

# MODULE



## EAU SOUTERRAINE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE





# CONTENU

## MODULE 11

### Eau souterraine et changement climatique

11.1	Introduction	4
11.2	L'eau souterraine dans le cycle hydrologique	5
11.3	Variabilité climatique et changement climatique	6
11.4	Scénarios de changement climatique	8
11.5	Impacts du changement climatique sur les eaux souterraines	8
11.6	Changement climatique et croissance de la population	12
11.7	Implications pour les secteurs tributaires des eaux souterraines	13
11.8	Adaptation au changement climatique	13
11.9	Résumé	18
11.10	Références et lectures en ligne	19

## Mentions légales

### © Droit d'auteur 2015, tous droits réservés

L'utilisation du manuel est gratuite. Les utilisateurs doivent toutefois faire référence à la source, comme suit: «L'intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins Transfrontaliers en Afrique - un manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB, et IGRAC». Les modifications ne sont autorisées qu'avec l'accord de AGW-Net. Les droits d'auteur des photos sont détenus par leurs propriétaires respectifs

A4A – Aqua for All

AGW-Net – Le Réseau Eaux Souterraines en Afrique

RAOB – Réseau Africain des Organismes de Bassin

BGR – Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles

UNDP-Cap-Net

BMZ – Ministère Fédéral de la Coopération Économique et du Développement

GWP – Partenariat Mondial de l'Eau

igrac – Centre International pour l'Évaluation des Ressources en Eau Souterraine

imawesa – Improved Management of Agricultural Water in Eastern and Southern Africa  
(Gestion améliorée de l'eau agricole en Afrique Australe et de l'Est)

IWMI – L'Institut International de Gestion de l'Eau

Equipe de rédaction: Vanessa Vaessen, Ramon Brentführer – BGR

Mise en page: ff.mediengestaltung GmbH, Hannover, Allemagne

Photo: IWMI







# EAU SOUTERRAINE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

## OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES :

- Se familiariser avec les concepts de base de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines
- Explorer le lien entre les impacts du changement climatique et les ressources en eau souterraine
- Comprendre le potentiel d'adaptation climatique par la gestion des eaux souterraines

### 11.1 Introduction

L'eau souterraine est la principale source d'eau potable en Afrique et a un rôle de plus en plus important en irrigation pour lutter contre l'insécurité alimentaire croissante. Ce module traite à la fois de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau souterraine et le rôle que l'eau souterraine peut jouer dans l'adaptation aux impacts du changement climatique. Bien que l'accent soit mis sur l'Afrique, il est important de rappeler l'étendue mondiale du changement climatique, et de considérer les impacts sur l'échelle du cycle hydrologique global.

Environ 60 % (peut être 80 %) de la population de l'Afrique (qui en compte 1 milliard), vivent dans les zones rurales et comptent sur l'eau souterraine pour approvisionner leur communauté ou leurs ménages pour les besoins domestiques et autres. Actuellement, il ya plus de 300 millions de personnes en Afrique qui n'ont pas accès à l'eau potable, dont beaucoup sont parmi les plus pauvres et les plus vulnérables dans le monde (MacDonald et al. 2012). La variabilité et le changement climatique influencent les systèmes d'eaux souterraines à la fois directement par la réalimentation par la recharge et indirectement par des changements dans l'utilisation des eaux souterraines. Ces impacts peuvent être modifiés par l'activité humaine, comme le changement dans l'occupation des sols (Taylor et al. 2013).

Le changement climatique se manifeste par la modification du régime des précipitations et de l'évaporation dans les bassins fluviaux modifiant ainsi le bilan hydrologique. Il faut s'attendre à ce que les changements dans les précipitations annuelles moyennes, ainsi que dans leur distribution spatiale et temporelle, influencent le bilan de l'eau dans son ensemble, y compris la recharge des nappes.

Les bassins fluviaux subissent l'interaction des changements environnementaux et les activités humaines à différentes échelles spatiales et temporelles. L'évolution des températures régionales présentées dans le GIEC (2001) montrent les tendances des cellules de la grille située au Soudan et en Ethiopie dans l'ordre de +0,2 à 0,3 ° C / décennie de 1946 à 1975. Hulme et al. (2001) ont constaté une tendance moyenne africaine de 0,5 ° C / siècle. Selon Conway (2005), il est fort probable que les températures augmentent dans le bassin du Nil, conduisant à des pertes plus importantes

Des taux élevés d'évaporation, augmentent l'aridité et donc la désertification du fait de la perte d'humidité du sol.

Même si beaucoup d'attention est accordée aux effets négatifs, il ne faut pas oublier que certaines zones bénéficieront de températures plus basses et de hausse de la quantité moyenne de précipitations qui facilite une augmentation de la recharge des nappes d'eau souterraine et donc la réserve.

## 11.2 L'eau souterraine dans le cycle hydrologique

Le cycle hydrologique représente le mouvement continu de l'eau dans l'atmosphère, la surface de la terre (glaciers, le manteau neigeux, les cours d'eau, les zones humides et les océans) et les sols et roches. Le terme eau souterraine se réfère à l'eau dans les sols et les formations géologiques qui sont entièrement saturés. L'eau souterraine constitue une partie du cycle hydrologique, qui est rechargée par les précipitations. Le cycle hydrologique est principalement régi par l'équilibre entre l'entrée (Précipitations / pluie) et la sortie (évapotranspiration, ruissellement et décharge) (Fig. 11.1).

Les composantes du bilan des eaux souterraines sont affichées dans la figure 11.1, elles consistent à la recharge (recharge directe et flux inter-aquifère) et la décharge (écoulement des nappes vers les cours d'eau, les sources, lacs, zones humides, océans, des prélèvements d'eau souterraine, l'évapotranspiration). La différence entre la recharge et la décharge détermine le changement dans le volume de l'eau souterraine.

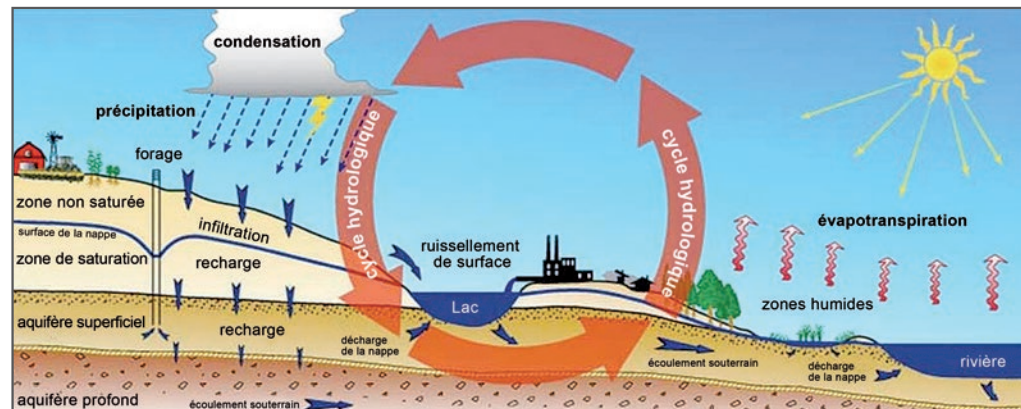


Figure 11.1 : Composantes hydrologiques [Précipitations (pluie) - ET-Ruissellement - Recharge = variation de stockage]

Toute variation climatique peut potentiellement affecter le flux d'entrée vers les eaux souterraines (recharge) et de sortie dans les plans d'eau de surface comme le débit de base et les sources (décharge), soit directement, soit indirectement, puisque la vapeur retourne dans l'atmosphère.

Un exemple d'un impact direct serait une réduction de la recharge en raison d'une diminution des précipitations. Un impact indirect serait l'intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers due à l'élévation du niveau de la mer, ce qui représente une menace majeure pour la qualité des nappes d'eau souterraine du littoral.



Cependant les impacts probables du changement d'occupation des sols et des prélèvements d'eau souterraine sur la quantité et la qualité des nappes devraient être les impacts indirects les plus importants du changement climatique sur les eaux souterraines. Ces changements peuvent inclure une augmentation de l'usage de l'eau souterraine pour l'irrigation, pour compenser la baisse de la production agricole pluviale.

### 11.3 Variabilité climatique et changement climatique

La variabilité climatique se réfère à un écart du climat, de la moyenne météorologique à long terme sur une certaine période de temps, par exemple, un mois spécifique, la saison ou l'année. Ces variations sont une composante naturelle du climat, causées par des changements dans les systèmes qui influent sur le climat, comme le système de circulation générale.

D'autre part, le changement climatique est «un état altéré du climat qui peut être identifié par le changement dans la moyenne et / ou de la variabilité de ses propriétés, et qui persiste pendant une période prolongée, généralement pendant des décennies ou plus». Elle peut être due à «des processus internes naturels ou des forcing externes, ou à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou dans l'occupation des sols» (GIEC, 2007).

#### les modèles prévus de la variation des précipitations

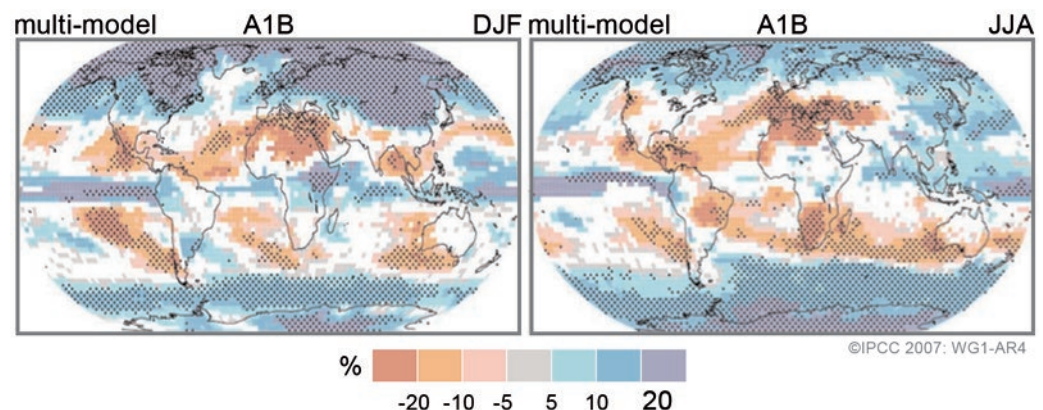


Figure 11.2: Les variations relatives des précipitations (%) pour la période 2000-2099, par rapport à la période 1980-1999. Les valeurs sont des moyennes multimodales basées sur le scénario A1B du SRES pour décembre-février (à gauche) et juin-août (à droite). Les zones blanches sont celles où moins de 66% des modèles concordent sur le signe du changement et les zones en pointillés sont celles où plus de 90% des modèles concordent sur le signe du changement (GIEC, 2007).

Au cours des 150 dernières années les températures moyennes mondiales ont augmenté avec le réchauffement qui s'est accéléré dans les 25 à 50 dernières années. Ce processus se poursuivra dans l'avenir (GIEC, 2007) et il a un impact sur les précipitations annuelles moyennes (Fig. 11.2). Le climat varie aussi en réponse à des phénomènes naturels, à l'échelle inter-décennale, inter-annuelle, saisonnière, tels que l'Oscillation du Sud El Nino. La présence et le degré d'influence de ces phénomènes naturels varient selon les pays et même les bassins versants.



Les variations climatiques induiront le changement hydrologique. Le tableau 11.1 résume les variations du climat et de l'hydrologie, qui devraient se produire en raison du réchauffement climatique. Les impacts potentiels de ces changements sur les ressources en eau souterraine sont discutés dans les sections suivantes.

**Tableau 11.1 Impacts projetés du réchauffement mondial pour le climat primaire et les indicateurs hydrologiques**

<b>Température</b>	Les températures devraient augmenter dans le 21 <sup>ème</sup> siècle, avec une répartition géographique similaire à celle observée au cours des dernières décennies. Le réchauffement devrait être plus important sur le continent et dans les latitudes nordiques élevées, et moins important sur les Océans du Sud et certaines parties de l'océan Atlantique Nord. Il est très probable que les extrêmes de chaleur et les vagues de chaleur continueront à devenir plus fréquents.
<b>Précipitation</b>	A l'échelle mondiale, la précipitation devrait augmenter, mais cela devrait varier géographiquement - certaines régions sont susceptibles de connaître une augmentation et d'autres une baisse des précipitations moyennes annuelles. L'augmentation de la quantité de précipitations est probable à des latitudes élevées. Dans les basses latitudes, à la fois des baisses et des hausses régionales des précipitations sur les terres peuvent avoir lieu. Beaucoup (pas tous) de zones de fortes précipitations actuellement devraient connaître une augmentation des précipitations, alors que dans de nombreuses zones de faibles précipitations et de forte évaporation, les précipitations devraient en prévision diminuées. Les zones touchées par la sécheresse vont probablement augmenter et les événements pluviométriques extrêmes sont susceptibles d'augmenter en fréquence et en intensité.
<b>Élévation du niveau de la mer</b>	On s'attend à ce que le niveau mondial moyen de la mer augmente en raison du réchauffement des océans et de la fonte des glaciers. Les projections les plus optimistes de élévation moyenne globale du niveau de la mer à la fin du 21 <sup>e</sup> siècle sont comprises entre 0,18-0,38 m; mais un scénario extrême donne une hausse jusqu'à 0,59 m. Dans les régions côtières, les niveaux de la mer sont susceptibles d'être également affectés par le déferlement de grandes vagues extrêmes et de tempête.
<b>Évapotranspiration</b>	La demande évaporative, ou l'évaporation potentielle, est influencée par l'humidité atmosphérique, le rayonnement net, la vitesse du vent et la température. Selon les projections, de manière générale, elle devrait augmenter, en raison de températures plus élevées. La transpiration peut augmenter ou diminuer.
<b>Ruissellement</b>	Le ruissellement est susceptible d'augmenter dans les plus hautes latitudes et dans certaines zones tropicales humides, y compris les zones peuplées de l'Est et du Sud-Est de l'Asie, et diminuer avec la plupart des latitudes moyennes et tropicales sèches, où actuellement l'eau est en déficit. Les volumes d'eau contenue dans les glaciers et la couverture neigeuse sont susceptibles de diminuer, entraînant une diminution des écoulements en été et en automne dans les zones touchées. Les changements dans la saisonnalité des eaux de ruissellement peuvent également être observés en raison de la fonte rapide des glaciers et moins de précipitations sous forme de neige dans les régions alpines.
<b>Humidité du sol</b>	La teneur moyenne annuelle de l'humidité du sol devrait diminuer dans de nombreuses régions subtropicales et généralement dans la région méditerranéenne, et à des latitudes élevées où la couverture de neige diminue. L'humidité du sol est susceptible d'augmenter en Afrique de l'Est, en Asie centrale, le cône de l'Amérique du Sud et d'autres régions avec des augmentations substantielles dans les précipitations.

\* Par rapport à 1990, année de référence. Source: GIEC (2007), SKM (2009)



## 11.4 Scénarios de changement climatique

Il existe une incertitude considérable entourant l'avenir du climat de l'Afrique comme indiqué dans le quatrième rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC) (Christensen et al., 2007).

Premièrement, les *températures moyennes sont susceptibles d'augmenter*. Hulme et al. (2000) montrent que pour l'Afrique dans son ensemble, le réchauffement au 20<sup>ème</sup> siècle est survenu à un taux d'environ 0,5 ° C à travers le siècle, et que le taux de réchauffement a augmenté dans les trois dernières décennies. A l'avenir, sur la base des prévisions dans le cadre du scénario moyen-élevé des émissions de gaz à effet de serre, la température moyenne annuelle de l'air entre 2080 et 2099 devrait être plus élevée de 3-4 ° C qu'elle ne l'était entre 1980 et 1999.

Deuxièmement, *la pluviométrie annuelle est susceptible de baisser dans le Nord du Sahara et en Afrique Australe*, et est susceptible d'augmenter dans les hauts plateaux éthiopiens. Des prévisions plus amples sont difficiles à faire, puisque les changements dans les précipitations sont beaucoup moins certains que pour la température, en particulier pour le Sahel et la côte Ouest-Africaine. En descendant à l'échelle des grands bassins fluviaux avec les modèles de circulation actuelles, il se pourrait qu'il y ait plus de «bruit» hydrologique, plutôt que d'avoir un aperçu clair (Calow et MacDonald, 2009).

Enfin, *les précipitations sont susceptibles de devenir de plus en plus imprévisible en termes de durée et d'intensité*, avec des augmentations de la fréquence des événements extrêmes - sécheresses et inondations. La pluviométrie moyenne annuelle est déjà très variable à travers l'Afrique, allant de presque zéro sur certaines parties du Sahara à environ 10 000 mm dans le golfe de Guinée. La variabilité inter-annuelle et saisonnière est susceptible d'augmenter.

## 11.5 Impacts du changement climatique sur les eaux souterraines

### Introduction

L'eau souterraine sera moins directement et plus lentement touchée par le changement climatique que les eaux de surface. C'est parce que les rivières se reconstituent sur une échelle de temps plus courte, et la sécheresse et les inondations se retrouvent rapidement dans les niveaux d'eau de la rivière. L'eau souterraine, par contre, sera affectée plus lentement.

Les principaux domaines où le changement climatique affecte l'eau souterraine est par la recharge, la décharge et le stockage. En volume l'utilisation des eaux souterraines par l'irrigation est beaucoup plus importante; les impacts dans le futur de la variabilité climatique, ainsi que du changement affectant l'eau souterraine peuvent être amplifiés par des effets indirects sur la demande en eau de l'irrigation (Taylor et al., 2013).

Cependant l'usage domestique des eaux souterraines est l'usage le plus répandu,



couvrant plus de 2 milliards de personnes. Bien que l'eau souterraine soit généralement considérée comme une ressource «résistante à la sécheresse», la plupart des aquifères peu profonds qui alimentent les populations rurales sont vulnérables aux sécheresses annuelles ou plus longues. Ce sont les aquifères profonds et captifs qui peuvent présenter des tendances de baisse, après des sécheresses prolongées (BGR, 2008).

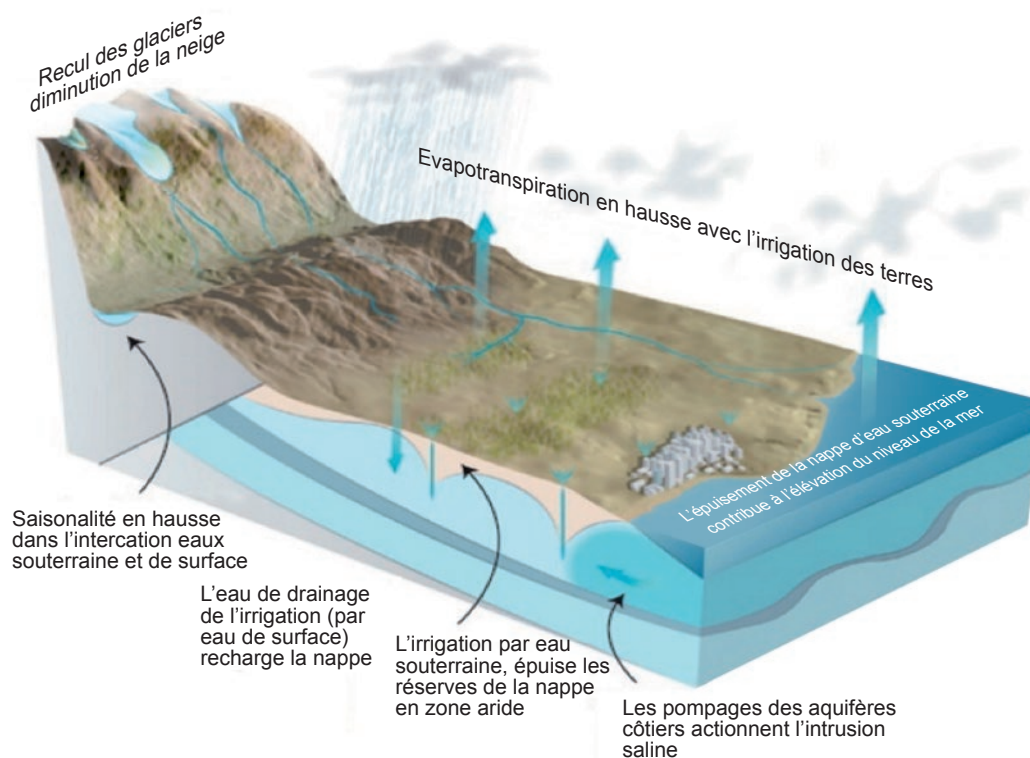


Figure 11.3: Représentation conceptuelle des interactions clés entre les eaux souterraines et le climat (source: Taylor et al., 2013)

La recharge des eaux souterraines par les précipitations, la croissance de l'irrigation pour répondre à la sécurité alimentaire et le pompage des eaux souterraines sont liés entre eux à travers l'impact résultant du changement climatique (Fig. 11.3).

### Recharge des nappes souterraines

L'eau souterraine constitue la principale source d'eau à travers l'Afrique, à la fois dans les zones rurales et urbaines. Dans les grandes régions métropolitaines en Afrique, l'eau de surface joue un rôle de premier plan. La recharge des nappes souterraines peut se produire localement, des plans d'eau de surface ou de la précipitation sous forme diffuse, à travers la zone non saturée du sol. La recharge n'est pas seulement influencée par l'ampleur des précipitations, mais aussi par son intensité, la saisonnalité, la fréquence et les changements dans l'occupation des sols.

L'alimentation naturelle des eaux souterraines se produit à la fois par la recharge pluviale diffuse et la recharge ciblée via l'infiltration d'eau de surface (c'est à dire: cours d'eau, zones humides ou les lacs); elle dépend fortement du climat qui prévaut, ainsi que de la couverture du sol et de la géologie sous-jacente. La couverture climatique et des sols déterminent en grande partie les précipitations et l'évapotranspiration, alors



que le sol sous-jacent et la géologie déterminent si un surplus d'eau (précipitations moins évapotranspiration) peut être transféré et stocké dans le sous-sol (Taylor et al., 2013).

Cette eau peut atteindre l'aquifère rapidement, à travers les fractures, ou plus lentement par infiltration à travers des micro-pores dans les sols reposant sur l'aquifère. Une modification de la quantité de pluie efficace va changer la recharge dans les eaux souterraines.

Le réchauffement de la planète dû à l'augmentation de température est important dans le contrôle directement l'évapotranspiration et donc la partie des précipitations qui peut s'écouler à travers le profil du sol vers les aquifères. D'autres facteurs qui influent sur la recharge des nappes comprennent la couverture des sols, les sols, la géologie, la pente et le type d'aquifère.

L'augmentation de la variabilité des précipitations peut diminuer la recharge des nappes dans les zones humides parce que de fortes et plus fréquentes pluies font que la capacité d'infiltration du sol est dépassée; ce qui augmente le ruissellement et donc les inondations. Dans les zones semi-arides et arides, cependant, l'augmentation de la variabilité des précipitations peut augmenter la recharge des nappes, parce que seuls les pluies de forte intensité sont capables de s'infiltrer assez vite avant de s'évaporer, et les aquifères alluviaux sont rechargés principalement par les inondations lors des crues (BGR, 2008).

La recharge est très importante dans la régulation du volume d'eau souterraine. La réduction de la recharge entraînera la baisse du volume des eaux souterraines renouvelables.

### **Quantité d'eau sortant**

La variation climatique extrême a un contrôle sur le bilan hydrologique par la réduction ou l'augmentation de composants d'entrée et de sortie. Les composants sortants incluent l'évapotranspiration, le ruissellement, la décharge des eaux souterraines dans les ruisseaux et sources, et l'eau souterraine pompée à partir des forages.

L'impact du changement climatique sur la décharge des eaux souterraines est en relation avec la baisse du niveau de la nappe, qui est lié au débit de base des rivières et des sources. L'impact peut être plus facilement observé par des changements dans les écosystèmes tributaires des eaux souterraines. Une autre cause de diminution de la décharge est le pompage excessif des eaux souterraines renouvelables, qui peut être pratiqué pour faire face à la pénurie d'eau en raison du changement climatique. Le pompage accru abaisse la nappe phréatique, et réduit ainsi la décharge vers le débit de base.

L'impact du changement climatique sur les paramètres de sortie ne peut pas être le même. En raison de l'augmentation de la température, l'évapotranspiration augmentera, mais il n'y a pas de garantie d'une hausse des précipitations. Si les précipitations diminuent, le ruissellement diminue, et en plus la recharge des nappes souterraines diminue aussi, conduisant ainsi à une baisse du débit de base provenant des eaux souterraines vers les cours d'eau et les sources.



Pour l'évapotranspiration, les impacts directs du changement climatique comprennent :

- Les changements dans l'utilisation des eaux souterraines par la végétation dues à la hausse de température et des concentrations de  $\text{CO}_2$ , et
- Les changements dans la disponibilité de l'eau à s'évaporer ou transpirer, principalement en raison de changements dans le régime des précipitations. L'augmentation de la durée et de la fréquence des sécheresses est susceptible d'entraîner de plus grands déficits d'humidité du sol. Lorsque l'eau du sol est épuisée, la végétation ne peut plus compter sur l'eau souterraine pour sa survie (si l'eau souterraine est présente à proximité de la zone des racines). Pendant les périodes sèches, ceci peut conduire à une augmentation de l'évapotranspiration de l'eau souterraine. Les impacts indirects liés à l'occupation des sols, peuvent également affecter l'évapotranspiration de l'eau souterraine.

L'écoulement de l'eau souterraine vers des plans d'eau de surface, sera commandé par les niveaux de charge relative entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Si l'eau souterraine baisse en dessous des niveaux d'eau de surface, l'écoulement des eaux souterraines, comme débit de base ou débit de source ne peut plus se produire. De même, si l'eau de surface s'écoulait vers le système des nappes, par exemple à partir d'un cours d'eau, cette recharge peut cesser si les niveaux d'eau de surface diminuent au-dessous des niveaux des eaux souterraines locales. Dans les régions semi-arides et arides, la dépendance sur les eaux souterraines pour maintenir le débit de base des cours d'eau permanents est susceptible d'être plus grande durant les périodes de sécheresse prolongée.

Le sur-pompage de l'eau souterraine est un impact indirect du changement climatique et constitue un mécanisme de décharge des eaux souterraines aussi. Les hausses prévues de la variabilité des précipitations sont susceptibles d'entraîner des sécheresses plus intenses et des inondations, qui affectent la fiabilité de l'approvisionnement en eau de surface. La demande humaine pour les eaux souterraines est donc susceptible d'augmenter pour compenser cette baisse de la disponibilité des eaux de surface et, le cas échéant, l'eau souterraine va devenir un outil essentiel pour les communautés afin de s'adapter au changement climatique.

### Réserve d'eau souterraine

La réserve de la nappe d'eau souterraine est le bilan entre les entrées et les sorties sur une période de temps donnée. Les aquifères fournissent de l'eau qui a été rechargée au fil des siècles et des millénaires. Le stockage est contrôlé par les propriétés intrinsèques de l'aquifère tels que le coefficient d'emmagasinement, la transmissibilité et la géométrie de l'aquifère. Les aquifères d'envergure régionale reçoivent la recharge à partir de vastes zones du bassin et donc ne réagissent pas à la variabilité climatique à court terme, alors que les aquifères libres peu profonds sont plus sensibles à la variabilité à petite échelle du climat. L'impact du changement climatique sur la réserve dépend de si oui ou non l'eau souterraine est une ressource renouvelable ou non renouvelable (fossile). Même s'il n'y a pas d'impact direct du changement climatique sur les eaux souterraines fossiles, l'impact serait d'encourager la surexploitation de l'eau fossile au cours de la période de stress. Le déficit de recharge, en raison du changement climatique, conduit à la réduction de la réserve renouvelable.



### Qualité de l'eau

Dans de nombreuses zones, les aquifères sont une importante source d'approvisionnement en eau douce. Le maintien de la qualité de l'eau dans ces aquifères est essentielle pour les communautés. Dans les aquifères peu profonds, les températures de l'eau souterraine peuvent augmenter en raison de l'augmentation des températures de l'air. Dans les zones arides et semi-arides l'augmentation de l'évapotranspiration peut conduire à la salinisation des sols, ce qui aura une incidence sur la qualité de l'humidité du sol et le système des eaux souterraines associées. Dans les aquifères côtiers, l'élévation du niveau de la mer et les déferlements de tempête sont susceptibles de conduire à l'intrusion d'eau de mer et la salinisation des eaux souterraines en particulier dans les zones de surexploitation des ressources en eau souterraine.

Dans les régions où l'on prévoit que l'intensité des précipitations pourrait augmenter, les polluants (pesticides, matières organiques, métaux lourds, et les latrines à fosse) seront de plus en plus entraînés dans les masses d'eau, y compris les eaux souterraines. En outre, la recharge provenant des plans d'eau de surface polluée va encore compromettre la qualité des eaux souterraines.

## 11.6 Changement climatique et croissance de la population

La croissance de la population a une relation intime avec le changement climatique. L'accroissement de la population entraîne une augmentation de la demande en eau à la fois pour un usage domestique, et pour la production de nourriture et pour l'industrie. Les changements, associés, d'occupation des sols et les facteurs socio-économiques sont susceptibles d'influencer la capacité à gérer convenablement la ressource en eau souterraine.

En particulier en Afrique, l'eau souterraine a été mal gérée. Le faible investissement dans les investigations et la gestion des eaux souterraines a mis la ressource sous pression, soit par la pollution ou par les prélèvements. La hausse de l'utilisation des eaux souterraines, associée à la croissance de la population, est également un fait, en particulier dans les zones arides et semi-arides où l'eau est rare.

La population africaine va croître d'environ 154% entre 2000 et 2050 selon la variante moyenne des Nations Unies, et de 119% à 193% selon les variantes basse et haute, du FNUAP (2000, 2008 cité dans Carter et Parker, 2008). Il est bien établi que la demande en eau augmente au fil du temps comme une conséquence à la fois de la croissance démographique et l'évolution des modes d'utilisation de l'eau (Carter et Parker, 2008).

Le changement de l'occupation des sols affecte également les ressources en eau souterraine. Le degré et l'ampleur de l'impact dépendra des conditions locales. Dans un petit bassin sahélien au Niger, Seguis et al. (2004) ont constaté que la transition d'une période humide sous une couverture «naturelle» du sol (1950) à une période sèche avec des sols en culture (1992) a entraîné une augmentation de 30 à 70% du ruissellement. La recharge dans ce bassin a eu lieu préférentiellement à travers les étangs, et donc l'augmentation du ruissellement a provoqué une hausse significative et continue du niveau de la nappe sur la même période.



## 11.7 Implications pour les secteurs tributaires des eaux souterraines

En conséquence du changement climatique et la rareté de l'eau de surface, la dépendance sur les eaux souterraines en particulier en Afrique devrait être élevée. Le changement climatique et l'accroissement de la population peut compromettre la disponibilité et la qualité des ressources en eau souterraine avec des conséquences importantes pour la santé humaine et l'environnement, les moyens de subsistance, la sécurité alimentaire et la stabilité sociale et économique.

Les puits peu profonds fournissent souvent une source importante d'eau potable pour les populations rurales dispersées de l'Afrique. La hausse prévue de la demande et de la gravité des sécheresses peuvent provoquer le tarissement de beaucoup de ces puits peu profonds. L'assèchement de la nappe phréatique peu profonde a un impact négatif considérable sur les moyens de subsistance en milieu rural. Avec des alternatives limitées pour un approvisionnement en eau potable et de longues distances entre les points d'eau, la perte par épuisement de ces puits, pourrait forcer les populations à utiliser des ressources en eau de qualité douteuse (Fig. 11.4). L'irrigation de petits périmètres, utilisant généralement les eaux souterraines peu profondes, serait également touchée.

Lorsque l'augmentation des épisodes de fortes précipitations sont projetées, les inondations peuvent emporter des installations d'assainissement, répandant les eaux usées et potentiellement contaminant les ressources en eau souterraine. Les inondations sont liées à un risque accru de maladies diarrhéiques. Le risque est susceptible d'être plus élevé dans les zones urbaines en raison de la densité de la population plus élevée et la concentration des sources de polluants. Dans les régions côtières, l'intrusion d'eau de mer peut limiter la capacité des eaux souterraines à servir des populations au nombre déjà élevé, et en expansion rapide.



Figure 11.4: Défis du stress hydrique

## 11.8 Adaptation au changement climatique

### Qu'est-ce que l'adaptation?

Afin de faire face au changement climatique, une approche intégrée est nécessaire. Une telle approche englobe à la fois l'atténuation, qui porte sur les facteurs de changement climatique et l'adaptation, qui estime les mesures nécessaires pour s'accommoder de tels changements.



L'adaptation consiste aux ajustements apportés aux systèmes naturels et humains en réponse à des changements de conditions climatiques vécus ou projetés, et de leurs impacts bénéfiques et néfastes (Fig. 11.5). Dans le contexte des eaux souterraines, ils concernent la réduction de la vulnérabilité des systèmes tributaires des eaux souterraines au changement climatique et à la variabilité hydrologique. Cependant l'adaptation au changement climatique est également susceptible d'accroître l'utilisation et la dépendance sur les eaux souterraines en réponse à la baisse des ressources en eau de surface.

### **Comment les organismes de bassin peuvent ils s'adapter au changement climatique?**

Les adaptations sont essentiellement des réponses en direction des risques associés à la variabilité du climat et du changement climatique. En ce qui concerne les ressources en eau, ce sont les organismes de bassin qui auront à mettre en œuvre des stratégies et des politiques visant à atténuer les risques associés au stress hydrique et à adopter une gestion de l'eau adaptée aux conditions changeantes des ressources en eau.

Chaque bassin sera différent en raison de différences dans le stockage de l'eau dans le bassin, qu'elle soit de surface ou souterraine, et en raison des changements amenés par le changement climatique. En outre, la demande en eau dans chaque bassin diffère, en raison de divers problèmes socio-économiques. Les organismes de bassin peuvent être proactifs en matière de changement climatique en effectuant des évaluations des risques pour leurs propres bassins et la construction de leurs stratégies d'adaptation en conséquence. Cela peut être un exercice important pour les organismes de bassin à mener à bien avant que les crises ne fassent surface.

### **Importance des eaux souterraines dans un climat qui change**

L'eau souterraine joue un rôle essentiel dans l'adaptation à la variabilité hydrologique et au changement climatique (Clifton et al. 2010). Les eaux souterraines fournissent des options pour améliorer la fiabilité de l'approvisionnement en eau à usage domestique, industriel, le bétail et l'irrigation. Il ya certaines adaptations qui peuvent être accessibles en utilisant les eaux souterraines :

- **Intégrer la gestion des ressources en eau de surface et souterraine** – comprenant l'utilisation conjointe à la fois de la nappe et les eaux de surface pour satisfaire la demande en eau. La gestion intégrée a pour but de faire en sorte que l'utilisation d'une ressource en eau n'ait pas d'effet défavorable sur l'autre. Il implique des prises de décisions fondées sur des impacts de l'ensemble du cycle hydrologique, et sur la répartition spatiale des ressources en eau de surface et souterraine et la distribution de la demande en eau.
- **Gestion de la recharge de l'aquifère (MAR)** – notamment la construction d'infrastructures et / ou la modification du paysage pour améliorer volontairement la recharge des nappes. La MAR est parmi les possibilités d'adaptation les plus prometteuses pour les pays en développement. Elle a plusieurs avantages potentiels, y compris le stockage de l'eau pour une utilisation future, la stabilisation ou récupération des niveaux d'eau souterraine des aquifères surexploités; ce qui réduit les pertes par évaporation, la gestion de l'intrusion saline ou l'affaissement des sols, et permettant la réutilisation des déchets ou des eaux pluviales.



## ■ Changement de l'occupation des sols – le changement d'occupation des sols

**Tableau 11.2. Les options d'adaptation: renforcer la capacité d'adaptation**

Adaptation option	Adaptations
<b>Le capital social</b> Ces options sont veulent permettre aux communautés de comprendre le climat et les risques hydrologiques et participent activement à la réponse de la gestion.	Éducation et formation - pour améliorer la compréhension par la communauté et les parties prenantes des risques climatiques et leur capacité à participer à des réponses de gestion et / ou de générer, de modifier ou d'appliquer des adaptations. Gouvernance - déléguer un certain niveau de responsabilité de la planification et de la gestion des eaux souterraines aux communautés locales pour accroître "l'appropriation" locale des problèmes et des réponses Partage de l'information - initier des processus de partage d'informations sur les risques climatiques et les réponses au sein et entre les communautés vulnérables.
<b>Informations sur la ressource</b> Rassembler et fournir des informations sur les risques climatiques et le système des eaux souterraines qui sont gérées.	Comprendre le climat - l'analyse des données historiques et paléo-climatiques pour comprendre les facteurs naturels de la variabilité du climat. Projections du changement climatique - développer à échelle régionale ou locale des projections du changement climatique pour la zone concernée. Quantifier le système des eaux souterraines - comprendre l'ampleur et les caractéristiques de l'aquifère (s); les processus de recharge, de transfert et de décharge; le bilan d'eau (y compris l'usage); qualité de l'eau, etc. Suivi, évaluation et reportage - de l'état de la ressource en eau souterraine.
<b>Recherche et développement</b> Des activités de recherche et développement pour améliorer l'efficacité des mesures d'adaptation au changement climatique et à la variabilité hydrologique.	Évaluations de l'impact climatique - des études pour mieux définir la nature des impacts du changement climatique prévu sur le système des eaux souterraines et le climat associé et risques hydrologiques. Gestion de la recharge des nappes - méthodes. La gestion de la réserve d'eau souterraine - technologies, gestion de l'eau et d'autres pratiques pour maximiser la capacité de stockage des eaux souterraines et la disponibilité des ressources. Protection de la qualité de l'eau - des technologies et des systèmes de gestion pour permettre le traitement et la réutilisation des eaux contaminées et éviter la contamination de l'eau de qualité supérieure par l'eau de moindre qualité. La protection des aquifères côtiers et insulaires des effets de l'élévation du niveau de la mer. Gérer la demande pour les eaux souterraines - des technologies et des pratiques de gestion qui améliorent l'efficacité des usages urbains et agricoles de l'eau, réduisent les exigences de qualité de l'eau pour les usages non potables; ou réduisent le besoin en eau.
<b>Gouvernance et institutions</b> Amélioration de la gouvernance et des dispositions institutionnelles pour la gestion des ressources en eau souterraine. Des régimes de planification améliorés pour les eaux souterraines et les systèmes humains et naturels associés.	Gestion conjointe de l'eau de surface et de l'eau souterraine dans les zones rurales. La gestion du cycle intégré de l'eau (y compris les diverses sources potable et non potable dans les zones urbaines). Une planification multi-juridictionnelle et des modalités de gestion des ressources pour les systèmes aquifères de grande envergure qui traversent les frontières juridictionnelles. Définir les allocations d'eau sur la base des ressources partagées plutôt que du volume. Définir et réglementer les normes relatives (par exemple) aux ressources en eau souterraine et à la planification de l'occupation des sols, la gouvernance de l'eau, la gestion de l'environnement. Un plan de réponse à la sécheresse.
<b>Les marchés</b> Création et fonctionnement des marchés de l'eau et des services environnementaux associés.	Marchés - création et fonctionnement des marchés pour le commerce de l'eau dans un système d'eau souterraine. Le marché pour déterminer le prix de l'eau. Les droits de propriété - établir des droits de titre et de propriété clairs sur les eaux souterraines.

peut fournir une occasion d'améliorer la recharge, pour protéger la qualité des nappes et de réduire les pertes d'eau souterraine par évapotranspiration. Les changements



dans l'occupation des sols ne doivent pas entraîner des effets néfastes à d'autres parties de l'environnement. Les cultures de faible demande d'eau et les cultures tolérantes au sel sont potentiellement des changements utiles d'occupation des sols, pour s'adapter aux différentes situations de stress hydrique.

### **Renforcer les capacités d'adaptation pour la gestion des eaux souterraines**

Renforcer les capacités d'adaptation est un thème crucial et transversal, il s'applique, au moins partiellement, à de multiples thèmes. Des options adaptatives de renforcement des capacités sont généralement concernées, en fournissant les conditions nécessaires pour que d'autres formes d'adaptation soient mises en œuvre avec succès, plutôt que de gérer ou d'éviter les risques climatiques ou hydrologiques directement. Certaines options d'adaptation d'après Clifton et al. (2010) sont présentées dans le tableau 11.2.

### **Gestion de la recharge des eaux souterraines**

Les zones de recharge des eaux souterraines peuvent être gérées pour protéger ou améliorer les ressources en eau et pour maintenir ou améliorer la qualité de l'eau. Une bonne méthode serait de gérer la recharge de l'aquifère. La gestion de la recharge des aquifères (MAR) implique la construction d'infrastructures et / ou la modification du paysage pour améliorer volontairement la recharge des nappes (Fig. 11.6). Elle constitue l'une des voies de «gérer la recharge des aquifères» par des mesures d'adaptation, et est de plus en plus considérée comme une option pour améliorer la sécurité de l'approvisionnement en eau dans les zones où elles sont rares (Gale, 2005). La MAR est parmi les possibilités d'adaptation les plus importantes pour les pays qui cherchent à réduire la vulnérabilité au changement climatique et à la variabilité hydrologique. Elle a plusieurs avantages potentiels, notamment : le stockage de l'eau pour une utilisation future; la stabilisation ou la récupération des niveaux d'eau souterraine dans les aquifères surexploités; réduire les pertes par évaporation; la gestion de l'intrusion saline ou les affaissements de terrain; et permettant la réutilisation des déchets ou des eaux pluviales. La mise en œuvre de la MAR nécessite des opportunités adéquates de stockage de l'eau souterraine. Les conditions aquifères doivent être appropriées et les sources d'eau adéquates (par exemple excès de flux d'eau de surface de la saison humide ou eaux usées traitées) sont également nécessaires. Le potentiel de la MAR doit être déterminé dans un pays ou une région donnée avant le début des activités.

### **Protection de la qualité des eaux souterraines**

Le changement climatique et la variabilité hydrologique peuvent affecter la qualité des eaux souterraines disponibles pour l'usage d'un système tributaire des eaux souterraines. Cela est particulièrement vrai pour les eaux souterraines dans les petites îles et les zones côtières qui, selon les projections, pourraient être soumises à l'élévation du niveau de la mer. Il est également vrai lorsque la sécurité réduite de l'offre conduit les gestionnaires des ressources en eau à inclure une eau de qualité inférieure dans le flux d'alimentation (par exemple à travers la MAR en utilisant l'eau de pluie ou des eaux usées traitées); c'est vrai aussi lorsque la pression accrue sur les ressources en eau souterraine, conduit à un usage élevé et un plus grand risque de contamination d'un aquifère de bonne qualité par des aquifères sous-jacents de qualité moindre.



## Gestion des réserves d'eau souterraine

Alors que les aquifères sont reconnus comme des réservoirs d'eau souterraine, ils sont rarement utilisés avec le même niveau de précision et de contrôle que les grands réservoirs d'eau de surface. Il existe des possibilités de gérer les stockages d'eau souterraine plus efficacement et de réduire la vulnérabilité au changement climatique et à la variabilité hydrologique, des systèmes qui dépendent des eaux souterraines.

## Gestion de la demande en eau souterraine

Les adaptations au changement climatique pour les ressources en eau fonctionnent le plus souvent avec la gestion de la demande. Dans de nombreux cas, les adaptations pour les systèmes tributaires de l'eau souterraine et de l'eau de surface seront identiques. Dans les zones où le changement climatique réduit la sécurité de l'approvisionnement en ressources en eau de surface, il est probable qu'il y ait une hausse significative de l'utilisation des ressources en eau souterraine, comme adaptation au changement climatique. Cela nécessitera une plus grande attention à la gestion de la demande en eau souterraine et à la gestion conjointe avec les eaux de surface. Il peut également être possible d'utiliser les réservoirs souterrains comme espace de stockage pour les écoulements d'eau de surface excédentaires pendant les périodes d'abondance, afin d'en faire usage ensuite pendant les périodes de pénurie d'eau de surface.

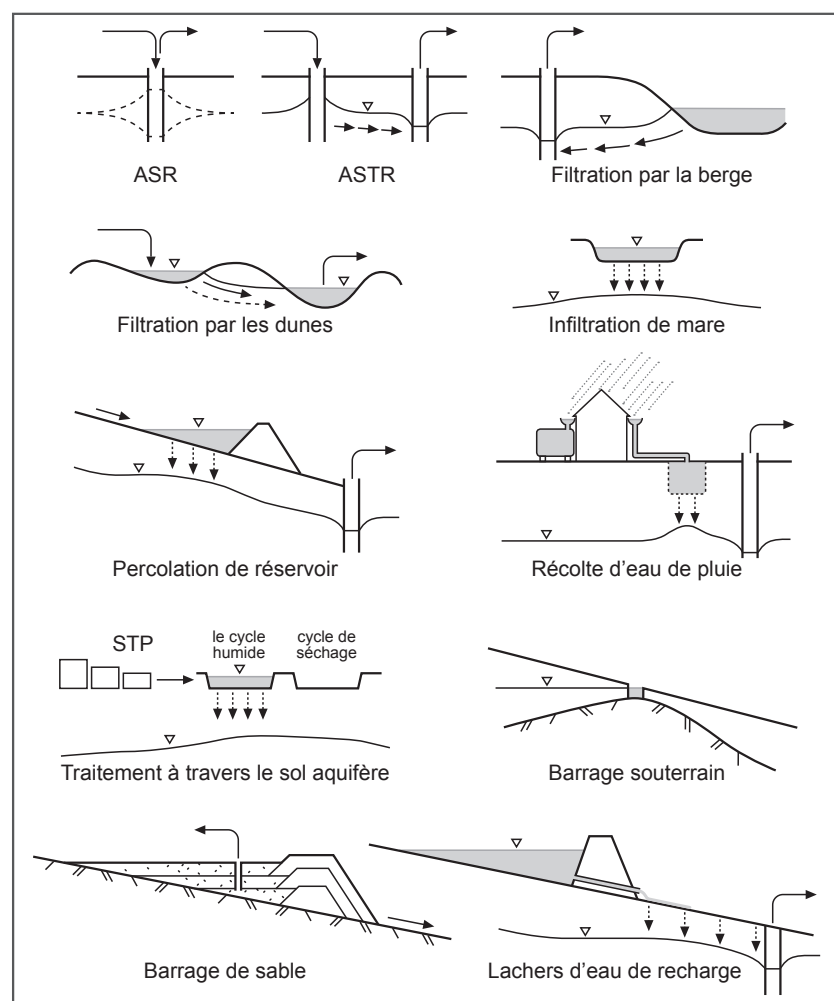


Figure 11.6: Exemples d'approches de gestion de la recharge de l'aquifère (MAR).

ASR: stockage et remontée de l'eau de l'aquifère; ASTR: stockage, traitement et remontée de l'aquifère, STP: usine de traitement des eaux usées. Source: Peter Dillon, in Clifton et al., 2010



### Gestion de la décharge des eaux souterraines

Les systèmes aquifères déchargent l'eau à la surface du sol, aux rivières, lacs, zones humides, ou à proximité des environnements marins au large des côtes. La décharge, la recharge et prélèvement sont dans un état d'équilibre dynamique, tel que les changements dans la recharge ou le prélèvement finalement débouchent sur un changement dans la décharge. Dans certains contextes, il est possible d'augmenter la disponibilité des ressources (à l'usage des systèmes humains) en réduisant la décharge des eaux souterraines.

## 11.9 Résumé

Le changement climatique provoque une pression sur des ressources en eau déjà sollicitées, sur des écosystèmes et des systèmes dérivés, qui sont utilisés pour servir la société. Les eaux souterraines doivent être protégées, et son utilisation et sa conservation adaptées au changement climatique. Les eaux souterraines peuvent améliorer la résilience des usages domestiques, agricoles et industriels de l'eau douce, par rapport à la variabilité et au changement climatique. Comme seule source pérenne d'eau douce dans de nombreuses régions, l'eau souterraine est d'une importance vitale pour la sécurité de l'eau de nombreuses communautés, à l'instar habitants de zones rurales dans les pays à faible revenu. L'irrigation par les eaux souterraines fournit un tampon contre les conditions climatiques extrêmes, et est par conséquent essentielle à la sécurité alimentaire mondiale (Taylor et al., 2013).



## 11.10 Références et lectures en ligne

BGR, (2008).

**Groundwater and Climate Change: Challenges and Possibilities.**

Hanover, Germany

Calow, R., MacDonald A (2009).

**What will climate change mean for groundwater supply in Africa?**

Odi, background Note.

Carter R., Parker A (2008).

**Climate change, population trends and groundwater in Africa.**

Hydrological Sciences Journal, 676-689

Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W. T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr A., and Whetton, P. (2007).

**Regional Climate Projections' in S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller (eds),**

*Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.*

Clifton C., Evans, R, Hayes, S., Hirji, R., Puz G., Pizarro C. (2010)

**Water and Climate Change: Impacts on groundwater resources and adaptation options.**

Water working notes. Note No. 25. Water partnership program, bnwpp.

Conway D (2005).

**From headwater tributaries to international river: Observing and adapting to climate variability and change in the Nile basin.**

Global Environmental Change 15: 99–114

Döll, P and Floerke, M. (2005).

**Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge: model tuning to local data for semi-arid and arid regions and assessment of climate change impact.**

Frankfurt Hydrology Paper. August 2005.

Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., Lister, D. (2001).

**African climate change: 1900–2100.**

Climate Research 17, 145–168.

IPCC, (2001).

**Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to The Third Assessment Report of the IPCC.**

Cambridge University Press, Cambridge, UK.



JMP (2008) Global water supply and sanitation 2008 report.

**Joint Monitoring Programme WHO/UNICEF.**

Geneva: World Health Organization.

Gale, I. (ed). (2005).

**Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas.**

UNESCO publication. 34 pp. Available online: <http://www.iah.org/recharge/>

MacDonald, A., Bonsor, HC., Dochartaigh, BEO., Taylor R (2012).

**Quantitative maps of groundwater resources in Africa.**

Environ. Res. Lett. 7 (2012) 024009 (7pp)

SKM (2009).

**Adaptation options for climate change impacts on groundwater resources.**

Taylor et al. (2013)

**Ground water and climate change.**

Review article. Nature Climate change. 3: 322-329

[www.bebuffered.com](http://www.bebuffered.com)