaux souterraines, permettront de mieux gérer ces dernières et d'en estimer la viabilité dans les PEID.

Il faut identifier et atténuer les vulnérabilités des systèmes techniques.

Par exemple, en isolant et recouvrant le système de tranchées et de conduits sur l'île de North Andros, le risque d'inondation par les futures ondes de tempête qui toucheront les Bahamas²⁷ sera probablement réduit. L'installation de citernes de collecte des eaux de pluie ou de grands réservoirs de stockage en surface pourrait accroître la surface de collecte locale et les réserves d'eaux souterraines²⁹.

Améliorer les moyens humains et institutionnels ainsi que les connaissances techniques des PEID.

Il est extrêmement important de gérer les eaux souterraines de façon adaptative et durable, en particulier dans les PEID qui dépendent entièrement de ces eaux comme seule source d'eau potable. Or, de nombreux PEID ne disposent ni des moyens humains et institutionnels, ni des connaissances techniques requises pour déterminer la vulnérabilité des ressources en eaux souterraines et mettre en œuvre des stratégies de gestion adaptatives.

Sur Roi, deux bassins collecteurs bétonnés (visibles sur la gauche de l'image) sont utilisés pour recueillir l'eau de pluie et recharger artificiellement les eaux souterraines lorsqu'il existe une capacité excédentaire. Sources : Google Earth



CONTRIBUTORS

Jason J. Gurdak

Coordonnateur de GRAPHIC
San Francisco State University
(États-Unis)

Diana M. Allen

Département des sciences de
la Terre, Simon Fraser University
(Canada)

Shannon Holding

Département des sciences de
la Terre, Simon Fraser University
(Canada)

Tales Carvalho Resende

UNESCO, Programme
hydrologique international
(PHI), Paris

Marc Leblanc

Coordonnateur de GRAPHIC,
Université d'Avignon et des
Pays de Vaucluse (France)

Alice Aureli

UNESCO, Programme
hydrologique international
(PHI), Paris

Mehrdad Hejazian

Département des sciences
de la Terre et du climat,
San Francisco State University
(États-Unis)

Peter Swarzenski

US Geological Survey
(États-Unis)

Andreas Antoniou

Centre UNESCO IGRAC
(Pays-Bas)

Aurélien Dumont

UNESCO, Programme
hydrologique international
(PHI), Paris, France

REFERENCES

1. Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau. *Troisième Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau : « L'eau dans un monde qui change »*. 349 (UNESCO, 2009).
2. Siebert, S. et al. Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1863-1880 (2010).
3. Kløve, B. et al. Climate Change Impacts on Groundwater and Dependent Ecosystems. *J. Hydrol.* (2013). doi:10.1016/j.jhydrol.2013.06.037
4. Famiglietti, J. S. The global groundwater crisis. *Nat. Clim. Change* 4, 945-948 (2014).
5. *Climate change effects on groundwater resources: A global synthesis of findings and recommendations*. (CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012).
6. Green, T. R. et al. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *J. Hydrol.* 405, 532-560 (2011).
7. Taylor, R. G. et al. Ground water and climate change. *Nat. Clim. Change* 3, 322-329 (2012).
8. IGRAC. *Groundwater in the sustainable development goals: Position paper*. 8 (Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines, 2014). <http://www.youblisher.com/p/1042011-Groundwater-in-the-Sustainable-Development-Goals/>
9. UN-OHRLLS. *Small Island Developing States - Small Island Big(ger) Stakes*. 28 (Bureau du Haut-Représentant pour les pays les moins avancés, les pays en développement sans littoral et les petits États insulaires en développement, 2011). http://unohrlls.org/UserFiles/File/UN_SIDS_booklet_5x6-5_062811_web.pdf
10. Nations Unies. *Année internationale des petits États insulaires en développement – 2014*. <http://www.un.org/en/events/islands2014/index.shtml#&panel1-1>
11. Gurdak, J. J. et al. GRAPHIC, *Eaux souterraines et changement climatique : Atténuer la crise mondiale des eaux souterraines et s'adapter au changement climatique*. 12 (UNESCO, Programme hydrologique international (PHI), 2015).
12. *Climate change and water*. 210 (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2008).
13. Allen, D. M. et al. *Assessment of SIDS groundwater systems – Transboundary Water Assessment Programme*. 43 (Simon Fraser University, 2014).
14. IGRAC. *Small Island Developing States*. <http://www.un-igrac.org/areas-expertise/small-island-developing-states>

15. Konikow, L. F. *Groundwater depletion in the United States* (1900-2008). 63 (U.S. Geological Survey, 2013). <<http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5079>>
16. Konikow, L. F. et Kendy, E. Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeol. J.* 13, 317-320 (2005).
17. Wada, Y. et al. Global depletion of groundwater resources. *Geophys. Res. Lett.* 37, (2010).
18. Small, C. et Nicholls, R. J. A global analysis of human settlement in coastal zones. *J. Coast. Res.* 19, 584-599 (2003).
19. Millennium ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: Synthesis* (Island Press, 2005).
20. Werner, A. D. et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Adv. Water Resour.* 51, 3-26 (2013).
21. Uhlenbrock, K. The science and communication needed to help communities plan for sea level rise. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 94, 238 (2013).
22. Bobba, A., Singh, V., Berndtsson, R. et Bengtsson, L. Numerical simulation of saltwater intrusion into Laccadive Island aquifers due to climate change. *J. Geol. Soc. India* 55, 589-612 (2000).
23. Gonnee, M. E., Mulligan, E. et Charette, M. A. Climate-driven sea level anomalies modulates coastal groundwater dynamics and discharge. *Geophys. Res. Lett.* 40, 2701-2706 (2013).
24. Michael, H. A., Russoniello, C. J. et Byron, L. A. Global assessment of vulnerability to sea-level rise in topography-limited and recharge-limited coastal groundwater systems. *Water Resour. Res.* n/a-n/a (2013). doi:10.1002/wrcr.20213
25. Holding, S. et Allen, D. M. Risk to water security for small islands: an assessment framework and application. *Reg. Environ. Change* (2015). doi:10.1007/s10113-015-0794-1
26. Holding, S. et Allen, D. M. Wave overwash impact on small islands: Generalised observations of freshwater lens response and recovery for multiple hydrogeological settings. *J. Hydrol.* 529, 1324-1335 (2015).
27. Bowleg, J. et Allen, D. M. in *Climate change effects on groundwater resources: A global synthesis of findings and recommendations* 63-73 (CRC Press, Taylor et Francis Group).
28. Holding, S. & Allen, D. M. From days to decades: numerical modelling of freshwater lens response to climate change stressors on small low-lying islands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 933-949 (2015).
29. White, I. & Falkland, T. in *Climate change effects on groundwater resources: A global synthesis of findings and recommendations* 75-105 (CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012).
30. Hejazian, M., Swarzenski, P., Gurdak, J. J., Odigie, K. & Storlazzi, C. Effects of land-use change and managed aquifer recharge on geochemical reactions with implications for groundwater quantity and quality in atoll island aquifers, Roi-Namur, Republic of the Marshall Islands. in *Abstracts with Proceedings* (AGU, 2015).
31. Gingerich, S. B. Groundwater resources and contamination at Roi-Namur Island. *Kwajalein Atoll Repub. Marshall Isl. US Geol. Surv. Water-Resour. Investig. Rep.* 95-4275 (1996).



© PHI (UNESCO) novembre 2015

Photos :

Couverture : © Mehrdad Hejazian

Couverture intérieure : © Mehrdad Hejazian

p. 2 et 3 : © Peter Swarzenski © Mehrdad Hejazian

p. 4 et 5 : © Mehrdad Hejazian © Peter Swarzenski

p. 6 et 7 : © Mehrdad Hejazian © Diana Allen

p.9 : © Mehrdad Hejazian

Quatrième de couverture : © Peter Swarzenski

CONTACT

**PROGRAMME HYDROLOGIQUE
INTERNATIONAL (PHI)**

UNESCO/DIVISION DES SCIENCES DE L'EAU (SC/HYD)
7 PLACE DE FONTENOY
75732 PARIS 07 SP – FRANCE
TEL. : (+33) 1 45 68 40 01

ihp@unesco.org – www.unesco.org/water/ihp