

La gestion des ressources en eau au Maroc face aux changements climatiques, état des lieux et alternatives technologiques d'adaptation.

Water resources management in Morocco, climate change and technology adaptation alternatives.

M. SBAA¹ et M. VANCLOOSTER²

1. Centre de l'Oriental des Sciences et Technologies de l'Eau, Unité Eau, Sol et Déchets. Faculté des Sciences. Université Mohammed Premier. Oujda., 60000, Oujda (Maroc)

2. Earth and Life Institute-Environmental Sciences. Université Catholique de Louvain. Croix du Sud, 2.L7.05.02 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium.

Résumé

Les rapports du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat « GIEC » sont unanimes sur les variations observées et projetées de la moyenne annuelle de la température à la surface du globe, qui montrent un réchauffement lié à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. En effet, la concentration de CO₂ atmosphérique global a augmenté durant les cinq dernières décennies. Cette augmentation est liée principalement à la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) et à la production de ciment, aux Etats Unis d'Amérique, dans les pays de l'Union Européenne, la Chine et l'Inde, qui sont responsables de la part la plus importante de ces émissions des GES. Ces changements de la composition de l'atmosphère terrestre, sont synonymes de dérèglements climatiques qui ne manqueront pas d'avoir des impacts sur la sécurité alimentaire, la sécurité énergétique, la sécurité sanitaire et la sécurité environnementale.

Cet article essaie de réaliser une synthèse de l'état des lieux sur les changements climatiques globaux et leur impact sur la gestion locale des ressources en eau, en se basant sur les rapports du GIEC et la littérature scientifique et technique. En effet, au Maroc et à l'horizon 2020, certains bassins seront en dessous du seuil de pénurie hydrique (500 m³/hab/an) et d'autres seront en dessous du seuil de stress hydrique (1000 m³/hab/an). Selon les prévisions, les précipitations marocaines peuvent baisser en régions montagneuses et dans les régions du sud, les phénomènes hydrologiques extrêmes seront plus fréquents et plus intenses (sécheresses et inondations). Face à ces changements climatiques, certaines alternatives technologiques d'adaptation existent déjà et doivent être renforcées dans certains bassins hydrauliques marocains en déficit hydrique : (i) transfert des eaux entre les bassins, (ii) irrigation localisée, (iii) dessalement des eaux saumâtres et marines et (iv) réutilisation des eaux usées traitées. Ces alternatives d'adaptations ont été décrites en termes de composantes et contraintes technologiques, d'efficacité et de coûts à travers des exemples de régions climatiques similaires au Maroc.

Mots clés : changements climatiques, CO₂, température, ressources en eau, transfert d'eau, dessalement, irrigation, eaux usées, réutilisation, Maroc.

Abstract

The reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) are unanimous on the observed and projected changes in the annual mean global surface temperature, which show warming due to Greenhouse gas (GHG) emissions into the atmosphere. Indeed, the global atmospheric CO₂ concentration has increased over the last five decades. This increase is mainly due to the burning of fossil fuels (coal, oil and gas) and cement production in the United States of America, European Union countries, China and India. Responsible for the largest share of GHG emissions. These changes in the composition of the Earth's atmosphere are synonymous with climatic disruptions that will undoubtedly have impacts on food security, energy security, health security and environmental safety.

This paper attempts to synthesize the state of the art on global climate change and its impact on local water resource management based on IPCC reports and the scientific and technical literature. Indeed, in Morocco and by 2020, some basins will be below the threshold of water scarcity (500 m³ / inhab / year) and others will be below the threshold of water stress (1000 m³ / inhab / year) . Moroccan precipitation is expected to decline in mountainous regions and in the southern regions, extreme hydrological events will be more frequent and more intense (droughts and floods). In the face of these climate changes, certain adaptation technological alternatives already exist and must be reinforced in certain water-drained Moroccan water basins: (i) water transfer between basins, (ii) localized irrigation, (iii) brackish water desalination And (iv) reuse of treated wastewater. These alternatives of adaptations have been described in terms of technological components, constraints, efficiency and costs through examples of similar climatic regions in Morocco.

Keywords: climate change, CO₂, temperature, water resources, dams, desalination, irrigation, wastewater, reuse, Morocco.

Introduction

C'est Nicolas Théodore de Saussure, chimiste et botaniste suisse qui a publié en 1804 dans ses recherches sur la chimie de la végétation que le dioxyde de carbone est la nourriture de la plante. Les producteurs primaires (végétaux terrestres et aquatiques) sont les organismes qui arrivent à piéger le dioxyde de carbone au niveau du stroma du chloroplaste pour la synthèse des sucres (saccharose et amidon) stockés dans les tissus ou circulant dans toute la plante sous forme de sève élaborée. C'est ce carbone qui est à la base de toute la production primaire des écosystèmes, transférée dans le réseau trophique pour finalement subvenir aux besoins croissants de la consommation humaine. Une part importante du carbone est restituée à l'écosystème par respiration des organismes terrestres et aquatiques et par les décomposeurs qui libèrent une partie du carbone dans l'atmosphère sous forme de CO₂, suite à la minéralisation de la matière organique des déchets. C'est également une partie du carbone de la biomasse des écosystèmes, piégée et fossilisée dans les couches sédimentaires, qui est à l'origine de l'augmentation du CO₂ anthropique de l'atmosphère, suite à sa transformation en combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz) utilisés massivement depuis le début de l'ère industrielle.

Depuis le début de l'ère primaire, la teneur atmosphérique en CO₂ a connu d'importantes variations. Ainsi, l'atmosphère terrestre renfermait environ 3500 ppm de CO₂ au milieu du Crétacé soit 10 fois plus qu'aujourd'hui. En outre, pendant les périodes glaciaires s'observe une décroissance de la teneur en CO₂ atmosphérique qui a été à peine de 180 ppm voici 20 000 ans [1]. C'est Svante Arrhenius (1896) [2], chimiste suédois, prix Nobel de chimie 1903, qui est le premier scientifique à trouver le lien entre la variation de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère et la variation de la température de la terre. Arrhenius calcule qu'un doublement de la quantité de CO₂ dans l'air peut provoquer

un réchauffement planétaire d'environ 5°C. Les études paléoclimatiques ont également mis en évidence une remarquable corrélation entre l'intensité de l'effet de serre lié aux teneurs en CO₂ atmosphériques et les températures moyennes globales. On constate une tendance continue à la décroissance des températures terrestres depuis le crétacé, période où la température moyenne globale était de l'ordre de 20°C contre 15 °C aujourd'hui et le déclin de la concentration en CO₂ atmosphérique depuis cette époque [1].

Actuellement le constat est sans appel, la concentration de CO₂ atmosphérique global a augmenté de 277 ppm en 1750 [3] à 395 ppm en 2013 [4], soit une augmentation de plus de 43%. Cette croissance de la teneur atmosphérique en CO₂ va jouer un rôle important dans l'augmentation des températures globales et pouvant avoir un dérèglement climatique planétaire. Les pays pointés du doigt sont les Etats Unis d'Amérique, les pays de l'Union Européenne, la Chine et l'Inde, qui sont responsables du ratio le plus important des émissions de combustibles fossiles et d'industrie de ciments.

Par ailleurs, les impacts du dérèglement climatique sont multiples, complexes et différenciés selon les régions du monde et difficile à prédire par les modèles mathématiques. Ainsi des faisceaux d'incertitudes demeurent encore selon Bégorre et Jouzel (2015) [5] : (i) la limitation des connaissances sur les phénomènes climatiques pour établir des modèles fiables de l'évolution du climat, (ii) la variabilité naturelle du climat, (iii) les émissions futures des GES sont dépendantes de l'évolution socio-économique de chaque pays et (iv) la rétroaction : les émissions d'aujourd'hui peuvent avoir des impacts futurs sur une échelle de temps très longue.

Face à ces changements climatiques, les ressources en eau sont sujettes à des aléas de sécheresse et d'inondations qui sont perceptibles et fréquentes dans les pays du sud où l'eau est liée à des secteurs

stratégiques du développement socioéconomique : l'agriculture (sécurité alimentaire), le tourisme (source de revenu) et l'énergie (hydroélectrique).

L'objectif de cette recherche est de mettre en évidence l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau à travers les rapports publiés par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), publications scientifiques, rapports des ministères du Royaume marocain et les rapports des Nations Unies et autres organismes internationaux. Ce qui permettra de mettre à la disposition des chercheurs, des décideurs et des organisations non gouvernementales au niveau local un outil de diagnostic et de vulgarisation de ces impacts sur les écosystèmes aquatiques. Par ailleurs nous essayerons de mettre l'accent sur les alternatives d'adaptation de gestion de ressources en eau, les mieux adaptées au contexte marocain, face aux changements climatiques.

Le CO₂ anthropique

La matière organique de la biomasse sédimentée en milieu anaérobique n'ayant pas subi de minéralisation est à l'origine de la formation des réserves de pétrole, du gaz naturel et du charbon. En effet, à un millier de mètre en profondeur et en absence d'oxygène l'activité biochimique des

microorganismes se traduit par un prélèvement de l'azote et de l'oxygène nécessaires à leur métabolisme et le résidu restant appelé kérogène, de poids moléculaire élevé et riche en carbone et hydrogène. Au fur et à mesure que le kérogène s'enfonce en profondeur, il subit une décomposition (pyrolyse) sous l'effet double de la température et de la pression. Ainsi, à 2000 m de profondeur et à une température de 100 °C le kérogène commence à générer des hydrocarbures [6] (ONYM, 2015). L'exploitation des gisements pétroliers et gaziers, et des mines de charbon s'est accompagnée d'émissions anthropogéniques dans l'atmosphère aux alentours de 1920 et n'ont pas cessé d'augmenter de façon continue jusqu'à présent [7]. L'analyse des perturbations globales du cycle du carbone de la planète (Fig.1) [7] montre que les émissions provenant de la combustion de combustibles fossiles et de la production de ciment sont dominantes de l'ordre de 32,6 Gt CO₂/an, alors que les émissions provenant de la déforestation et d'autres changements d'utilisation des terres ne représentent que 3,3 Gt CO₂/an. Ainsi, la croissance de carbone dans l'atmosphère est de 15,8 Gt CO₂/an et l'absorption de carbone par les « puits » : dans l'océan de 9,5 Gt CO₂/an et dans les réservoirs terrestres de 10,6 Gt CO₂/an.

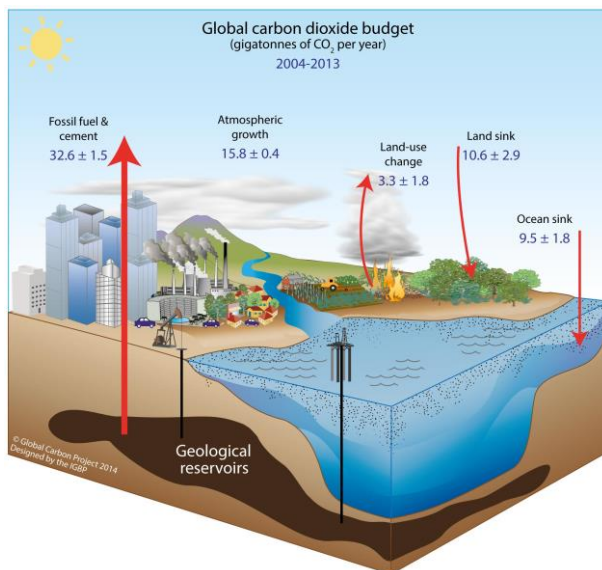


Figure 1 : Représentation schématique de la perturbation globale du cycle du carbone de la planète causée par les activités anthropiques, moyenne calculée à l'échelle mondiale pour la décennie 2004 à 2013 [7]

1 Gigatonne (Gt) = 1 billion tonnes = 1×10^{15} g = 1 Petagram (Pg)

1 kg carbon (C) = 3.664 kg carbon dioxide (CO₂)

1 GtC = 3.664 billion tonnes CO₂ = 3.664 GtCO₂

Pour convertir le GTéqCO₂ en ppm (partie par million), on utilise le facteur de conversion suivant (Prather et al., 2012)

1GTC ppm = 2,120 x 1 ppm

Le CO₂ est l'un des gaz qui contribue à 64 % avec les autres gaz à l'effet de serre en absorbant dans les basses couches de l'atmosphère des rayonnements infrarouges (flux thermique ascendant de 368 watt (w)/m²) qui sont réémis vers la surface (flux thermique descendant de 326 w/m²) ce qui élève la température de l'atmosphère au voisinage du sol (température superficielle moyenne de la terre de 15°C) [1]. L'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère est à l'origine de l'effet de serre additionnel participant à un réchauffement supplémentaire de l'atmosphère.

L'évolution des concentrations du CO₂ depuis 1958 jusqu'à 2014 est illustrée dans la graphique de la figure 2. Les données mensuelles de 1980-2014 sont de la National Oceanic and Atmospheric Administration / Earth System Recherche Laboratory [8]. L'estimation 1980-2014 est une moyenne de mesures atmosphériques de CO₂ directes à partir de plusieurs stations de la surface marine [8]. Les données mensuelles de 1958-1979 sont de

l'Institution de la Scripps d'océanographie, basée sur une moyenne de mesures atmosphériques de CO₂ directes à partir des stations Mauna Loa et le Pôle Sud [9]. Ainsi, la concentration de CO₂ global atmosphérique de la surface de la terre a augmenté approximativement de 277 ppm (partie par million) en 1750 [3] à 395 ppm en 2013 [4], soit une augmentation de plus de 43% (Fig. 2). Mauna Loa a enregistré les premières mesures quotidiennes supérieures à 400 ppm en mai 2013 [7].

Les émissions annuelles de Gaz à Effet de Serre (GES) ont augmenté en moyenne de 1,0 gigatonne d'équivalent CO₂ (Gt_{eq}CO₂) (2,2 %) par an entre 2000 et 2010, alors que cette hausse était de 0,4 Gt_{eq} CO₂ (1,3 %) par an sur la période 1970-2000. Les émissions de CO₂ imputables à l'usage de combustibles fossiles et aux procédés industriels ont contribué dans une proportion de 78 % à l'accroissement du total mondial des émissions de GES entre 1970 et 2010, ce pourcentage demeurant analogue entre 2000 et 2010 [10].

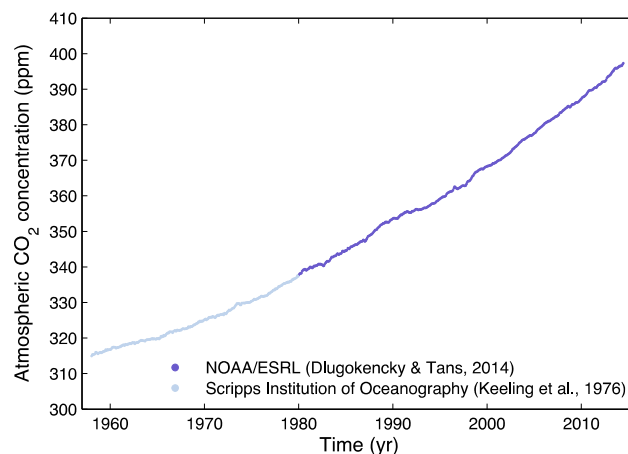


Figure 2 : Concentration moyenne mondiale de CO₂ atmosphérique de surface [7]

Les Etats Unis d'Amérique, les pays de l'Union Européenne, la Chine, l'Inde sont responsables de 63% des émissions de GES avec des taux respectifs de 26%, 23%, 11% et 3% [7].

Toutes ces mesures ont été réalisées dans la plus grande rigueur scientifique et technique (contrôle qualité des instruments

de mesure). Des équipes, des laboratoires et des stations sont mobilisées pour couvrir un vaste réseau de mesures des ces gaz à effet de serre. Les échantillons d'air sont recueillis par un vaste réseau d'échantillonnage dont le plus important est celui de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/ ESRL (Earth

System Research Laboratory) au Colorado (USA) (Fig. 3) formé de tours (*Tower*) et d'observatoires (*Observatory*) (Fig. 4&5) pour les mesures in situ et plus de 50 sites à travers le monde où sont prélevés chaque semaine par des volontaires des échantillons de surface (*Surface*). En outre, un autre programme d'échantillonnage consacré à la collecte d'échantillons d'air dans les profils verticaux de l'Amérique du

Nord par des avions (*Aircraft*) qui sont conservés dans des flacons de verre pour une analyse ultérieure par chromatographie phase gaz du dioxyde de carbone (CO₂), monoxyde de carbone (CO), de protoxyde d'azote (N₂O), de méthane (CH₄), d'hydrogène moléculaire (H₂), d'hexafluorure de soufre (SF₆), ainsi que les isotopes de CO₂ et de CH₄, et de multiples halogénés et hydrocarbures [11].

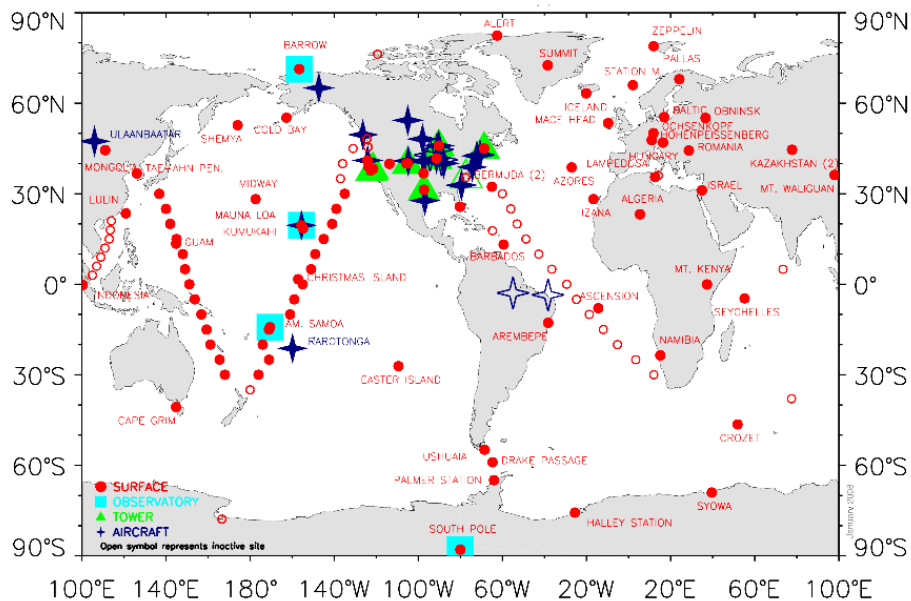


Figure 3 : Le réseau d'échantillonnage de l'air du Earth System Research Laboratory de la NOAA, utilisée pour mesurer la teneur des gaz à effet de serre [11].

Mesures de Surface : ces sites permettent de mesurer les gaz à effet de serre à travers la planète en fonction des saisons et des années. Le dispositif utilisé pour échantillonner l'air extérieur dans les flacons d'air est très facile à manipuler. Il se compose d'une ligne extensible d'admission d'air, une pompe et un tube pour raccorder deux flacons pour le prélèvement d'air.

Tours de grande taille (hauteur 300 m) : peuvent échantillonner l'air représentatif d'une zone beaucoup plus vaste "empreinte plus large" par rapport à l'échantillonnage de l'air à la surface.

Observatoires «de base» : sites de mesures dans des endroits éloignés à travers la planète, qui comprennent des endroits de l'Arctique et de l'Antarctique. Ces zones ont l'air bien mélangé qui ne sont pas "dopés" avec du dioxyde de carbone à partir d'une source locale de pollution.



Figure 4 : Tour de Walnut Grove, California
38.265 °N, 121.4911 °W
Mesure de CO₂, CO et CH₄ [11]



Figure 5 : Observatoire pôle sud
89.98 °S, 24.8 °W
Mesure de CO₂ [11]

L'ensemble de ces mesures atmosphériques de gaz à effet de serre, sont regroupées et permettent d'obtenir des distributions spatiales et temporelles globales (Fig.6) et

sont utilisées dans les modélisations du cycle du carbone.

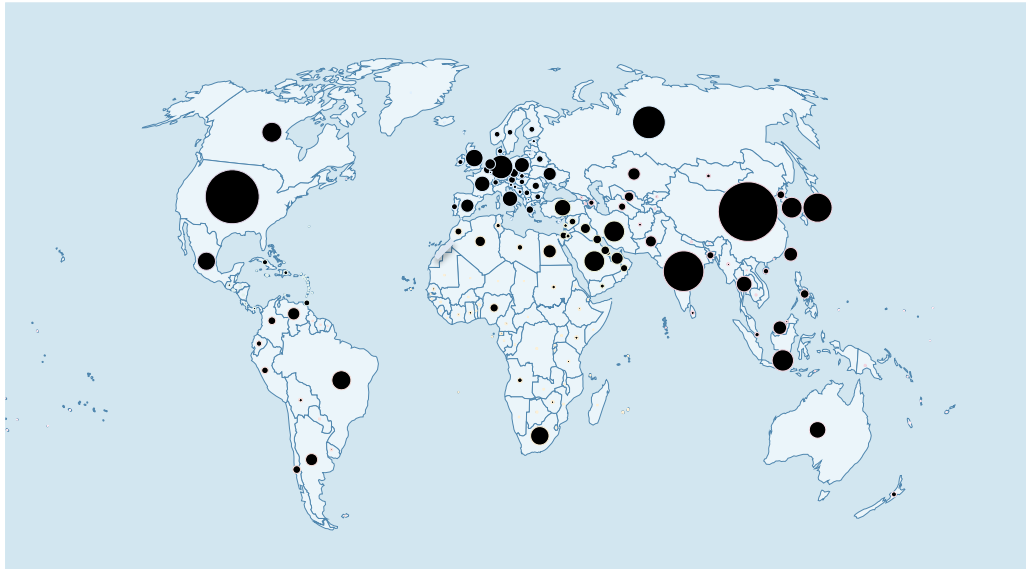


Figure 6 : Les émissions territoriales de CO₂ en millions de tonnes en 2014 [12].

Chine : 9679,8 MtCO₂, Etats Unis : 5560,6 MtCO₂, Inde : 2596,7 MtCO₂, Russie : 1594,8 MtCO₂, France : 331 MtCO₂
Maroc : 64,7 MtCO₂.

L'analyse et la synthèse de ces données issues des différents réseaux de mesure, sont pilotées par Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) créé en 1988. C'est une instance de l'Organisation des Nations Unies (ONU) issue de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Le GIEC est composé de 195 pays membres et regroupe 2500 experts scientifiques et relecteurs de 130 nationalités. Il a publié 5 rapports successivement en 1990, 1995, 2001, 2007 et 2013-2014 et réaffirme dans son rapport de 2014 [13] : (i) l'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établi ,(ii) les émissions anthropiques actuelles des GES sont les plus élevées et jamais observées ,(iii) les émissions anthropiques des GES ont augmenté depuis l'époque préindustrielle essentiellement à cause de la croissance démographique et économique et (iv) il est

extrêmement probable que les émissions anthropiques de GES aient été la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XXe siècle.

Le Maroc dispose d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air depuis 1997, il est composé de 3 stations mobiles et de 29 stations fixes (Casablanca-Mohammedia (13), Rabat (1), Salé (1), Kénitra (1), El Jadida (2), Safi (1), Tanger (1), Fès (1), Marrakech (3), Agadir (1), Essaouira (1), Khouribga (1), Settat (1) et Benslimane (1)) dont l'objectif est de mesurer, prévoir et informer le public, les autorités locales et les décideurs sur la qualité de l'air. Cependant, ce réseau de surveillance reste encore insuffisant, il doit couvrir l'ensemble du territoire national.

Le Maroc a réalisé son dernier inventaire de GES en 2014 couvrant la période 2005-2012 et complète ainsi les données antérieures remontant à 1994 (Fig.7). Le CO₂ représente un taux de participation aux

GES de 66% en 2012, avec une évolution qui a progressivement augmenté depuis 1994 pour arriver à des valeurs dépassant les 100 000 Gg.E.CO₂ (1Gg = 10⁹g) en 2012 [14]. Malgré la progression des émissions des GES, le rapport 2015 du ministère de

l'Environnement a rapporté que le Maroc émettait un taux de 1,84 T.E.CO₂ en 1994 et 3,1 T.E.CO₂ par habitant en 2012 qui reste faible comparé à ceux de la France (6,1 T.E.CO₂/Hab) ou les Etats Unis (18,5 T.E.CO₂/Hab) en 2012 [14].

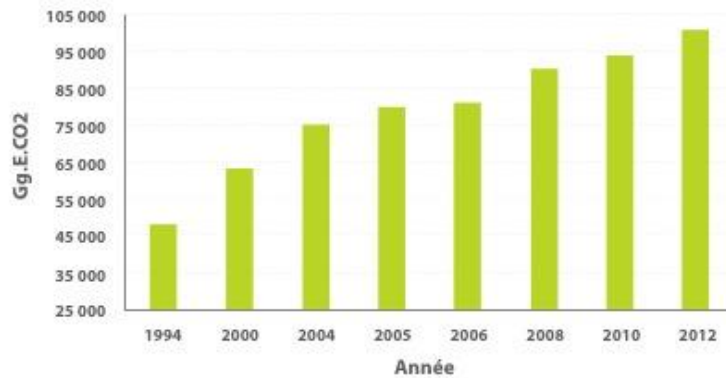


Figure 7 : Évolution des émissions globales de GES au Maroc pour la période 1994 – 2012 [14].

Les secteurs des industries énergétiques (raffineries, centrales thermiques) arrivent en tête, avec 40,6% d'émissions de GES, suivi par le secteur des transports avec une contribution de 28,3% les émissions restantes ont été attribuées aux industries manufacturières et construction (14,1%), au résidentiel (11,1%), au secteur agricole (5,2%) et au secteur commercial et institutionnel (0,7%) [14].

GES en 2030 de 32 % par rapport aux émissions projetées pour la même année selon le scénario « Cours Normal des Affaires : CNA » qui correspond à une réduction de 13 % des émissions de GES en 2030 par rapport aux émissions projetées à la même année [14] (Fig.8), ce qui correspond à une réduction cumulée de 401 Mt éq-CO₂ sur la période 2020-2030. Cet engagement est conditionné par une aide financière de 45 Milliards de Dollars dont 35 Milliards provenant des fonds verts pour le climat.

En matière d'atténuation, le Maroc a pris son engagement en matière de réduction des

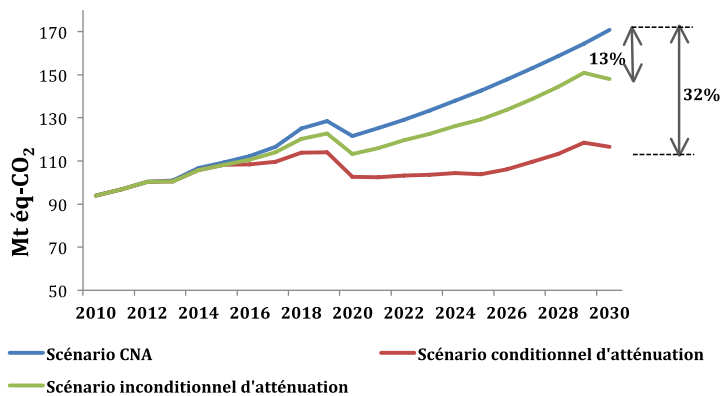


Figure 8 : Le scénario Cours Normale des Affaires (CNA) et les scénarios d'atténuation [14]

Anomalies de température

Les scientifiques ont défini des scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300. Ils sont intitulés Profils Représentatifs d'évolution des concentrations des GES « Radiative Concentration Pathways (RCP) » sélectionnés par les scientifiques sur la base de 300 scénarios publiés dans la littérature. Les RCP sont traduits en forçage radiatif correspondant à la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la terre, ils sont exprimés en puissance par unité de surface (w/m^2). Ce forçage radiatif est calculé au sommet de la troposphère (entre 10 et 16 km d'altitude). Les climatologues produisent

des projections climatiques utilisant les RCP comme entrée, tandis que les socio-économistes élaborent des scénarios socio-économiques débouchant sur des scénarios d'émissions, à comparer aux RCP.

Les RCP sont associés à des trajectoires d'évolution des concentrations des différents gaz à effet de serre et d'occupation des sols, ils ont été décrits dans le tableau I [15].

Le RCP 2,6 correspond le mieux à l'objectif de 2°C de la CCNUC, qui est atteignable selon GIEC, sous divers scénarios d'atténuation exigeants, requérant une baisse drastique des émissions de GES (de 40 à 70% par rapport à 2010) pour atteindre quasiment zéros émissions de GES d'origine anthropique à la fin du siècle.

Tableau I : Les quatre profils représentatifs de l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre (RCP) [15].

Nom	Forçage radiatif	Concentration (ppm)	Trajectoire
RCP 8,5	> 8,5 w/m^2 en 2100	> 1370 eq-CO ₂ en 2100	Croissante
RCP 6,0	Sens 6 w/m^2 au niveau stabilisation après 2100	Sens 850 eq-CO ₂ au niveau stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4,5	Sens 4,5 w/m^2 au niveau stabilisation après 2100	Sens 660 eq-CO ₂ au niveau stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2,6	Pic à sens 3 w/m^2 Avant 2100 puis déclin	Pic sens 490 eq-CO ₂ Avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Les variations observées et projetées de la température moyenne mondiale annuelle, par rapport à la période 1986-2005

correspondant aux scénarios RCP 2,6 et RCP 8,5 sont rapportées dans la figure 9 [13].

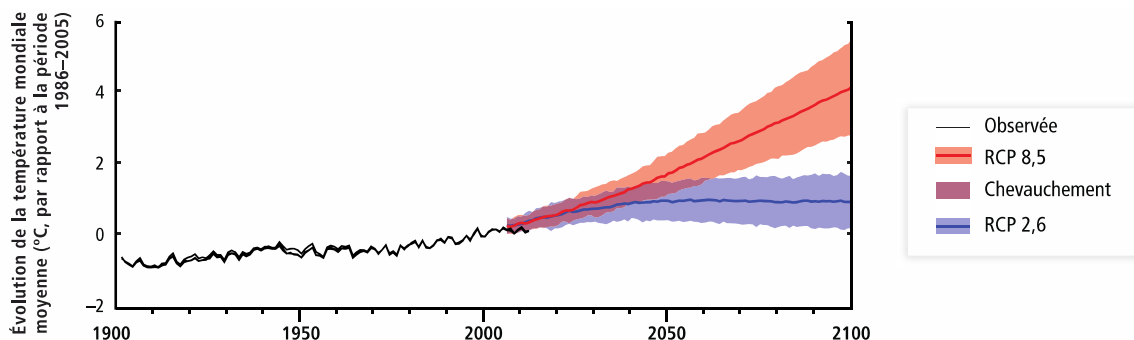


Figure 9 : Variations observées et projetées de la moyenne annuelle de la température à la surface du globe [13].

Le réchauffement observé entre les périodes 1850-1900 et 1986-2005 est de 0,61 °C (intervalle de confiance à 5-95 % : 0,55 à

0,67 °C). Les traits noirs indiquent les estimations de température tirées de trois jeux de données. Les courbes bleues et

rouges et les parties ombrées des mêmes couleurs représentent la moyenne de l'ensemble et la fourchette de variation correspondant à $\pm 1,64$ fois la valeur de l'écart-type ; elles sont fondées sur les simulations CMIP5 (Projet de comparaison de modèles couplés) réalisées à partir de 32 modèles pour le scénario RCP 2,6 et de 39 modèles pour le scénario RCP 8,5.

Par rapport à la période de référence 1850-1900, la variation de la température à la surface de la terre à la fin du XXI^e siècle (2081-2100) dépassera probablement 1,5 °C pour les RCP 4,5 ; 6,0 et 8,5 (degré de confiance élevé). Le réchauffement au delà de 2°C est probable pour les RCP 6,0 et 8,5 (degré de confiance élevé) [13].

Tous ces scénarios sont basés sur des modèles régis par des équations complexes issues de la mécanique des fluides et résolues de manière approchée par l'utilisation des modèles numériques. Selon Le Treut (2012) [16], le développement des modèles répond à un besoin social important, car ils constituent souvent les seuls outils qui peuvent éclairer des

décisions politiques concernant l'environnement global de notre planète.

Mais la grande difficulté pour ces modèles vient de la circulation atmosphérique qui n'est pas prévisible de manière déterministe au delà de quelques jours, parce que la croissance des petites échelles vient contaminer l'ensemble de la circulation. En outre, La résolution spatiale de ces modèles progresse horizontalement avec un nombre de mailles plus grand. Selon Planton (2011) [17], les modèles globaux, qui ont classiquement une résolution de 100 à 300 km ne permettent pas d'obtenir des projections détaillées, permettant d'anticiper localement des impacts ou de définir des politiques d'atténuation. Cette nécessité de descente d'échelle se traduit par le développement d'un nombre croissant de modèles régionaux, qui affichent une résolution de 10 à 50 km et prennent en compte toujours plus finement la topographie [17]. Ces modèles sont eux-mêmes relayés par des modèles d'impact ou d'adaptation locaux, d'une résolution de l'ordre du kilomètre (Fig. 10).

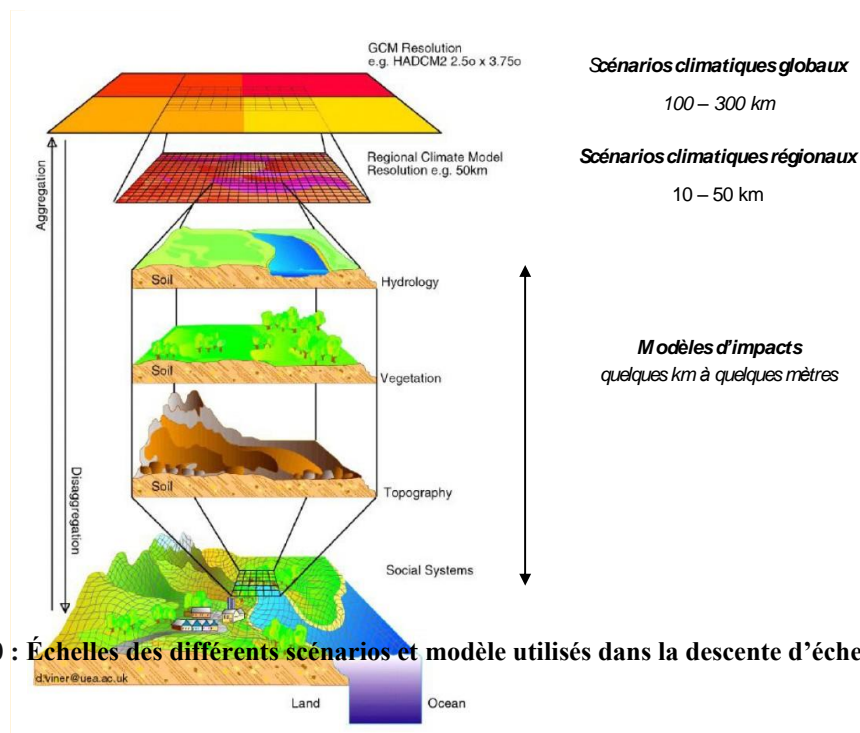


Figure 10 : Échelles des différents scénarios et modèle utilisés dans la descente d'échelle [17].

En France, les climatologues ont proposés un site web : <http://www.drias-climat.fr> dont l'objectif est de mettre à la disposition des différents utilisateurs des projections climatiques régionales et réalisées dans différents laboratoires français de modélisation du climat : IPSL, CERFACS, CNRM-GAME. Les informations ciblées sont délivrées sous différentes formes graphiques ou numériques.

Concernant l'évolution des températures au Maroc [18], la valeur moyenne annuelle a montré une augmentation significative de l'ordre de 0,16 °C par décennie et les totaux annuels de jours frais ont connu une diminution significative. Les événements extrêmes de vagues de froid et de chaleur montrent aussi des évolutions vers la baisse et significatives pour les premières et vers la hausse mais non significatives pour les secondes. La température annuelle moyenne et la température maximale étaient de 0,7 °C et 0,8 °C supérieure à la normale, respectivement pour la période de base de 1981 à 2010 [19]. La température absolue la plus faible de la région, -6 °C, a été signalée à Ifrane en Février. Juin a été le

mois le plus chaud de l'année, avec une température élevée record de 46 °C atteint à Smara et 45 °C à Oujda (la plus élevée depuis 1919). A Tanger, la température a atteint 36 °C le 22 octobre ; 14,8 °C à la normale, est la plus élevée depuis 1930 (Kabidi et al., 2014) [19]. Par ailleurs, la température moyenne pourrait augmenter de 1,1 à 1,6 °C d'ici à 2030, de 2,3 à 2,9 °C en 2050, et de 3,2 à 4,1 °C en 2080[20].

Le rapport de la troisième Communication Nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques [21] a donné les projections climatiques sur les précipitations annuelles et les températures moyennes annuelles pour les deux scénarios optimistes et pessimistes du GIEC. Ainsi, pour le scénario RCP 2,6 (Tab II), on note une tendance à la diminution des cumuls annuels de précipitations pour toutes les périodes pouvant atteindre 30% vers 2100, particulièrement dans les régions sahariennes du sud du Maroc. Quand aux températures moyennes annuelles, les valeurs auront tendance à augmenter de 1,5 °C vers 2100 sur l'ensemble des régions.

Tableau II : Scénario d'émission RCP 2,6 (Scénario optimiste) [21]

Période	Région du Maroc	Tendances des variations des cumuls annuels des précipitations	Région du Maroc	Tendances des variations des températures moyennes annuelles
2016-2035	Ensemble du pays Excepté la moitié sud des régions sahariennes et Oasis du sud	-10% à -20% 0% à +10%	Ensemble du pays Excepté quart sud ouest (région Figuig, Ouarzazate et Tata).	+0.5°C à +1.0°C +1.0°C à +1.5°C
2046-2065	Nord de la chaîne de l'Atlas	-10% à -20%	Ensemble du pays Excepté le littoral des provinces sahariennes	+1.0°C à +1.5°C +0.5°C à +1.0°C
2081-2100	Nord de la chaîne du Haut et l'Anti-Atlas Régions sahariennes	-10% à -20% -20% à -30%	Ensemble du pays	+1.0°C à +1.5°C

Pour le scénario pessimiste (RCP 8,5), la tendance à la diminution des cumuls annuels de précipitations pouvant atteindre 40% vers 2100, particulièrement dans les régions sahariennes du sud du Maroc. Quand aux températures moyennes annuelles, les valeurs auront tendance à augmenter de 1,5 vers 2100 sur les régions

de l'ouest des chaînes de l'Atlas et du Rif (plaines du Saiss, du Loukkos, du Gharb et de la Chaouia) (Tab III). Quant aux températures moyennes annuelles, la tendance est à la hausse avec un maximum de 5 à 7 °C dans les régions du sud est de la chaîne de l'Atlas.

Tableau III : Scénario d'émission RCP 8,5 (Scénario pessimiste) [21]

Période	Région du Maroc	Tendances des variations des cumuls annuels des précipitations	Région du Maroc	Tendances des variations des températures moyennes annuelles
2016-2035	Ensemble du pays	0 % à -10%	Ensemble du pays	+0.5°C à +1.0°C
	Excepté l'extrême sud des régions sahariennes	0% à +10%	Excepté quart sud ouest (région Figuig, Ouarzazate et Tata).	+1.0°C à +1.5°C
2046-2065	Nord de la chaîne de l'Atlas	-10% à -20%	Ensemble du pays Excepté le littoral des provinces sahariennes	+1.5°C à +2.0°C +1.0°C à +1.5°C
	Régions Nord des provinces sahariennes	0% à -10%		
	les régions du Sud	0% à +10%		
2081-2100	Ouest des chaînes de l'Atlas et du Rif	-40%	Régions du Sud-Est de l'Atlas	5 à 7°C
	Est de la chaîne de l'Atlas et les régions méditerranéennes	20 à 30%	Régions méditerranéennes, atlantiques et centre du pays	4 à 5°C
			Régions des provinces sahariennes	3 à 4 °C

Changements climatiques et ressources en eau

L'eau offre une gamme très diversifiée de services précieux de l'écosystème : alimentation en eau potable, dilution des rejets domestiques et industriels, irrigation des cultures et production hydroélectrique. Toute modification de la quantité et de la qualité de l'eau affectera la capacité des systèmes naturels à fournir ces services.

En 2025, les estimations montrent que près de 5 milliards de personnes vivront dans des pays en proie à un stress hydrique (en

utilisant plus de 20% de leurs ressources disponibles) [22].

Les sources d'eau douce renouvelable les plus importantes sont les forêts et les écosystèmes montagneux, qui approvisionnent en eau les deux tiers de la population mondiale [23] et qui sont les plus touchés par les changements climatiques. En effet, certaines régions montagneuses pratiquent même la moisson de l'eau qui est une technique née il y a une vingtaine d'années au Chili, dans la cordillère des Andes. Elle a été mise au point par une organisation non gouvernementale : Fog

Quest. Au Maroc, à 1225 m d'altitude, au sommet de la Montagne Boutmezguida qui surplombe cinq villages de la région de Sidi Ifni à climat semi-aride, une quarantaine d'immenses filets piègent des gouttelettes d'eau du brouillard qui sont ensuite traitées, mélangées à de l'eau de forage puis transportées via des canalisations aux villageois [24].

Le rapport du GIEC 2014 [13] a répertorié l'ensemble des risques qu'exerce les changements climatiques sur les ressources en eau douce au cours du XXI^e siècle : (i) au fur et à mesure que la température globale augmentera le pourcentage de la population qui subira les pénuries hydriques et celle qui sera soumise aux inondations augmenteront également, (ii) au niveau de la plupart des régions subtropicales arides, les prévisions rapportent que le changement climatique conduira à une diminution des ressources en eau souterraines et superficielles, ce qui va exacerber la compétition entre les différentes utilisations (agricole, domestique, touristique et industrielle) et (iii) selon les scénarios RCP 4,5, 6,0 et 8,5, les changements climatiques provoqueront un changement brutal et irréversible de la composition, la structure et les fonctions des écosystèmes d'eau douce à l'échelle régionale.

L'analyse de l'état des lieux de la situation hydrologique au Maroc montre que sur les 45 dernières années il y avait un déclin des précipitations avoisinant -25% pour les précipitations cumulées de la saison pluvieuse, alors que les précipitations printanières montrent des tendances à la baisse de l'ordre de -47 % à l'échelle nationale [18]. En outre, le rapport de l'environnement du Maroc en 2015 [14] rapporte que plusieurs séquences de sécheresses ont touché une partie ou l'ensemble du Maroc ces dernières décennies. Parmi les plus récentes, les plus sévères ont concerné les périodes 1991-1995, 1998-2001 et 2006-2007. Des études hydrologiques ont montré également que la fréquence des sécheresses qui était de 1

année sur 5 avant les années 1990 est devenue 1 année sur 2 à partir de cette date.

A ce constat alarmant de la situation hydrologique temporelle globale du Maroc, s'ajoutera une variabilité spatiale qui touche les populations les plus défavorisées du Royaume. En effet, la répartition de la pluviométrie moyenne du Maroc [25], montre une mosaïque de distribution géographique, témoignant d'une variabilité spatiale et une dominance de bioclimats aride et semi-aride. Ces régions sont caractérisées par une évapotranspiration qui dépasse les précipitations pendant la plus grande partie de l'année. Par conséquent, l'agriculture reste dépendante de l'irrigation pour atteindre des rendements satisfaisants et les cultures pluviales n'offrent pas une alternative durable pour la survie des populations les plus démunies qui vivent dans ces territoires.

La situation hydrologique au Maroc pour les prochaines décennies est très préoccupante. En effet, le rapport national sur les ressources en eau (2004) [26] confirme que la croissance de la population va exacerber le déficit hydraulique dans tous les bassins hydrauliques du Maroc. Ainsi, à l'horizon 2020, trois bassins seront en dessous du seuil de pénurie hydrique (500 m³/hab/an) avec une population de 12 millions d'habitants et trois autres seront en dessous du seuil de stress hydrique (1000 m³/hab/an) pour 17 millions d'habitants. Selon les prévisions, les précipitations marocaines peuvent baisser au cours de la période de 2011-2050 depuis 5 % (régions montagneuses) à 20-30 % dans les régions du sud et les phénomènes hydrologiques extrêmes seront plus fréquents et plus intenses (sécheresses et inondations) [27]. La Direction de la Météorologie Nationale donne également un scénario très inquiétant pour 2070 – 2099 avec des réductions des précipitations pouvant atteindre 50 % par rapport à la base de la référence du climat (1961 – 2000).

Cette diminution aura des répercussions

directes sur le remplissage des barrages, la production hydroélectrique et l'agriculture dépendante de l'irrigation. Ainsi, une baisse des ressources en eau douce renouvelable pourrait atteindre 10-15 % à l'horizon 2020 [14].

Cette baisse des projections des précipitations se traduirait également par une baisse des dotations en eau en dessous du seuil de pénurie hydrique (500 m³/hab/an) en fonction des différents scénarios (scénario optimiste (RCP 2,6) et scénario pessimiste (RCP 8,5)) à l'horizon 2050 et 2080 [28] (Fig 11).

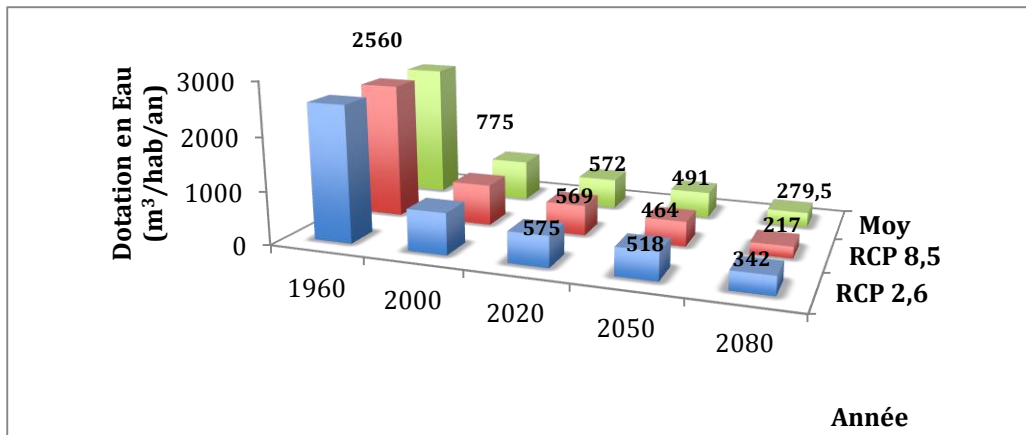


Figure 11 : Projection de la dotation en eau (en m³/hab/an) au Maroc en fonction des différents scénarios : Scénario optimiste (RCP 2,6), scénario pessimiste (RCP 8,5) et la moyenne des deux scénarios (Moy) [21]

Le rapport publié par les Nations Unies sur le Maroc en 2014 [27] rapporte un inventaire exhaustif des principaux risques et conséquences des impacts des changements climatiques sur la gestion des

ressources en eau à usage domestique, agricole, industriel et touristique et la conservation de la biodiversité des milieux aquatiques (Tab. IV).

Tableau IV : Risques et conséquences des impacts climatiques sur les secteurs liés à l'eau au Maroc [27]

Secteur	Risques	Conséquences
Services de l'eau (Eau potable et eaux usées)	Réduction de la disponibilité de l'eau, changement dans le mode de précipitations, hausse de la température de l'eau et salinisation des aquifères côtiers.	Pénurie croissante de l'eau, inondations croissantes des installations de l'eau, contamination croissante des eaux brutes et mise en place de systèmes avancés de traitement des eaux usées.
Agriculture	Réduction de la disponibilité de l'eau, augmentation des précipitations extrêmes courtes, hausse de la température de l'eau.	Augmentation des besoins en eau pour l'irrigation, baisse de la productivité agricole et conflits dans les processus d'allocation de l'eau.
Conservation de la nature et de la biodiversité	Réduction de la disponibilité de l'eau et hausse de la température.	Modification dans la distribution territoriale des espèces et pertes de biodiversité et des services des écosystèmes.
Energie	Changements dans les flux de surface et hausse de la température dans les réservoirs (et eutrophisation)	Réduction de la production de l'électricité et du potentiel hydroélectrique, dysfonctionnement des stations et conflits dans les processus d'allocation de l'eau.
Zones côtières	Augmentation du niveau de la mer, intrusion de l'eau saline	Erosion côtière croissante, changement dans la morphologie côtière et modification des écosystèmes marins et estuaires

Alternatives d'adaptation face aux changements climatiques

Pour faire face à cette situation de pénurie hydrique et de répartition inégale des ressources en eau dans l'espace et dans le temps au Maroc, nous pensons que les alternatives suivantes doivent être appuyées et développées au niveau de toutes les régions du Maroc :

- Transfert d'eau entre les bassins ;
- Irrigation localisée ;
- Dessalement des eaux saumâtres et des eaux de mer ;
- Recyclage des eaux usées traitées.

Ces alternatives s'inscrivent parfaitement dans la stratégie nationale de l'eau, le plan national de l'eau et les autres plans nationaux de préservation et de protection des ressources en eau.

1. Transfert des eaux entre les bassins

Au niveau mondial, la quantité d'eau retenue par les barrages a quadruplé depuis 1960, de sorte que les réservoirs artificiels contiennent aujourd'hui trois à six fois plus d'eau que les cours d'eau naturels [29]. Ces barrages assurent le stockage des apports des années humides pour les utiliser durant les périodes de sécheresse, mais des dizaines de millions de personnes ont été déplacées et davantage encore ont subi une perte des ressources dont dépend leur subsistance [30].

Grâce à la politique des barrages, le Maroc dispose de plus de 139 grands barrages assurant le stockage des apports des années humides, avec une capacité globale de plus de 17,6 milliards de m³. Cette capacité, des retenues de barrages, se trouve actuellement menacée par l'envasement qui engendrerait une perte de capacité de stockage de 75 Mm³/an [14]. Ce phénomène est lié à l'accentuation de l'érosion au niveau des bassins versants qui subissent des actions de surpâturage, de défrichage des forêts (sur la période 1973-1996, environ 6000 ha/ an

de forêts ont été perdu par défrichage), des parcours et des zones humides et les mauvaises pratiques culturales [14]. Pour lutter contre ces phénomènes, des actions antiérosives sont mises en place, mais les actions mises en œuvre concernent 13 000 ha/an, soit environ seulement 25 % seulement de l'objectif fixé initialement [14].

Un exemple de projets de transfert des eaux entre bassins hydrographiques en Espagne a été initiée depuis les années 70. Ainsi, l'ouvrage de transfert « Trasvase » entre les bassins de Tage et de la Segura a été inauguré en 1979. C'est un réseau de 230 km de canaux, aqueducs et tunnels, assurant un débit de 33 m³/s et permet l'irrigation de 135 000 hectares dans les Huertas de Murcie et de Lorca. En année 2000, l'Espagne s'est lancé dans un plan hydrologique national pour répartir l'eau sur l'ensemble du territoire et combler le déficit dans certains bassins. ce plan hydrologique repose sur le transvasement d'un milliard de m³ annuels de l'Ebre, qui traverse cinq régions du Nord, vers les zones déficitaires du littoral méditerranéen (Valence, Murcie, Almeria, l'Andalousie...) [31]. En 2004, l'Espagne a retiré ce Programme Hydrologique National de transfert des eaux en 2001 et il a été remplacé par un autre programme AGUA (Programa Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua) axé sur le dessalement de l'eau de mer et présenté comme une alternative au transfert des eaux de l'Èbre [32]. En outre, le transfert des eaux entre les bassins de Tage et de la Segura n'a pas eu un impact positif dans le bassin donneur (Tage), elle avait comme conséquence la détérioration de la qualité de l'eau [33].

En Tunisie, le transfert d'eau se fait sur un parcours de plus de 500 km du nord-ouest vers l'est du pays, grâce aux barrages interconnectés par des canaux de transfert. Ce qui a permis d'effectuer des régulations en fonction du stock disponible dans chaque

réservoir et de la salinité des eaux et répondre ainsi aux besoins d'irrigation et d'alimentation en eau potable [34].

Concernant le Maroc, le projet de transfert entre bassins nord et sud « autoroute de l'eau », permettra de transporter plus de 845 millions de m³ sur une longueur de 500 km et coûtera 30 milliards de DH. Le projet comportera des stations de pompage, des canaux, des conduites et des galeries [25]. Ce transfert assurera une interconnexion de l'eau sur tout le territoire et permettra de répondre aux besoins croissants de certaines régions en déficit hydrique à cause de l'irrigation, le tourisme et l'industrie.

Une recherche approfondie de la littérature scientifique réalisée par Zhou et Tol (2005) [32] a montré que peu de données ont été publiés sur les coûts de transport de l'eau. En outre, les renseignements des coûts sont détenus par les sociétés d'ingénierie et sont considérés comme commercialement sensibles. Uche et al. (2001) [33] ont signalé que les coûts de transport de l'eau dans le Plan hydrologique national de l'Espagne impliqueraient des canaux de 900 km et estiment que sur la base de données [1993] de Kally, le transport horizontal seul coûterait au moins 52 cents / m³. Selon Zhou et Tol (2005) [32] le transfert est relativement pas cher à l'horizontal, c'est le soulèvement de l'eau en hauteur qui coûte cher. En Espagne, le coût de transfert d'eau a été estimé entre 0,9 et 1,93 €/m³ correspondant à un coût supérieur aux technologies de dessalement des eaux saumâtres et marines [34].

L'irrigation localisée

Au Maroc, l'agriculture est le secteur d'activité qui consomme près de 90 % du total des ressources en eau mobilisées, avec un volume de 3 095 Mm³ sur les dix dernières années. Le potentiel irrigable a été estimé à 1,664 millions d'hectares [11]. En 2012, 1,46 millions d'hectares environ étaient en irrigation pérenne dont 682 600

ha en Grande Hydraulique, 334 100 ha en Petite et Moyenne Hydraulique et 441 450 ha en irrigation saisonnière privée [11].

Selon le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2014) [35], l'agriculture irriguée au Maroc, bien qu'elle n'occupe que 15 % des superficies cultivées, contribue à environ 45 % en moyenne de la valeur ajoutée agricole et intervient pour 75 % des exportations agricoles. En outre, elle contribue en moyenne à hauteur de 99% pour la production de sucre, 82% pour les cultures maraîchères, 100% pour les agrumes, 75% pour les fourrages et 75% pour le lait.

Actuellement le Maroc conduit une politique de modernisation de l'agriculture irriguée par le développement de l'irrigation localisée à grande échelle à travers le Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation (PNEEI). Ce programme consiste en une conversion massive de l'irrigation de surface et par aspersion à l'irrigation localisée, sur une superficie de près de 550.000 ha pendant une période de 10 ans ; soit un rythme d'équipement moyen de près de 55.000 ha/an. Les attentes du programme peuvent être résumées comme suit [36]:

- L'économie d'eau de 20 à 50 % par réduction des pertes d'eau évitables tant au niveau du réseau qu'au niveau de l'application de l'eau à la parcelle, permettant ainsi de réduire à terme les déficits enregistrés au niveau des périmètres de grande hydraulique de près de 700 Mm³/an et de réduire le déstockage des nappes de près de 740 Mm³/an ;
- L'augmentation de la productivité de l'eau de 10 à 100% selon les cultures ;
- L'augmentation de la valorisation de l'eau de près 114% pour atteindre au terme du programme environ 5,12 DH/m³ ;

- L'augmentation significative des revenus agricoles et de la production agricole nationale.

Selon la FAO (1990) [37], l'irrigation au goutte à goutte (micro-irrigation) consiste à

amener l'eau sous pression dans un système de canalisations, généralement en PVC ; cette eau est ensuite distribuée en gouttes au champ par un grand nombre de goutteurs répartis tout le long des rangées des plantations (Fig 12&13).



Figure 12 : schéma d'un système d'irrigation goutte à goutte au niveau d'une exploitation agricole de la plaine des Triffa (Berkane, Maroc oriental).

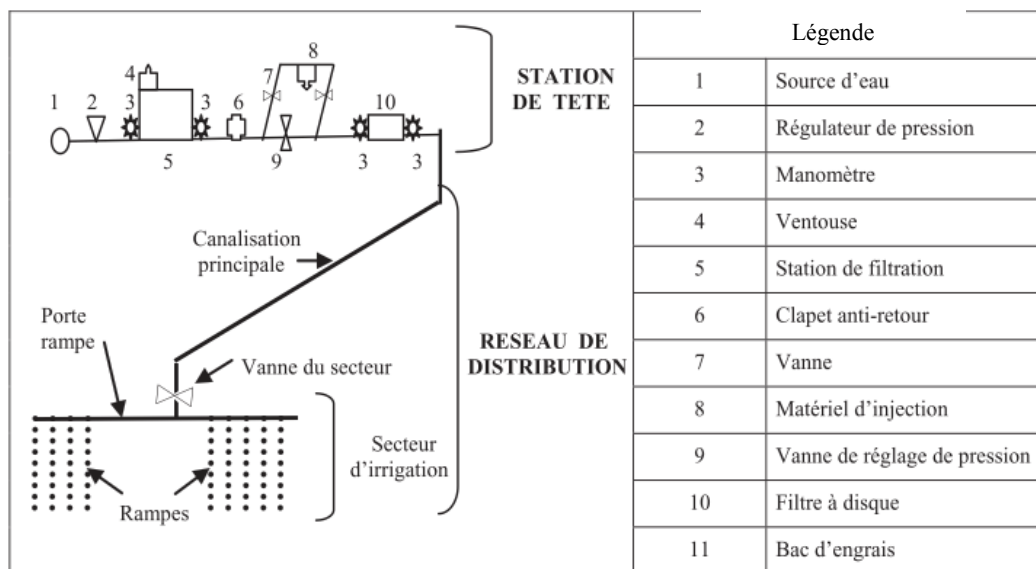


Figure 13 : schéma d'un réseau d'irrigation localisée [38].

La zone humidifiée (bulbe d'humectation) du sol est celle située au voisinage immédiat des racines des plantes avec une réduction des pertes par drainage et évaporation. Cette méthode d'irrigation a un haut degré d'efficacité de distribution d'eau et une économie d'eau de 50 à 70 % par rapport au gravitaire et 30 % par rapport à l'aspersion et offre une possibilité d'utilisation de la fertigation [38]. Ce qui conduit en final à une efficacité de l'utilisation de l'eau et des engrais et une réduction du transfert vertical

des intrants chimiques susceptibles d'induire une pollution des eaux souterraines. La micro-irrigation possède également d'autres avantages : exploitation plus facile, économie de temps et de main d'œuvre, lutte plus facile contre les mauvaises herbes et les ennemis des cultures et une meilleure utilisation des sols difficiles (sols lourds ou légers). Malheureusement les inconvénients n'en manquent pas : salinisation des sols, sensibilité à l'obstruction des conduites,

développement racinaire trop limité et absence de climatisation atmosphérique (humidité ambiante) [39].

Au Maroc, la mise en place d'un système d'irrigation goutte à goutte nécessite un investissement moyen par hectare de 67 000 DH dont 27 000 DH à la charge de l'agriculteur [40].

Par ailleurs, le pilotage de l'irrigation pourra renforcer l'efficacité de l'utilisation d'eau en irrigation. En effet, un des projets, le premier en son genre au Maroc sur le pilotage de l'irrigation a été mené par l'Association Agrotechnologie de Souss Massa en collaboration avec d'autres

départements étatiques [41]. Le projet consiste à installer un réseau de stations météorologiques au niveau des exploitations des agriculteurs de manière à couvrir les microclimats locaux de la région (Fig. 14) depuis Taroudant jusqu'à Biougra. Les données climatiques sont envoyées à un serveur central de l'Agrotech via le réseau GSM et GPRS. Ces données sont ensuite traitées et diffusées sur internet et sous forme de SMS quotidien pour les agriculteurs leur indiquant les besoins quotidiens en eau des cultures. Ce projet vise à couvrir une superficie dépassant les 55 000 ha entre agrumes et cultures maraîchères.

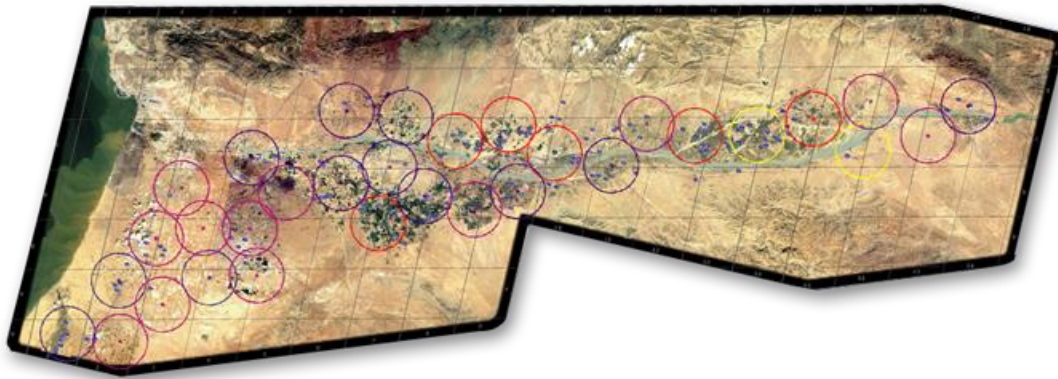


Figure 14 : Carte du réseau des stations météorologiques pour le pilotage de l'irrigation des agrumes au niveau de la région de Souss Massa. [41]

Selon Agrotech les impacts d'un tel projet sont perçus à différents niveaux [41] : (i) la maîtrise et la rationalisation de l'irrigation, (ii) l'économie de 2000 m³/ha/an pour la culture des agrumes ; soit 66 millions de m³ pour toute la superficie des agrumes existante au niveau de Souss Massa (l'équivalent d'un barrage de taille moyenne), (iii) l'économie d'environ 20% de l'énergie utilisée pour le pompage et (iv) l'économie et la rationalisation des apports de fertilisants.

Dessalement des eaux saumâtres et marines

Les techniques de dessalement sont souvent utilisées en dessalement des eaux

saumâtres, des eaux de mer et également pour le traitement des eaux usées domestiques et industrielles. L'objectif principal de cette technologie est l'élimination des sels et des substances organiques présentes dans les eaux ainsi qu'une partie des bactéries et des virus. La majeure partie des membranes d'osmose inverse est de type spiralé (Fig. 15) [42]. La membrane est constituée d'une superposition de plusieurs couches de polymères : on parle de membrane composite souvent constituée de polyamide. Les autres matériaux constituant le support n'interviennent pas dans le procédé.

Depuis 1990, la technologie de dessalement

par osmose inverse est désignée par l'Agence américaine de protection de l'environnement (US EPA) comme "meilleure technologie disponible" pour l'élimination (et / ou la réduction) de nombreux contaminants inorganiques

(l'antimoine, l'arsenic, le baryum, le fluorure, les nitrates, les nitrites, le bore, le sélénium, les radionucléides), les perturbateurs endocriniens (synthétiques et hormones naturelles), et plusieurs composés pharmaceutiques [43].

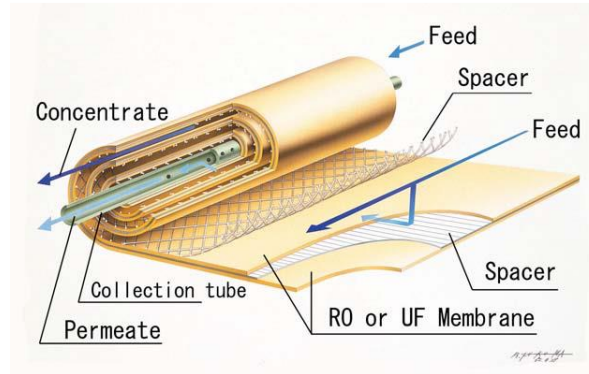


Figure 15 : Modules de membrane d'osmose inverse [43]

Le Maroc présente des aquifères côtiers touchés par l'intrusion marine, il s'agit principalement des nappes de Kert, Gareb, BouAreg, Oued Laou, Oued Amsa, Oued Martil, Oued Smir, Fnidek, Rmel de Larache, Souir-Drader, Gharb, Mâamora, Doukkala et Souss-Chtouka. En outre, certaines nappes comme celle des Triffa au niveau de la basse Moulouya présente des problèmes de salinisation. En effet, les trois quarts des puits fournissent une eau totalement impropre à l'irrigation. La simulation de l'évolution de la salinisation en fonction des taux de pompage et des périodes humides ou sèches avait conclu qu'en 2016, plus des quatre cinquièmes de la nappe montreraient un état critique de salinisation, phénomène néfaste à toute

activité agricole [11]. Tous ces réservoirs pourront être exploités par la technologie de dessalement susceptible de fournir une nouvelle ressource en eau à utiliser avec succès pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. En effet cette technique peut être utilisée avec succès pour les eaux saumâtres (Fig.16). Ce sont des eaux de très bonne qualité car filtrées naturellement par le sol. Elles sont caractérisées par un silt density index (indice mesurant la capacité d'encrassement de l'eau dans les systèmes d'osmose inverse) : $SDI_{15} < 3$ [44]. C'est la solution adoptée par le Maroc au niveau de Dakhla et Tan Tan pour les eaux de puits côtiers, avec des productions respectives de 7000 m³/j et 1700 m³/j [11].

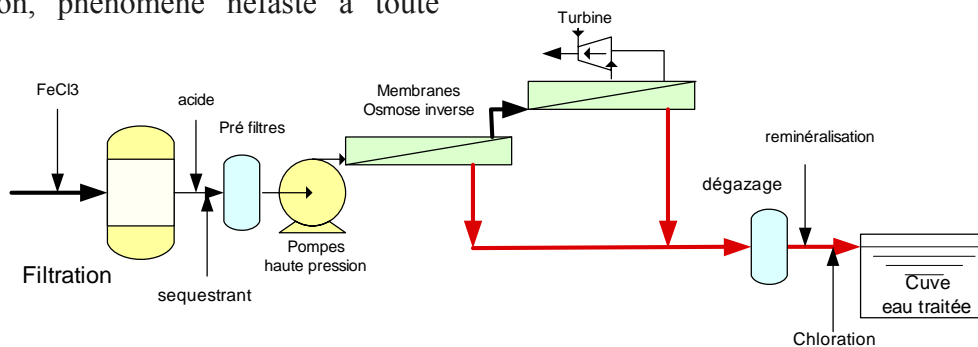


Figure 16 : Filière de traitement utilisée pour le dessalement des puits côtiers ($SDI < 3$) [44].

En Tunisie, 14 stations de dessalement des eaux saumâtres ont été mises en place dans les villes de Gabès, Jerba, Zarziz et Kerkenah. Ces stations fournissent un débit de 58 300 m³/j pour les différents usages : eau potable, eau agricole et eau industrielle [45].

Cependant, le dessalement des eaux saumâtres provenant des aquifères pourrait engendrer d'autres problèmes qu'il faut prendre en considération [46]: (i) l'augmentation du niveau de salinité des aquifères littoraux par intrusion marine suite aux pompages des eaux saumâtres destinées à l'alimentation des ces usines de dessalement et (ii) la gestion des saumures pour les usines de dessalement situées loin des côtes. Elles sont injectées dans des aquifères profonds ou déversées directement dans les bassins proches, induisant des impacts négatifs sur les écosystèmes.

La filière globale de traitement comporte les étapes suivantes [44] : (i) un prétraitement,

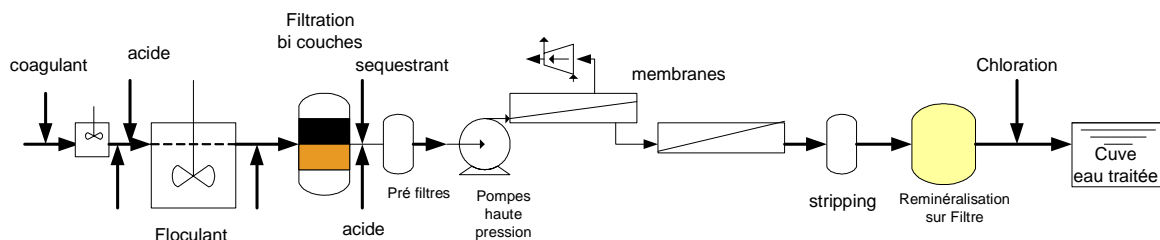


Figure 17 : Filière de dessalement d'eau de mer faiblement chargée [44].

Le prélèvement de l'eau brute à partir d'une prise souterraine à proximité de la mer assure une filtration naturelle, réduit la taille du prétraitement d'eau de mer brute et facilite le processus de dessalement.

Par ailleurs, le déversement des saumures issues des usines de dessalement des eaux de mer pourrait avoir des impacts sur la biodiversité du littoral. En effet, si la faune mobile ne semble pas être significativement

(ii) une pré-filtration sur cartouche à 5 µm pour piéger les matières particulaires, (iii) une étape de filtration membranaire à l'aide de membranes d'osmose inverse, (iv) une reminéralisation par ajout de carbonates sous formes de Na₂CO₃ ou CaCO₃ et (v) une désinfection au Chlore.

Les eaux de la mer méditerranée se caractérisent par une teneur en sel comprise entre 35 et 40 g/l, un SDI_{3 min} de 8–16, une teneur moyenne en bore de 5 mg/l et une température variable entre 12 et 30°C [44]. Ces eaux peuvent être traitées par une filière de dessalement comportant les étapes suivantes (Fig. 17) : (i) une coagulation–floculation, élimination du SDI par une injection de réactifs chimiques adaptés, (ii) une chloration choc pour éviter le développement des algues au sein des ouvrages, (iii) une filtration à vitesse moyenne pour piéger les substances colmatantes et (iv) une étape membranaire impliquant au moins deux étages afin d'éliminer le bore.

affectée, certaines prairies sont très sensibles à l'augmentation de la salinité [46].

Actuellement le Maroc possède une capacité de dessalement de l'eau de mer de l'ordre de 30880 m³/jour au niveau des villes de Laayoune, Boujdour, Akhfénir et dans certains villages de pêcheurs [21]. Ce ratio augmentera avec la réalisation de nouveaux projets de dessalement pour

l'approvisionnement d'Agadir, Laâyoune, Boujdour, Sidi Ifni et Tarfaya avec une production supplémentaire de 160 000 m³/jour [21].

L'un des défis du dessalement membranaire est le coût de la technologie qui est toujours plus élevée que les autres solutions de rechange pour la plupart des régions du monde [47]. La baisse des coûts et la production d'une eau de très bonne qualité sont parmi un certain nombre de raisons importantes pour lesquelles cette technologie continue d'être la technologie de choix dans les pays développés. Cette réduction des coûts est liée principalement à l'amélioration des méthodes de fabrication, l'évolution de l'environnement réglementaire, la demande accrue du marché et la concurrence pour les membranes et l'épuisement progressif des ressources en eau. Zhou et Tol (2005) [47] ont rapporté que les coûts unitaires moyens de dessalement par osmose inverse ont diminué, passant de 5,0 \$/ m³ en 1970 à moins de 1,0\$ / m³ en 2005. Les coûts unitaires de dessalement des eaux saumâtres ont été réduits à moins de 0,6\$ / m³.

Le recyclage des eaux usées traitées

Chaque année 330 km³ d'eaux usées municipales sont générées au niveau mondial. Ces eaux usées sont à la fois un atout et un problème dans un monde de plus en plus urbanisé [48], [49]. En effet, le rapport Millennium Ecosystem Assessment indique que le coût de la dégradation des services écosystémiques dans les eaux côtières est principalement associé à des impacts sur la santé humaine [50]. Par ailleurs, les eaux usées peuvent se transformer en une ressource économique capable de fournir de l'eau, des nutriments, de l'énergie et d'autres matériaux et des services de valeur et devenir une force motrice majeure pour améliorer la qualité de l'eau et stimuler la gestion efficace des eaux usées [51]. Théoriquement, les ressources incorporées dans ces eaux usées

peuvent irriguer des millions d'hectares de culture, produire du biogaz comme source d'énergie pour des millions de ménages [52]. En outre, les flux de cette ressource augmentent sans cesse et sont toujours disponibles indépendamment des aléas climatiques. Les actions favorisant la réutilisation des eaux usées sont partout, mais les cadres de la protection de la santé humaine et l'environnement font défaut dans la plupart des pays en développement [53].

Ces eaux usées peuvent être utilisées en irrigation dans les zones arides, comme l'Australie, l'Inde, le Pakistan, le Vietnam, la partie nord de la Chine, et les pays du Moyen-Orient [54]. Elles sont également de plus en plus une source d'eau d'irrigation importante aux Etats-Unis [55]. En terme de réutilisation des eaux usées en irrigation, les pays les mieux classés sont les États-Unis et l'Arabie Saoudite ; le Qatar et le Koweït sont les pays les plus remarquablement basés sur la réutilisation des eaux usées par habitant [56]. Aux États-Unis, la Floride et la Californie représentent la plus grande réutilisation des eaux usées, notamment en irrigation où elle a augmenté rapidement à partir de 44% en 2003 à 59% en 2009 en Floride [57]. En Australie il y a 580 usines municipales de traitement des eaux usées qui traitent 2 milliards de m³ d'eaux usées par an, et 21% des eaux usées traitées sont réutilisées dont 14% pour l'irrigation [58].

Le traitement des eaux usées pourra se faire par des méthodes « low cost » (bassins anaérobies, lagunes aérées, réacteur anaérobie à lit de boues à flux ascendant, bassins facultatifs, bassins de maturation) et des méthodes conventionnelles de traitement comportant un traitement préliminaire et des traitements primaire, secondaire et tertiaire (Fig. 18&19). Les niveaux de traitement des eaux usées dépendront des normes de rejet, du type de réutilisation. Les eaux usées qui passent toute la chaîne de traitement (du primaire au tertiaire) peuvent être réutilisées sans

restrictions majeurs, par contre, plus on descend dans le niveau de traitement, plus il

y a des contraintes pour une réutilisation optimale.

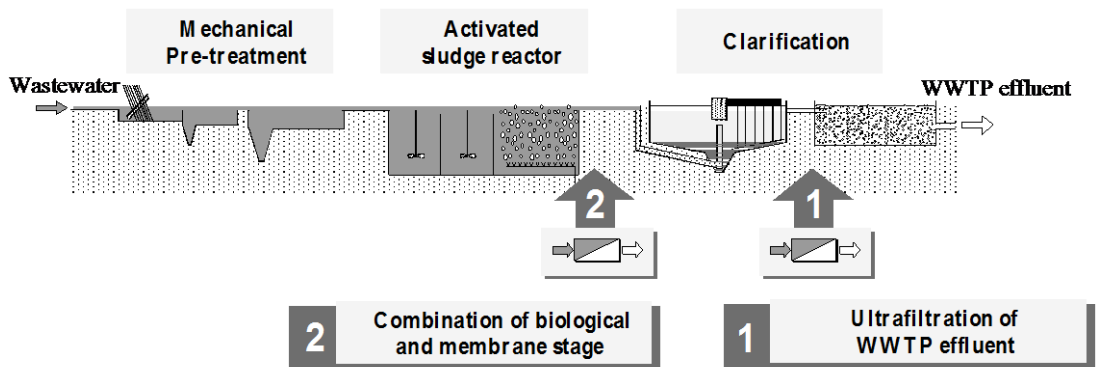


Figure 18 : Application de l'option membranaire au traitement des eaux usées urbaines [59]

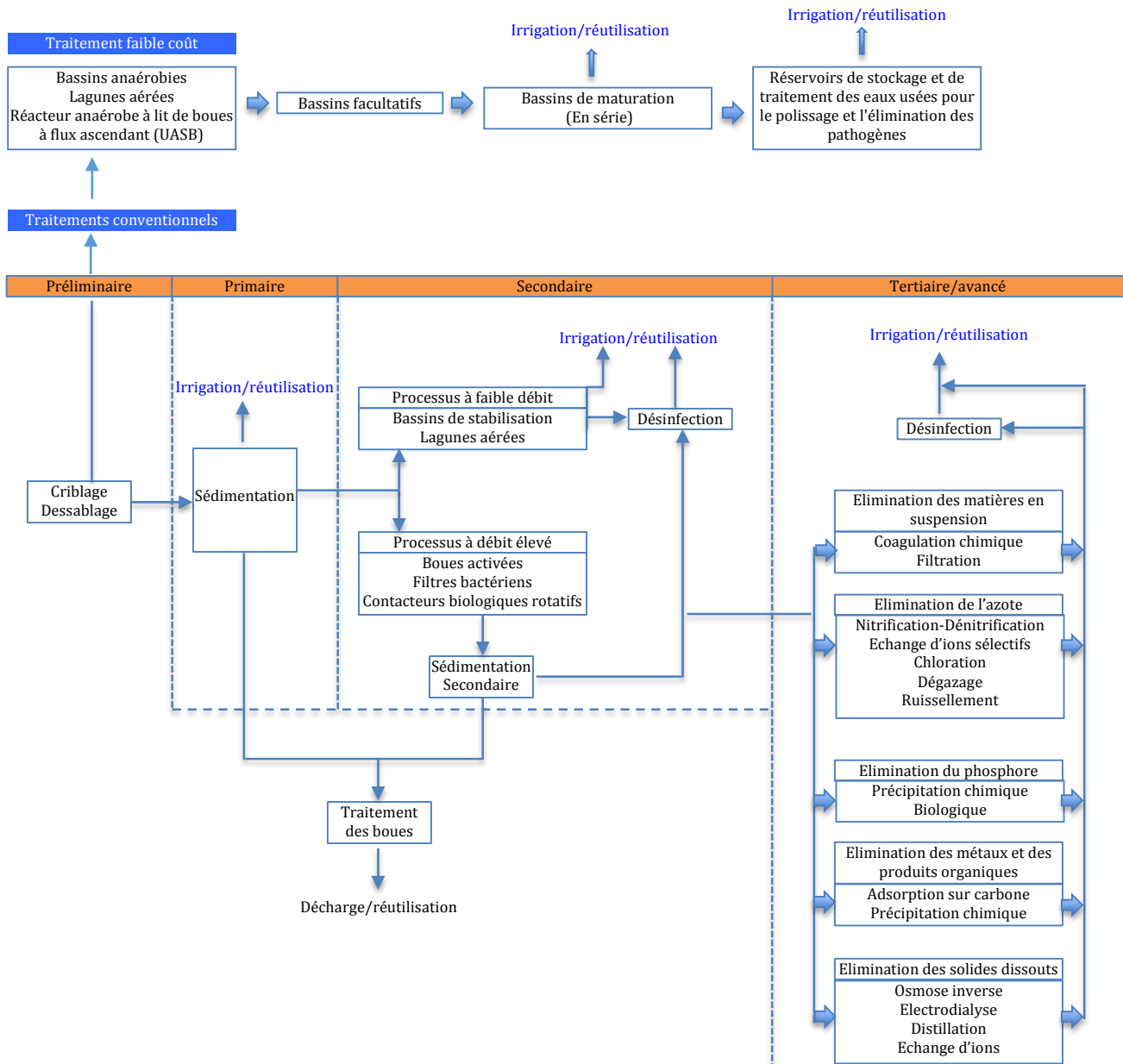


Figure 19 : Systèmes généralisés de traitement des eaux usées municipales et points de réutilisation [60].

Cependant, le coût de traitement de ces eaux usées restera un des obstacles majeurs à la généralisation des procédés poussés susceptibles de produire différentes qualités à différents usages. Pour répondre à ce souci, nous avons pris l'exemple du coût de traitement des eaux usées en Espagne, pays proche du Maroc sur le plan climatique et géographique. Ainsi, certains auteurs [61] ont rapportés des informations sur le coût de traitement de 22 stations d'épuration. Ils ont indiqué que le coût moyen de procédés avec élimination des nutriments est de 0,21€ /

m³, le coût peut être réduit à 0,18 € / m³ en cas de non élimination des nutriments. Cette différence est liée au coût des réactifs. D'autres auteurs [62] ont analysé les coûts de traitement secondaire et tertiaire des eaux usées selon les exigences réglementaires espagnoles (Tableau III). Les coûts sont très variables, liées à la taille de la station d'épuration, les conditions climatiques et géographiques et les caractéristiques des eaux usées brutes. Les coûts de fonctionnement varient entre 0,04 et 0,45 € / m³ jour.

Tableau III : coût d'investissements et de fonctionnement de certains procédés de traitement

Type de traitement	Coût investissement (€/m ³ /jour)	Coût de fonctionnement (€/m ³ /jour)
Traitement physico-chimique avec un système de décantation lamellaire, filtration avec filtres épais, ultrafiltration et désinfection	185-398	0,14-0,20
Traitement physico-chimique avec un système de décantation lamellaire, filtration avec filtres épais et désinfection	28-48	0,06-0,09
filtration et désinfection	9-22	0,04-0,07
Filtration avec filtres épais	5-11	0,04-0,07
Traitement physico-chimique avec un système de décantation lamellaire, filtration avec filtres épais, ultrafiltration, osmose inverse et élimination du chlore résiduel	416-736	0,35-0,45
Traitement physico-chimique avec un système de décantation lamellaire, double filtration avec filtres épais, électrodialyse et désinfection	310-506	0,35-0,45

En outre, Rodríguez-Garcia et al (2011) [63] ont évalué également les coûts opérationnels de traitement primaire, secondaire et tertiaire de six différents types de stations d'épuration, basés sur un échantillon de 24 stations d'épuration. Les coûts ont été calculés selon l'objectif de rejet en zone sensible ou non sensible ou de réutilisation des eaux usées traitées

(agriculture, industrie et recharge de la nappe). Ils ont démontré que lorsque l'objectif du traitement est la réduction de l'eutrophisation au niveau du milieu récepteur, il y avait moins de différence dans les coûts opérationnels entre les stations d'épuration plus avancés et les moins avancés. En outre, le système de traitement le plus économique est le

traitement qui cible l'élimination de la matière organique avec rejet dans des zones non sensibles (valeur estimée : 0,13 € / m³). Inversement, lorsque la réduction de l'eutrophisation a été choisie comme l'objectif de référence, le système de traitement qui atteint la qualité de l'effluent requis pour la recharge des aquifères était l'option la plus économique (0,31 € / kg PO₄ équivalent retiré). Rodríguez-Garcia et al (2011) [63] considèrent qu'une technologie de traitement des eaux usées est durable, lorsqu'il se conforme aux objectifs d'utilisation finale en termes de besoins environnementaux, sociaux et économiques.

Une étude a été menée en Espagne [64] et basé sur un modèle de gestion des coûts. Il a été conçu et adapté au procédé de traitement des eaux usées (14,6 Mm³/an) de la station d'épuration des eaux usées de Santa Cruz de Tenerife (Iles Canaries). Les coûts calculés sont de 0,17€/m³ pour les prétraitements et les traitements primaire et secondaire, et 0,18€/m³ pour le traitement tertiaire. Ce qui donne un coût global de régénération d'eau de 0,35€/m³ inférieur aux coûts globaux de production et traitement d'autres ressources en eau : eaux de surface (0,59€/m³), eaux souterraines (0,65€/m³), eaux issues de dessalement (0,73€/m³).

Concernant la réutilisation des eaux usées traitées, une des solutions développées au sud de la Californie est le recyclage d'eaux usées au niveau de la station de traitement Edward C. Little Recycling Facility qui permet de produire 240 000 m³ d'eau par jour, soit l'équivalent de la consommation de plus d'un million d'habitants pour différents usages : irrigation, arrosage public, eau de refroidissement et eau de process pour les usines pétrochimiques, eau destinée à d'autres usages industriels, eau réinjectée dans la nappe (153 puits d'injection) pour servir de « barrière hydraulique » à l'intrusion d'eaux salines, liée à la surexploitation de la nappe dans le

passé [65]. Une expérience similaire a été conduite en Tunisie entre 2009 et 2012 [66], elle consiste à utiliser les eaux usées traitées de la station d'épuration de Korba (boues activées faible charge et lagunes de finition) en bordure de méditerranée pour lutter contre l'intrusion du biseau salé et recharger la nappe côtière et permettre à des irrigants de récupérer l'eau infiltrée. Les résultats sont très satisfaisants : remontée des niveaux piézométriques, amélioration de la qualité physico-chimique des eaux et efficacité du dispositif pour contenir l'avancée du biseau salé.

La recharge des nappes présente de nombreux avantages par rapport aux autres modalités de stockage conventionnelles des eaux de surface (barrages) : évaporation négligeable, absence de développement algal, moins coûteuse. En outre, elle permet de former une barrière pour toute intrusion saline dans les zones côtières. Cependant, cette solution se heurte à certaines difficultés liées au risque de transfert de certains polluants produits par la station vers les eaux souterraines. En effet, certaines stations utilisent un produit de la chloration des eaux usées : N-nitrosodiméthylamine (NDMA). Ce produit hautement toxique a été détecté dans des puits d'approvisionnement en eau potable situés à proximité d'une station de traitement des eaux usées où les eaux traitées ont été injectées directement dans le sous sol pour recharger les eaux souterraines [67]. Pour remédier à cette situation, les scientifiques de l'United States Geological Survey (USGS) ont collaboré avec les districts sanitaires de comté de Los Angeles, en Californie, pour étudier le potentiel de la NDMA à se biodégrader dans les zones d'épandage Rio Hondo et évaluer le potentiel d'atténuation naturelle de la NDMA dans le sol avant d'atteindre les eaux souterraines.

Pour la réutilisation en irrigation, les eaux usées traitées constituent une source d'eau et de nutriments pour les plantes avec une

économie de l'utilisation des engrais chimiques et l'amélioration des rendements des cultures. Cependant, cette réutilisation nécessite un respect de normes dépendant du type d'espace irrigué et du type d'agriculture. Ainsi selon l'Agence de Protection de l'Environnement USA [68], l'irrigation des espaces publics (parcs, cours de golf, autres zones d'accès au public), des cultures vivrières qui ne seront pas traitées dans le commerce et des cultures consommées crues, nécessitent un traitement secondaire avec filtration et désinfection. Les eaux d'irrigation doivent impérativement répondre à la qualité suivante : pH entre 6 et 9, DBO5 < 10 mg/L, Turbidité < 2NTU, pas de coliformes fécaux détectables/100 mL et moins de 1 mg/L de chlore résiduel. En outre, l'handicap majeur restera l'impact sanitaire lié aux infestations par les helminthes, aux infections bactériennes, virales et aux protozoaires sur les consommateurs, les travailleurs agricoles et leurs familles et les communautés proches. Les virus entériques exigent une attention particulière car ils sont

excrétés dans les eaux usées en plus grand nombre par des individus infectés (jusqu'à 10^{12} virus par gramme de fèces) par rapport à d'autres agents pathogènes entériques [69], et ils sont généralement si hautement infectieux que moins de 10 particules est souvent suffisante pour provoquer une infection chez les personnes sensibles [70]. En outre, ces agents pathogènes sont capables de survivre suffisamment longtemps dans les eaux usées, sur les cultures irriguées et dans le sol, ce qui constitue un risque de transmission de maladies infectieuses.

La désinfection poussée (ozonation, irradiation UV) des eaux usées en phase finale de traitement assure une réutilisation en agriculture moins contraignante. Cependant, les virus entériques sont plus résistants que les bactéries pathogènes aux procédés de désinfection [71]. Dans ce cadre l'OMS [72] a mis en place des directives pour l'utilisation sans risque des eaux usées (Tab. IV).

Tableau IV: Objectifs liés à la santé pour l'utilisation des eaux usées en agriculture [72].

Scénario d'exposition	Objectif lié à la santé (DALY par personne et par an)	Log ₁₀ de la réduction nécessaire des agents pathogènes	Nombre d'œufs d'helminthes par litre
Irrigation sans restriction	<10 ^{-6a}		
Laitues		6	<1 ^{b,c}
Oignons		7	<1 ^{b,c}
Irrigation restreinte	<10 ^{-6a}		
Fortement mécanisé		3	<1 ^{b,c}
Forte intensité de main d'œuvre		4	<1 ^{b,c}
Irrigation localisée	<10 ^{-6a}		
Cultures de grande hauteur		2	Pas de recommandation ^d
Cultures de faible hauteur		4	<1 ^c

DALY : Disability-adjusted life years (années de vie ajustées sur l'incapacité)

^a Réduction des rotavirus. Dans le cas d'une irrigation sans restriction et localisée, l'objectif lié à la santé peut être atteint par une réduction des agents pathogènes de 6 à 7 unités logarithmiques (obtenue par une combinaison de traitements des eaux usées et d'autres mesures de protection sanitaire). Dans celui d'une irrigation restreinte, il est atteint par une réduction des agents pathogènes de 2 à 3 unités logarithmiques.

^b En cas d'exposition d'enfants de moins de 15 ans, il faut appliquer des mesures de protection sanitaire supplémentaires (traitement pour parvenir à "0,1 œuf par litre, port d'équipements de protection tels que gants et chaussures ou bottes, ou encore chimiothérapie).

^c Une moyenne arithmétique doit être déterminée sur l'ensemble de la saison d'irrigation. Une valeur moyenne de "1 œuf par litre doit être obtenue pour 90% au moins des échantillons de manière à permettre occasionnellement à certains échantillons d'atteindre des valeurs élevées (c'est-à-dire plus de 10 œufs par litre). Avec certains procédés de traitement de l'eau (par exemple les bassins de stabilisation), on peut utiliser le temps de séjour hydraulique comme variable de remplacement pour s'assurer de la conformité avec l'objectif de "1 œuf par litre.

^d Ne pas récolter les plantes au niveau du sol.

Au Maroc, le volume annuel des eaux usées au Maroc a presque triplé cours des trois dernières décennies. Il a augmenté de 48 Mm³ en 1960 à 500 Mm³ en 1999. Il est prévu que ce volume pourrait atteindre environ 900 Mm³ en 2020 [73]. Le taux d'épuration au Maroc a cependant connu une progression importante, en passant de 6% en 2005 à environ 34% en 2013. Le Maroc a pu traiter en 2011 un flux de 177 Mm³, soit 25,3 % de la production totale et uniquement 80 Mm³ sont réutilisées à différents usages : agriculture, espaces verts, recharges des eaux souterraines et industrie [74]. Les bassins hydrauliques Sebou, Tensift, Sous-Massa-Draa et Oum Er Rbiaa sont les principaux bassins producteurs des eaux usées épurées (75% du volume total) [14]. Le Maroc disposera ainsi dans les prochaines décennies d'un potentiel d'eaux usées traitées susceptible d'être intégré comme ressource en eau supplémentaire.

Par ailleurs, le faible niveau de réutilisation des eaux usées traitées en agriculture au Maroc peut être attribuée principalement à la difficulté d'établir un instrument institutionnel et juridique pour les règles de partage des coûts de traitement entre les communes et les usagers (agriculteurs) [75]. Cette difficulté a été surmontée en Espagne (Commune Benidorm) par le regroupement des agriculteurs dans une coopérative qui a décidé de prendre en charge le traitement tertiaire (membranaire : ultrafiltration et osmose inverse) des eaux usées traitées initialement par boues activées par la commune. En outre, un autre handicap lié principalement à la multitude des intervenants depuis le traitement jusqu'à la réutilisation par les irrigants, ce qui pose un problème de responsabilité de tout impact sanitaire sur le consommateur. En effet, au Maroc, ce sont en premier lieu des acteurs multiples (les régions autonomes de distribution d'eau, les offices nationaux de l'eau ou les communes) qui gèrent les stations d'épuration. Par la suite, ce sont les directions régionales d'agriculture qui

prennent le relais pour accompagner les agriculteurs lorsque l'eau traitée est destinée à l'irrigation et enfin ce sont les offices de sécurité sanitaire et alimentaire au niveau régional qui s'occupent de la surveillance des risques engendrées par la réutilisation des eaux usées en agriculture.

Une autre difficulté d'ordre psychologique liée à l'acceptation du public de tout projet de réutilisation : irrigation, loisirs, espaces verts et parcs. En effet, des études ont montré que la perception et l'acceptation du public sont reconnus comme deux des principaux obstacles pour la mise en œuvre réussie des projets de réutilisation des eaux usées [77] ; [76]). D'autres études notent le risque perçu, la confiance dans l'autorité de gestion de l'eau, la perception de l'équité et des avantages financiers, les informations concernant le processus de traitement, la réponse émotionnelle et affective de réutilisation des eaux usées comme des aspects de l'acceptation du public [78] et [79].

Conclusion

Les changements climatiques modifient la qualité et la quantité des services des écosystèmes (eau douce et nourriture) et fragilisent ainsi les individus, les communautés et les secteurs qui dépendent de ces services.

Au Maroc, l'eau est une composante principale pour le développement socio-économique, elle est associée à des secteurs clés comme l'agriculture, le tourisme et l'énergie. L'essentiel des précipitations est reçu entre les mois de septembre et mai et leur bonne distribution impacte directement les stades de développement des cultures (germination, croissance, maturité physiologique), le remplissage des barrages et la recharge des eaux souterraines. Tout dérèglement se traduit par une chute des rendements agricoles, particulièrement dans les régions arides et semi-arides du Royaume où la survie de la population, est basée sur l'irrigation, les cultures pluviales

et l'élevage.

Si on croit tous les rapports du GIEC et particulièrement les scénarios pessimistes, le Maroc est placé en zone rouge en matière de prévisions, en relation avec les changements climatiques. Il est dans une zone à risque de pénurie hydrique avec une baisse des précipitations (sécheresse) et des phénomènes hydrologiques extrêmes plus fréquents et plus intenses (inondations). Ainsi, une bonne gestion des ressources en eau au Maroc restera la seule alternative pour faire face aux changements climatiques afin de répondre aux défis de sécurité alimentaire, sanitaire, environnementale et énergétique.

En effet, le Maroc possède un fort potentiel de ressources en eau saumâtres (nappes phréatiques) facilement exploitables par procédé de dessalement moins cher et susceptible de fournir une ressource avec une qualité adaptée à l'irrigation et l'alimentation en eau potable. Par ailleurs, le recours à des technologies avancées de traitement des eaux usées (primaire, secondaire, tertiaire et désinfection par ultra violet ou ozonation) permettra de protéger le milieu récepteur et de recycler cette ressource en eau non conventionnelle sans contraintes pour l'irrigation des cultures. Les ressources en eau conventionnelles et celles issues des procédés de traitement des eaux usées et du dessalement doivent être utilisées avec efficacité en agriculture, par l'irrigation localisée et pilotée (cas de Sousse Massa Draa) ce qui permettra d'économiser plus d'eau à usage agricole (le plus grand consommateur d'eau au Maroc) et une meilleure protection des ressources en eau souterraines par optimisation de l'utilisation des intrants agrochimiques (engrais et pesticides).

En outre, le transfert de l'excédent d'eau d'un bassin avec une forte pluviométrie et de grands réservoirs, vers d'autres bassins déficitaires, trouve son justificatif dans la présence au niveau du bassin réceptif d'activités économiques génératrices de revenu (tourisme) ou de sols fertiles (agriculture irriguée très productive).

Remerciements : M. Vanclooster remercie le support du programme AGROPOLIS/KLIMOS de la DGD-Belgique pour contribuer à la rédaction de ce papier.

Références bibliographiques

- [1] Ramade. F (2000) Dictionnaire encyclopédique des pollutions. Les polluants : de l'environnement à l'homme. Ediscience International. 690p.
- [2] Arrhenius, S (1896) On the influence of carbonic Acid in the air upon the temperature of the ground. Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5, Volume 41, April 1896, pages 237-276.
- [3] Joos, F. and Spahni, R. (2008) Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years, P. Natl. Acad. Sci. USA, 105, 1425–1430, 2008.
- [4] Dlugokencky, E. and Tans, P. (2014) Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL), available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>, last access: 8 August 2014.
- [5] Bégorre. H et Jouzel. J (2015). Eau et Climat. Agir pour l'avenir. Partenariat Français pour l'Eau. 52p.
- [6] ONYM (Office National des Hydrocarbures et des Mines) (2015)
- [7] C. Le Quéré et al.: Global carbon budget 2014. Earth Syst. Sci. Data, 7, 47–85, 2015 www.earth-syst-sci-data.net/7/47/2015/ doi:10.5194/essd-7-47-2015 © Author(s) 2015. CC Attribution 3.0 License.
- [8] Masarie, K. A. and Tans, P. P. 1995 : Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into a globally consistent measurement record, J. Geophys. Res.-Atmos., 100, 11593–11610, 1995.
- [9] Keeling, C. D., Bacastow, R. B., Bainbridge, A. E., Ekdahl, C. A., Guenther, P. R., and Waterman, L. S.: Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii, Tellus, 28, 538–551, 1976.
- [10] GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat). 2014 b. changements climatiques 2014 b. L'atténuation du changement climatique. Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du groupe de travail iii au Cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. OMM, PNUE. 40p.
- [11] NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) National Climatic Data Center (2015). U.S. Climate Division Database.
- [12] Global Carbon Project (2015). <http://www.globalcarbonatlas.org>

- [13] GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat) 2014 a. changements climatiques 2014. Incidence, adaptation et vulnérabilité. Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du groupe de travail ii au Cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. omm, pnue. 32 p.
- [14] MEMEE (Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement du Maroc. (2015)- La contribution du Royaume du Maroc pour lutter contre le changement climatique en perspective du nouvel accord mondial sur le climat.
http://www.environnement.gov.ma/PDFs/INDC_DEPL_contribution.pdf
- [15] Moss et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.
- [16] Le Treut. H (2012). Evolution climatique : les modèles et leurs limites. Laboratoire de météorologie dynamique (LMD), CNRS/ENS/Ecole polytechnique/Université Pierre et Marie Curie. *Le Magazine de l'Académie des Sciences de Lorraine*. N° 3. Janvier. 2012. pp 4-12.
- [17] Planton. S (2011) synthèse du séminaire du 23 novembre 2011, paris. 10p.
- [18] Driouech. F & Kasmi.F (2008) Climate Change in the Maghreb : Threshold and Limits to adaptation. November 2008. Actes du workshop on climate change and adaptation in the maghreb. 71p.
- [19] K. Kabidi, A. Sayouri, and A. Ebrahim., 2015: North Africa [in "State of the Climate in 2014"]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96 (7), S184-S185.
- [20] Badraoui et Balaghi, 2012. Environnement et changement climatique au Maroc. Diagnostic et perspectives. Publié par Konrad Adenauer Stiftung. © 2012, Konrad-Adenauer-Stiftung e.V., Bureau au Maroc. 88p.
- [21] MEEEM (Ministère de l'Energie, des Mines de l'Eau et de l'Environnement, Maroc) (2016). Troisième Communication Nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. 285p.
- [22] Arnell N.W (1999) Climate change and global water resources. *Global Environmental Change* 9 (1999) S31-S49
- [23] Earthwatch Institute, World Resources Institute, WBCSD et World Conservation Union. 2006. *Business and Ecosystems: Issue Brief: Ecosystem Challenges and Business Implications*. Gland, Suisse : Earthwatch.
- [24] Agriculture du Maghreb (2015) La moisson de l'eau. N° 87 juillet-août 2015. Huffingtonpost.fr. p16.
- [25] El Ghomari. K (2015) Bilan de la politique de l'eau au Maroc. http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/07_-_el_ghomari_-politique_des_barrages_au_maroc.pdf.
- [26] Bzioui .M (2004) - Rapport national sur les ressources en eau. UN-Water-Africa. 94p.
- [27] Nations unies (2014). Commission économique des Nations Unies pour l'Europe en coopération avec la Commission économique des Nations Unies pour l'Afrique. Bureau pour l'Afrique du Nord. Examen des performances environnementales. Maroc. 284p.
- [28] MA (Évaluation des écosystèmes pour le millénaire). 2005a. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington DC: Island Press. Accessible en ligne à l'adresse suivante : <http://www.maweb.org>
- [29] World Commission on Dams. 2000. *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. Londres : Earthscan. Accessible en ligne à l'adresse suivante : <http://www.dams.org/report/contents.htm>
- [30] Nelly. J (2002). Alternatives économiques. N° 199. 01/2002.
- [31] François M., « Espagne. Menacée par la pénurie d'eau », *Grande Europe* n° 2, novembre 2008 – La Documentation française © DILA.
- [32] Cabo. F, Erdlenbruch.K et Tidball. M (2014) Dynamic management of water transfer between two interconnected river basins. *Resource and Energy Economics* 37 (2014) 17–38
- [33] Habaieb. H Frigui. H. L (2014) Evaluation des ressources en eau en Tunisie. *Revue Eau et climat au Maghreb*. N°2, 01/03/2014. Pp120-130.
- [34] Zhou, Y., and R. S. J. Tol (2005), Evaluating the costs of desalination and water transport, *Water Resour. Res.*, 41, W03003, doi:10.1029/2004WR003749.
- [35] Aspe C. (2012) De l'eau agricole à l'eau environnementale. Résistance et adaptation aux nouveaux enjeux de partage de l'eau en Méditerranée. Edts. Quae. 375p.
- [36] Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (2014) <http://www.agriculture.gov.ma/pages/lirrigation-au-maroc>
- [37] Belghiti .M (2009). Le plan national d'économie d'eau en irrigation (pnee): une réponse au défi de la raréfaction des ressources en eau. *Revue HTE* N°143/144 - Sept./Déc. 2009.
- [38] FAO (Food and Alimentary Organisation) (1990). *GESTION DES EAUX EN IRRIGATION*. Manuel de formation n° 5. Méthodes d'irrigation. 65p.
- [39] Elattir. H (2005) Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA ; La conduite et le pilotage de l'irrigation goutte à goutte en maraîchage. N° 124. Janvier 2005.
- [40] Vermeiren L. et Jobling G.A (1983) L'irrigation localisée. Calcul, mise en place, exploitation, contrôle du fonctionnement. *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*. 217p.

- [41] Bekkar Y., Kuper M., Hammani A., Dionnet M., et Eliamani A. (2007) Reconversion vers des systèmes d'irrigation localisée au Maroc. Quels enseignements pour l'agriculture familiale. Revue HTE N° 137, pp 38-51. Juin 2007.
- [42] Association Agrotech (2011) - Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Expérience de l'association 'Agrotechnologies' dans le Renforcement de la Coopération et de la Solidarité dans le Domaine de Gestion et de Développement des Ressources Hydriques dans la Région de Souss Massa Draa au Maroc. http://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/world_water_council/documents_old/Prizes/Hassan_II/Candidates_2011/7.Souss-Massa_Draa_realisations.pdf
- [43] Nitto Denko Corporation (2004), Product Information [online] Available from <<http://www.nitto.co.jp>>
- [44] WRA (Water Reuse Association). 2012. Seawater desalination costs White paper. 19p.
- [45] Gaid. K et Treal.Y (2007) Le dessalement des eaux par osmose inverse : l'expérience de Véolia Water. Desalination 203 (2007) 1–14.
- [46] Moreno I. T. M. (2006) Le Plan Hydrologique National Espagnol : Etude des alternatives dans la Région de Murcie. Mémoire de Fin d'Etudes présenté par en vue de l'obtention du grade académique de Diplômé d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'Environnement. Université Libre de Bruxelles. Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire. 73p.
- [47] Zhou Y. et Tol R.S.J (2005) Evaluating the costs of desalination and water transport. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 41, W03003, doi:10.1029/2004WR003749, 2005
- [48] Drechsel, P., Qadir, M., and Wichelns, D. (2015a) (eds). Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World. Springer.
- [49] UNO-Water (2015). Wastewater Management: A UN- Water Analytical Brief. 54p.
- [50] MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC, p. 52-53.
- [51] UNEP (United Nations Environment Programme) (2015). Economic valuation of wastewater the cost of action and the cost of no action. ISBN: ISBN: 978-92-807-3474-4. 68p.
- [52] Mateo-Sagasta, J., Raschid-Sally, L. and Thebo, A. (2015). Global wastewater and sludge production, treatment and use. In Wastewater: Economic asset in an urbanizing world. Drechsel, P., Qadir, M. and Wichelns, D. (eds.), Springer.
- [53] Lu S., Zhang X., Bao H. et Skimore (2016). Review of social water cycle research in a changing environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews 63 (2016) 132–140.
- [54] Hanjra, M.A., Blackwell, J., Carr, G., Zhang, F., Jackson, T.M., 2012. Wastewater irrigation and environmental health: implications for water governance and public policy. Int. J. Hyg. Environ. Health 215, 255–269.
- [55] Marston, L., Konar, M., Cai, K., Try, T.J., 2015. Virtual groundwater transfers from overexploited aquifers in the United States. PNAS 112 (28), 8561–8566.
- [55] Jimenez, B., Asano, T., 2008. Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs. International Water Association, London, England.
- [56] Chen, Z., Ngo, H.H., Guo, W.S., 2013b. A critical review on the end uses of recycled water. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 43, 1446–1516.
- [57] United Nations Environment Programme, 2015. Good practices for regulating wastewater treatment: legislation, policies and standards. Available at: <http://unep.org/gpa/documents/publications/GoodPracticesforRegulatingWastewater.pdf> (2015–11-10).
- [58] Wintgens, T. ; Melin, T. ; Schäfer, A. I. ; Muston, M. ; Bixio, D. ; Thoeye, C. (2005) The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse, Desalination, 178, 1-11 doi:10.1016/j.desal.2004.12.014
- [59] UNEP et Global Environment Centre Foundation (2005) Water and wastewater reuse – An environmentally sound approach for sustainable urban water management. 48 p.
- [60] Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F. and Sala-Garrido, R. (2010). Economic feasibility study for wastewater treatment: A cost-benefit analysis. Science of the Total Environment, 408 (20), pp. 4396-4402.
- [61] Iglesias, R., Ortega, E., Batanero, G., Quintas, L. (2010). Water reuse in Spain: Data overview and costs estimation of suitable treatment trains, Desalination, 263 (1-3), 1-10.
- [62] Rodriguez-Garcia, G., Molinos-Senante, M., Hospido, A., Hernandez-Sancho, F., Moreira, M.T. and Feijoo, G. (2011). Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. Water Research, 45, pp. 5997-6010.
- [63] Ruiz-Rosa, I, Garcia-Rodriguez, F.J et Mendoza-Jimenez, J (2016) Development and application of a cost management model for wastewater treatment and reuse processes. Journal of Cleaner Production 113 (2016) 299e310
- [64] Suez Environnement Le "re-use" des eaux usées en Californie. Ref. 570FR.
- [65] Gaaloul, N, Laignel, B, Chebil, A, Dridi, L (2014) Evolution spatio-temporelle de la nappe côtière Korba-Mida (Cap-Bon Tunisie) et impact de sa recharge artificielle par les eaux usées traitées. (2014) Revue eau et climat au Maghreb. N°2, 01/03/2014. pp31-42
- [66] Bradley, P.M., Carr, S.A., Baird, R.B., and

- Chapelle, F.H., 2005, Biodegradation of N-nitrosodimethylamine in soil from a water reclamation facility: *Bioremediation Journal*, v. 9, no. 2, p. 115-120.
- [67] U.S. EPA. 2004. Guidelines for water reuse. EPA 645- R-04-108. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. Available on-line at www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs/625r04108/625r04108.pdf.
- [68] Kirby, A.E., Shi, J., Montes, J., Lichtenstein, M., Moe, C.L., 2014. Disease course and viral shedding in experimental Norwalk virus and Snow Mountain virus infection. *J. Med. Virol.* 86 (12), 2055–2064.
- [69] Thebault, A., Teunis, P.F., Le Pendu, J., Le Guyader, F.S., Denis, J.B., 2013. Infectivity of GI and GII noroviruses established from oyster related outbreaks. *Epidemics* 5 (2), 98–110.
- [70] WHO (World Health Organization). 2011. Guidelines for Drinking-water Quality. Available: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf
- [71] Organisation Mondiale de la Santé (2012) Directives pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Volume II : utilisation des eaux usées en agriculture. 26p. ISBN 978 92 4 254683.
- [72] JEMALI. A & KEFATI. A (2002). WASTEWATER REUSE IN MOROCCO. ministry of agriculture, rural development and waters and forests rural engineering administration development and irrigation management directorate.
- [73] Bourziza et Makhokh (2011). Rapport de pays sur la Consultation des experts sur la gestion des eaux usées – Maroc. Dubai, EAU, Mai 22-24.
- [74] Salama . Y, Chennaoui . M, Sylla . A, Mountadar. M, Rihani . M et Assobhei. O (2014) REVIEW OF WASTEWATER TREATMENT AND REUSE IN THE MOROCCO: ASPECTS AND PERSPECTIVES. *International Journal of Environment and Pollution Research* Vol.2,No.1, pp.9-25, March 2014.
- NOAA/ESRL (National Oceanic and Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory) Global Monitoring Division. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- OMM (Organisation Météorologique Mondiale), 2015. News N° 13
- [75] Hurlimann, A., Dolnicar, S., 2010. When public opposition defeats alternative water projects - The case of Toowoomba Australia. *Water Res.* 2010, 44(1), 287-297. doi: 10.1016/j.watres.2009.09.020
- [76] Marks, J.S., 2006. Taking the public seriously: the case of potable and non potable reuse. *Desalination* 2006, 187(1-3), 137-147. doi: 10.1016/j.desal.2005.04.074
- [77] Dolnicar, S., Hurlimann, A., Nghiem, L.D. The effect of information on public acceptance – The case of water from alternative sources. *J. Environ. Manage.* 2010, 91(6), 1288-1293.
- [78] Hurlimann, A., Hemphill, E., McKay, J., Geursen, G. Establishing components of community satisfaction with recycled water use through a structural equation model. *J. Environ. Manage.* 2008, 88(4), 1221-1232.