



UN DANGER CLAIR ET IMMEDIAT

Les défis du changement
climatique et de l'eau au Maghreb



unesco

Le Programme Hydrologique Intergouvernemental (PHI) de l'UNESCO, fondé en 1975, est le seul programme de coopération intergouvernementale du système des Nations Unies consacré à la recherche et à la gestion de l'eau, ainsi qu'à l'éducation et au développement des capacités dans ce domaine. La présente publication de l'UNESCO rentre dans le cadre des actions menées par le PHI pour soutenir les efforts déployés par ses pays membres en matière de développement de solutions innovantes d'adaptation et d'atténuation visant à réduire les effets du changement climatique sur les ressources en eau.

L'objectif recherché par l'UNESCO à travers cette publication est de doter les gestionnaires et spécialistes de l'eau d'une approche scientifique leur permettant de mieux cerner les impacts observés et projetés du changement climatique sur les ressources en eau et de les intégrer dans l'élaboration et la mise en œuvre des programmes nationaux de gestion de l'eau. La mise en application de cette approche aura un impact certain sur l'amélioration de la résilience du secteur de l'eau face aux effets du changement climatique.

Danger réel et futur, le changement climatique affecte l'état quantitatif et qualitatif des ressources en eau en modifiant les cycles et les systèmes hydrologiques qui, à leur tour, affectent principalement l'intensité et la fréquence des inondations et des sécheresses dont les effets néfastes se font de plus en plus sentir sur les populations, les biens et services socio-économiques et environnementaux qui en dépendent de façon directe ou indirecte.

Les principes et concepts de l'approche développée sont élucidés à travers le cas spécifique du Maghreb, caractérisé par la rareté de ses ressources en eau, leur mauvaise répartition spatio-temporelle et leur vulnérabilité de plus en plus accrue au changement climatique. Ladite approche reste applicable à tout bassin versant, considéré conventionnellement comme l'unité spatiale idéale pour la gestion intégrée des ressources en eau.



*« Les guerres prenant naissance dans l'esprit des hommes,
c'est dans l'esprit des hommes que doivent être élevées les
défenses de la paix »*

UN DANGER CLAIR ET IMMEDIAT

Les défis du changement
climatique et de l'eau au Maghreb

Publié en 2023 par le Bureau de l'UNESCO pour le Maghreb

Avenue Aïn Khalouiya, km 5,3

BP 1777 Rabat, Maroc

© UNESCO 2023

Œuvre publiée en libre accès sous la licence Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>). Les utilisateurs du contenu de la présente publication acceptent les termes d'utilisation de l'Archive ouverte de libre accès UNESCO (www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-fr).

Les désignations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Les idées et les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs ; elles ne reflètent pas nécessairement les points de vue de l'UNESCO et n'engagent en aucune façon l'Organisation.

UN DANGER CLAIR ET IMMEDIAT

Les défis du changement
climatique et de l'eau au Maghreb

Auteurs : Abdelkader LARABI, Fatima DRIOUECH, Mohamed ALAOUI

Préface

Le changement climatique est une menace réelle qui n'épargne aucune région du monde. De surcroît, c'est l'un des enjeux déterminants et vitaux de notre époque. L'année 2016 a marqué un tournant dans la prise au sérieux de cette préoccupation planétaire à travers le lancement des Objectifs de Développement Durable (ODD) et l'entrée en vigueur de l'Accord de Paris sur le climat. Malgré cela, la situation du réchauffement climatique est tellement critique que la COP 26 a été qualifiée comme étant la COP de la "dernière chance" pour maîtriser ce fléau. Mais eu égard aux tendances haussières des températures et des émissions de gaz à effet de serre constatées actuellement, les conséquences néfastes du changement climatique sur l'homme et la nature ne feront que s'accroître. Les récentes prévisions du GIEC à ce sujet sont loin d'être rassurantes, et malheureusement, beaucoup de pays pauvres, pourtant très peu pollués, paieront un lourd tribut. Au vu de ce qui est observé actuellement, on constate avec amertume que maintenir le réchauffement climatique à 1,5°C semble être une utopie, et l'aide promise par les pays riches aux pays pauvres est en deçà de leurs aspirations.

A l'UNESCO, plus de 30 programmes dans le domaine des sciences, de l'éducation, de la culture et de la communication contribuent à l'apport de connaissances, à l'éducation et à la communication sur le changement climatique ainsi qu'à la compréhension des implications éthiques pour les générations présentes et futures. En 2017, la Conférence Générale de l'UNESCO a adopté une nouvelle Stratégie pour faire face au changement climatique. Elle vise à aider les États membres à s'adapter au changement climatique et à en atténuer les effets. Ladite stratégie est conçue autour de quatre piliers : l'éducation au changement climatique, la coopération scientifique, la culture et, l'inclusion sociale.

L'UNESCO, via son Programme Hydrologique Intergouvernemental (PHI) sur la sécurité de l'eau et sa stratégie liée au changement climatique, soutient les efforts déployés par les pays membres en matière de développement de solutions innovantes d'adaptation et d'atténuation visant à réduire les effets du changement climatique sur les ressources en eau. La réflexion objet de ce rapport rentre dans ce cadre et tente de cerner les aspects liés à l'impact du changement climatique sur les variables climatologiques et hydrologiques. Elle propose une approche scientifique permettant d'intégrer les outputs des modèles météorologiques et hydrologiques pour élaborer des informations de compréhension et d'aide à la décision destinées aux chercheurs et aux gestionnaires de l'eau. Ladite approche met un focus sur la région du Maghreb, connue par la fragilité et la rareté de ses ressources en eau, mais elle est transposable à n'importe quelle autre région du monde.

Le choix de la région du Maghreb n'est pas fortuit vu qu'elle est parmi les régions les plus dépourvues en eau et les plus impactées par le changement climatique. Les pays du Maghreb sont en effet caractérisés par une rareté structurelle de l'eau qui s'accroît d'année en année sous l'effet néfaste du changement climatique. Ce phénomène renforce en plus la fréquence et la sévérité des événements extrêmes : sécheresses et inondations. Ceci constitue une menace sociale, économique et environnementale de plus en plus grande qui devrait être prise au sérieux par les acteurs de l'eau, d'autant plus que le changement climatique est désormais un constat que de plus en plus de preuves scientifiques contribuent à étayer dans le monde entier.

L'humanité est interpellée plus que jamais à accorder une attention particulière aux manières de consommer et de gérer une ressource aussi vitale et stratégique que l'eau. La vulnérabilité des ressources en eau au changement climatique, à la pollution, au gaspillage et à la sous-valorisation économique exige des progrès accrus dans l'éducation, la sensibilisation et la formation afin de permettre aux sociétés du monde entier de mieux comprendre, d'atténuer et de s'adapter au changement climatique. Ce sont des objectifs amplement pris en compte dans les programmes et actions de l'UNESCO, notamment par le biais du PHI qui contribue aux efforts déployés par les pays membres dans l'adaptation aux effets du changement climatique sur les ressources hydriques et l'atténuation de son intensité.

Cette réflexion est un exemple typique d'actions de l'UNESCO orientées vers les acteurs directement impliqués dans la gestion de l'eau et la recherche scientifique y afférente. Elle les aidera à mieux modéliser l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et en tenir compte dans les scénarii de développement futur de ces ressources pour assurer durablement la sécurité hydrique et se prémunir contre les effets néfastes des sécheresses et inondations dont la fréquence et la sévérité montent crescendo sous l'effet du changement climatique. La science joue et continuera à jouer un rôle prépondérant dans l'apport de solutions innovantes pour juguler les effets de ce fléau sur les ressources hydriques.

Shamila Nair-Bedouelle

Sous-Directrice générale pour les sciences exactes et naturelles, UNESCO

TABLE DES MATIÈRES

01

Préface

06

02

Contexte

11

03

Introduction

14

Contexte international et régional

14

Pourquoi intégrer l'effet du changement climatique dans la gestion de l'eau au Maghreb

15

04

Définitions et terminologie

18

05

Changements climatiques observés et projetés au Maghreb et impacts sur les ressources en eau

22

Changements du climat observés et projetés

22

Evolutions et changements observés

22

Projections futures

25

Impacts sur les ressources en eau au Maghreb

27

Eaux de surface

29

Eaux souterraines

31

06

Evaluation de la vulnérabilité des ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant 36

Approche méthodologique 36

Construction de séries climatiques et évaluation des changements climatiques futurs à l'échelle d'un bassin versant 46

Evaluation des impacts futurs sur les ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant 48

Exemples d'études 48

07

Prise en compte du changement climatique dans la gestion et la planification 56

08

Suivi, évaluation et actualisation 66

09

Conclusion 69

10

Bibliographie 71



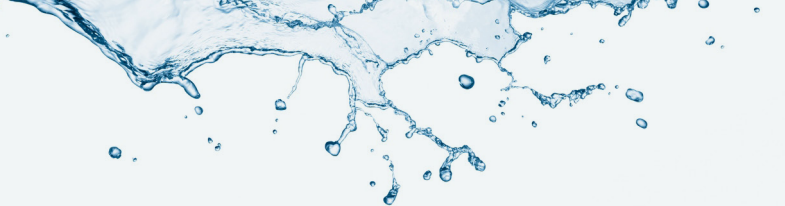


Contexte

L'intérêt du concept de la gestion intégrée des ressources en eau s'est développé au lendemain des conférences internationales sur l'eau et l'environnement qui se sont tenues à Dublin et Rio de Janeiro en 1992. Que faut-il intégrer et comment procéder à cette intégration afin d'élaborer une vision commune de la gestion intégrée des ressources en eau et partagée par l'ensemble des acteurs impliqués dans le domaine de l'eau ? Malgré les efforts entrepris par plusieurs organismes/forums internationaux et régionaux, tels que le Partenariat mondial pour l'eau et la Commission des Nations Unies sur le développement durable, il n'existe pas de recette universelle. Car certains principes fondamentaux sur lesquels repose la gestion intégrée des ressources en eau rencontrent des difficultés dans leur mise en application vu qu'ils varient considérablement d'une région à l'autre. En revanche, le facteur lié au changement climatique (CC) est universel et se manifeste à grande et à petite échelles avec un impact direct sur la disponibilité des ressources en eau et sur leur qualité. Par conséquent, changement climatique mérite une attention très particulière pour son intégration dans l'évaluation et la planification des ressources en eau, surtout dans les régions ou pays qui sont très vulnérables à ce phénomène et leurs ressources en eau s'y trouvent très menacées comme la région du Maghreb.

Consciente de l'importance de la problématique de l'eau dans plusieurs pays, l'UNESCO, via son Programme Hydrologique Intergouvernemental sur la sécurité de l'eau et sa stratégie liée au changement climatique, soutient les efforts déployés par les pays membres en matière de développement de solutions innovantes d'adaptation et d'atténuation visant à réduire les effets du changement climatique sur les ressources en eau. D'autre part, les pays du Maghreb se sont engagés à travers les Contributions Nationales Déterminées (NDC) à contribuer aux efforts déployés par la communauté internationale dans la lutte contre le changement climatique (en cohérence avec l'Article 3 de l'Accord de Paris sur le climat).

Le Bureau de l'UNESCO pour le Maghreb a organisé des ateliers de réflexion avec un groupe d'experts pour débattre de la question du changement climatique dans l'évaluation et la planification des ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant. L'objectif visé à travers cette réflexion de contribuer au développement d'une approche scientifique d'intégration du changement climatique dans la gestion de l'eau au Maghreb et à l'échelle d'un bassin versant



hydrologique. Ladite réflexion a abouti au présent guide qui est destiné aux professionnels et décideurs dans le domaine de l'eau à l'échelle du Maghreb et ailleurs : Ministères chargés de l'Eau, Agences nationales et régionales (bassins), services de la météorologie, bureaux d'études et autres. Les acteurs ciblés sont censés être familiarisés aux concepts et problèmes fondamentaux liés à la gestion des ressources en eau. L'objectif n'est pas ici de développer le sujet de manière classique en se focalisant sur les principaux problèmes entravant l'application de la gestion intégrée des ressources en eau, mais plutôt d'intégrer la dimension du changement climatique dans la gestion intégrée des ressources en eau, et surtout dans l'évaluation et la planification à court, moyen et long terme. Ce guide intéresse aussi bien les experts techniques que les experts en adaptation à la recherche d'un outil efficace et offrant à plusieurs niveaux géographique et administratif les possibilités de réaliser un diagnostic approfondi de la vulnérabilité au changement climatique et d'améliorer la résilience face à ses effets.

Structure du document :

Ce guide de référence de la prise en compte du CC dans la gestion des ressources en eau comprend trois parties principales :

- 1. Changements climatiques observés et projetés au Maghreb et impacts sur les ressources en eau montrant les défis auxquels la région du Maghreb est confrontée ;*
 - 2. Evaluation de la vulnérabilité des ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant, et les étapes à suivre conduisant à cette évaluation appuyée par des exemples choisis du Maghreb.*
 - 3. Prise en compte du CC dans la gestion et la planification des ressources en eau, en particulier pour le dimensionnement des infrastructures hydrauliques et l'amélioration de l'adaptation et le renforcement de la résilience.*
-



Introduction

2.1. Contexte international et régional

Soulignant que l'eau est une ressource vitale pour le développement durable et la réduction de la pauvreté et de la faim, les États Membres de l'ONU ont approuvé une résolution en faveur d'une nouvelle décennie internationale d'action (2018-2028) : «L'eau au service du développement durable». La nouvelle décennie sera axée notamment sur le développement durable et la gestion intégrée des ressources en eau en vue de la réalisation des objectifs sociaux, économiques et environnementaux et sur la mise en œuvre et la promotion des programmes et projets connexes. Le but ultime étant d'assurer la sécurité hydrique ou « la disponibilité des ressources en eau et l'accès à une quantité suffisante pour les usages humains et pour les besoins des écosystèmes » visée par les Objectifs du Développement Durable (ODD-6).

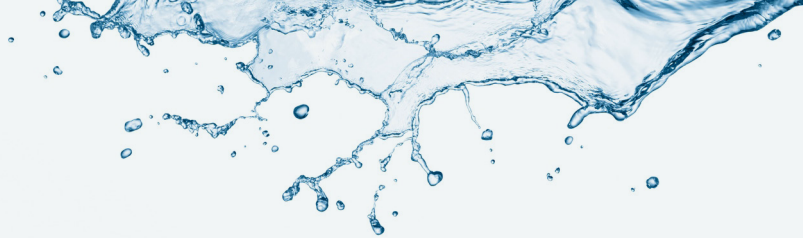
Les ressources naturelles en eau au Maghreb sont parmi les plus faibles au monde et la région est classée parmi les régions ayant le ratio d'eau par habitant le plus faible. En effet, le potentiel régional des ressources en eau naturelles renouvelables au Maghreb est en deçà de 650 m3/habitant/, sauf la Mauritanie qui dispose des ressources en eau amenées du fleuve Sénégal. Ces ressources sont en plus marquées par leur grande irrégularité dans le temps et dans l'espace.

Ressources en eau renouvelables au Maghreb (Aquastat, 2017)

Pays	Ressources en eau renouvelables par habitant (m3/habitant/an)
Algérie	281.9
Libye	106.4
Mauritanie	2 662
Maroc	650
Tunisie	403.6

**Le Maroc dispose actuellement de 650m3/habitant/an.*

Cette situation risque de se dégrader sous l'effet du changement climatique. En effet, durant les dernières décennies, le Maghreb a enregistré une aggravation des phénomènes extrêmes et une réduction importante de la pluviométrie, et par conséquent des écoulements. Les projections futures issues des modèles de climat confirment des changements additionnels au cours du siècle actuel et même au-delà avec des amplitudes et des intensités dépendant des émissions de



gaz à effet de serre (GES). Ainsi, le cycle hydrologique sera perturbé en entier et la région du Maghreb évoluerait dans le sens de l'assèchement, notamment sous les scénarios modéré et intense (Douvillie et al., 2021), à travers une réduction des cumuls pluviométriques combinée à une réduction de l'humidité des sols et une augmentation de la sécheresse. Ce qui se traduira, selon les projections futures, par un appauvrissement des ressources en eau de surface et souterraines dans la région, et donc un stress hydrique exacerbé (Droogers et al, 2012).

Dans ce contexte, et pour accompagner le développement des pays du Maghreb, plusieurs efforts ont été déployés depuis longtemps dans la voie de la maîtrise de ces ressources en eau à travers la réalisation d'importantes infrastructures hydrauliques, accompagnée vers le début des années 2000 d'une politique de la gestion de la demande en eau qui a gagné en importance d'année en année.

Toutefois, le secteur de l'eau au Maghreb reste confronté à des défis liés principalement à la raréfaction des ressources en eau sous l'effet du changement climatique, à la surexploitation des ressources en eau souterraine, à la sous-valorisation des ressources en eau mobilisées, notamment dans le domaine agricole, et à la détérioration de la qualité des ressources en eau à cause du retard dans l'assainissement et l'épuration des eaux usées.

2.2. Pourquoi intégrer l'effet du changement climatique dans la gestion de l'eau au Maghreb

Bordiers du Sahara, les pays du Maghreb (Maroc, Algérie, Tunisie, Libye, Mauritanie) ne bénéficient du climat méditerranéen subhumide que sur une étroite frange littorale. Dans ces pays, les secteurs clefs de l'économie sont très dépendants du changement climatique et de la disponibilité de l'eau. En effet, l'accroissement démographique, l'urbanisation accélérée et le développement économique (surtout agricole) ont considérablement accru les besoins en eau dans un contexte de rareté de la ressource hydrique. Bien avant que la question du changement climatique soit bien posée d'une manière structurelle, les États maghrébins ont très tôt mobilisé l'essentiel de leurs potentiels en eau. Les eaux superficielles et souterraines subissent une pression consécutive à l'augmentation de la demande en eau, entraînant de fortes tensions entre les différents usagers. D'après les modèles climatiques (UNESCWA, 2017), les effets attendus du changement climatique global sur les ressources en eau indiquent une aggravation de leur vulnérabilité. Ainsi, le changement climatique

ajoutera plus d'incertitude à la tâche déjà difficile de la planification et la gestion des ressources en eau qui suppose généralement que le climat futur serait le même que de par le passé en développant des scénarii futurs sur la base des données hydro-climatologiques observées.

Pour faire face à cette situation à court et moyen termes, les stratégies développées par les États Maghrébins doivent tenir compte de ce changement climatique afin de relever les défis. Elles doivent s'articuler, d'abord, sur une évaluation de l'effet du changement climatique sur le potentiel futur des ressources en eau, en particulier à des intervalles de 10 à 20 ans d'ici 2100. Sur la base de la variation de ce potentiel, les stratégies futures doivent combler le déficit d'eau en puisant d'abord dans les solutions offertes par la gestion de la demande et en faisant recours aux ressources additionnelles à mobiliser aussi bien par les techniques conventionnelles que non conventionnelles, notamment le dessalement des eaux et la réutilisation des eaux usées épurées. La réussite de ces stratégies doit être aussi assurée par la mise en œuvre d'une approche économique qui vise à maîtriser la demande par une bonne efficacité de l'eau en luttant contre les pertes des réseaux de distribution d'eau agricole et potable, ainsi que l'envasement des barrages, en plus de la collecte des eaux de pluie.

Le changement climatique affecte l'état quantitatif et qualitatif des ressources en eau en modifiant les cycles et les systèmes hydrologiques qui, à leur tour, affectent principalement l'intensité et la fréquence des inondations et des sécheresses dont les effets néfastes se font de plus en plus sentir sur les populations et les biens et services socio-économiques et environnementaux qui en dépendent de façon directe ou indirecte.

Partout dans le monde, les femmes et les hommes accèdent, gèrent, utilisent et profitent de l'eau différemment. Le changement climatique qui impacte fortement la disponibilité en eau sur le plan quantitatif et qualitatif menace d'exacerber les inégalités entre les deux sexes dans leur rapport à l'eau.

La détérioration de la qualité et de la quantité de l'eau causée par ce fléau aura un impact sur l'utilisation de l'eau, et de surcroît sur la disponibilité alimentaire, en particulier dans les zones rurales où la corvée de l'alimentation en eau incombe souvent aux femmes et aux petites filles. Dans de nombreux ménages, les femmes sont les principales utilisatrices et gestionnaires de l'eau pour les activités de cuisine, de nettoyage, d'agriculture de subsistance, d'hygiène; les hommes utilisent principalement les ressources en eau pour des activités génératrices de revenus telles que l'agriculture à grande échelle ou l'élevage.

Alors que les liens entre le genre et l'eau, et entre l'eau et le climat semblent être bien abordés par la recherche, le lien entre le genre, le climat et l'eau a reçu

moins d'attention d'un point de vue scientifique par manque crucial de données pertinentes pouvant caractériser ce lien. Les chercheurs gagneraient à analyser les liens entre le genre, le climat et l'eau afin de fournir une base pour l'inclusion d'une composante genre dans les projets liés à l'adaptation/atténuation du changement climatique en lien avec les ressources en eau.

Au Maghreb, l'eau est rare et subit de plus en plus l'effet néfaste et palpable du changement climatique. La pénurie de l'eau est une réelle menace pour la pauvreté et la féminisation de la pauvreté. Le temps passé par les femmes et les filles à aller chercher de l'eau, loin de leurs domiciles, les empêche souvent d'acquérir une éducation et d'être autonomes, les enracinant ainsi dans la pauvreté. D'où l'intérêt de prendre au sérieux la menace du changement climatique qui risque d'exacerber les inégalités entre les femmes et les hommes dans leur rapport à l'eau. L'appel est lancé à travers cette réflexion pour développer et tester des approches scientifiques pour lier le changement climatique, l'eau et le genre. L'objectif est de comprendre l'effet de l'impact différencié selon le genre du changement climatique sur les ressources en eau et d'utiliser les résultats pour informer et influencer les programmes et projets d'adaptation afin qu'ils soient plus sensibles au genre - contribuant à la fois à l'égalité des sexes et à l'éradication de la pauvreté.

Les lacunes dans la collecte et la disponibilité des données entravent le développement de telles approches. Les données ventilées par sexe sont limitées, en particulier les données disponibles dans le même format dans tous les pays et régions. Réaliser des enquêtes et préparer les données nécessaires prend quelques années et des efforts concertés et organisés. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour bien définir les relations indirectes entre les facteurs sociaux et environnementaux afin que l'indice de parité entre les sexes puisse illustrer avec précision la capacité d'adaptation face au changement climatique.

Ce faisant, les efforts d'adaptation au climat dans le secteur de l'eau permettraient d'intégrer des activités et des objectifs qui tiennent compte des questions de genre et garantissent que les activités n'exacerbent pas les inégalités.

Au vu de ce qui précède, les pays du Maghreb doivent faire face à ce grand défi du changement climatique, combiné à l'accroissement de la demande en eau, et surtout au niveau des facteurs qui déterminent la disponibilité et les besoins en eau auxquels ils doivent s'adapter de façon permanente afin d'éviter les situations critiques. De tels problèmes sont susceptibles de conduire à une dégradation de l'environnement, la détérioration écologique, l'invasion du désert, l'exode rural et de compromettre la cohésion sociale, le bien-être et la qualité de vie ainsi que la sécurité alimentaire et la sécurité globale dans l'avenir.

Définitions et terminologie

Changement climatique : Le changement climatique fait référence à un changement de l'état du climat qui peut être identifié par des changements dans la moyenne et /ou la variabilité de ses propriétés, et qui persiste pendant une période prolongée, typiquement des décennies ou plus (définition issue de l'OMM).

Modèle climatique : C'est une représentation numérique du système climatique basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes, leurs interactions et processus de rétroaction, et tenant compte de certaines de ses propriétés connues. Les modèles climatiques comprennent une représentation tridimensionnelle de l'atmosphère, de la surface terrestre, de la mer, des lacs et de la glace. Ils utilisent des équations mathématiques pour caractériser comment l'énergie et la matière interagissent dans différentes parties de l'océan, de l'atmosphère et des terres. Construire et exécuter un modèle climatique est un processus complexe d'identification et de quantification des processus du système terrestre, de leur représentation avec des équations mathématiques (basées sur les lois fondamentales de la physique, du mouvement des fluides et de la chimie), de définition de variables pour représenter les conditions initiales et les changements ultérieurs du forçage climatique, et de résolution répétée des équations à l'aide de puissants superordinateurs. Grâce au modèle climatique, on obtient des représentations numériques de la répartition géographique de différents paramètres, tels que la répartition des vents, des nuages, des masses d'eau, etc. Pour cela, le modèle part de conditions initiales connues des paramètres climatiques tels que la température, le rayonnement, l'humidité... et les fait évoluer en suivant le formalisme mathématique. Les modèles climatiques diffèrent dans leur complexité qui augmente avec le temps. Les modèles de circulation générale (GCM) couplés atmosphère-océan (AOGCM) fournissent une représentation du système climatique qui est proche ou à l'extrémité la plus complète du spectre actuellement disponible.

Modèle climatique régional (RCM) : C'est un modèle climatique exécuté à une résolution élevée sur un domaine limité (par exemple, l'Afrique du Nord) pour générer des données à plus haute résolution. Le RCM est utilisé pour effectuer une descente d'échelle des informations climatiques mondiales à des échelles régionales ou locales à partir des sorties de GCMs.



Descente d'échelle (WG1AR5 glossaire) : C'est une méthode qui dérive des informations à l'échelle locale à régionale (10 à 100 km) à partir des sorties des modèles à plus grande échelle ou d'analyses de données. Il existe deux types de méthodes : la descente d'échelle dynamique et la descente d'échelle statistique/empirique. La méthode dynamique utilise les sorties de modèles climatiques régionaux, de modèles globaux à résolution spatiale variable ou de modèles globaux à haute résolution. Les méthodes statistiques/empiriques développent des relations statistiques qui relient les variables de grande échelle aux variables climatiques d'échelle plus fine (locales/régionales).

Scénario d'émissions (basé sur glossaire de IPCC SR.1.5) : Une représentation plausible de l'évolution future des émissions de substances influençant le bilan radiatif comme les gaz à effet de serre (GES) et les aérosols. Cette représentation est basée sur un ensemble d'hypothèses cohérentes sur les forces motrices (comme le développement démographique et socio-économique, le changement technologique, l'énergie et l'utilisation des terres) et leurs relations clés. Les scénarios de concentration, dérivés de scénarios d'émissions, sont souvent utilisés comme intrants dans un modèle climatique pour calculer des projections climatiques.

Scénario socio-économique (WGIII, AR5) : Un scénario qui décrit un futur possible en termes de population, de produit intérieur brut (PIB) et d'autres facteurs socio-économiques pertinents pour comprendre les implications du changement climatique.

Scénarios climatiques : Une projection climatique est la réponse simulée du système climatique à un scénario d'émission ou de concentration future de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols, généralement dérivée à l'aide de modèles climatiques. Les projections climatiques se distinguent des prévisions climatiques par leur dépendance du scénario d'émission.

Vulnérabilité : Le GIEC définit la vulnérabilité au changement climatique comme étant «le degré par lequel un système risque d'être affecté négativement par les effets du changement climatique sans pouvoir y faire face»

Adaptation (basé sur glossaire de IPCC SR.1.5) : L'adaptation est le processus d'ajustement au climat actuel ou attendu et ses effets, afin de modérer les dommages et/ou d'exploiter des opportunités bénéfiques.

Modèle hydrologique (selon le Glossaire International d'Hydrologie) : Représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et reliés entre eux dans des séquences temporelle et spatiale correspondant à celles que l'on observe dans la nature. Par exemple, les modèles conceptuels sont utilisés pour simuler le comportement d'un bassin.

Modèle hydrogéologique (selon le dictionnaire Français d'Hydrogéologie) : Toute représentation théorique simplifiée d'un système aquifère : elle comporte la définition d'une structure, la formulation de lois (relations déterministes ou probabilistes) reliant les impulsions ou entrées du système à ses réponses ou sorties, et la définition des paramètres (constantes ou variables pouvant prendre des valeurs numériques) entrant dans ces relations. Un modèle peut être déterministe, stochastique ou statistique. Un modèle peut être conceptuel ou empirique. Enfin un modèle peut être global ou distribué.

Série chronologique : Une série temporelle, ou série chronologique, est une suite de valeurs numériques représentant l'évolution d'une quantité spécifique au cours du temps (variable mesurée ou observée ou calculée). De telles suites de variables aléatoires peuvent être exprimées mathématiquement afin d'en analyser le comportement, généralement pour comprendre son évolution passée et pour en prévoir le comportement futur. Par exemple : série de précipitations ou de températures en climatologie, série de débits en hydrologie et série piézométrique en hydrogéologie. Une telle transposition mathématique utilise le plus souvent des concepts de probabilités et de statistique (https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9rie_temporelle).





Changements climatiques observés et projetés au Maghreb et impacts sur les ressources en eau

4.1. Changements du climat observés et projetés

Les études évaluant les changements observés et/ou prévus au niveau des pays du Maghreb ou des domaines incluant toute ou partie de cette région ont mis en évidence une empreinte avérée du réchauffement global et de ses répercussions sur le climat maghrébin. Une synthèse succincte des résultats principaux est présentée ci-après afin d'illustrer les évolutions et changements enregistrés et ceux attendus dans le futur selon les scénarios d'émissions.

Il convient de noter que ces résultats ne peuvent être pris en tant que tels pour déduire les changements au niveau local ou à l'échelle d'un bassin versant, ni pour constituer une entrée directe de modèles hydrologiques pour l'évaluation d'impacts.

4.1.1. Evolutions et changements observés

A l'instar de toute la région Méditerranéenne, le Maghreb semble se réchauffer à un rythme plus élevé que l'échelle globale. Certaines zones ont manifesté un réchauffement 50% plus important que la tendance globale durant les 40 dernières années¹. Durant la décennie 2006-2015, les températures moyennes annuelles Maghrébines ont accusé une hausse de 0.75°C à 2.25°C selon le rapport spécial du GIEC sur le réchauffement de 1.5°C². Les températures saisonnières hivernales et estivales ont affiché quant à elles un réchauffement de 0.75°C à 1.5° et de 0.75°C à 2.25°C respectivement. Le rythme décennal moyen du réchauffement de la région sur la période 1961-2015 est généralement de 0.2°C à 0.5°C³.

Le réchauffement au niveau du Maghreb s'y manifeste aussi à travers la hausse des extrêmes de fortes températures accompagnées d'une réduction des événements froids. Ce constat est démontré par différentes études utilisant les observations relevées localement ou celles issues de données de réanalyses^{1,4}. Les études de détection ont montré l'empreinte des émissions de GES d'origine humaine dans les augmentations dans les chaleurs extrêmes et les vagues de froid pour toute la région³.

.....
¹ Driouech et al. (2020a) ; Donat et al. (2014a)

² IPCC (2018)

³ Gutiérrez et al. (2021), <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>

⁴ Les réanalyses sont des données produites en combinant les observations et les sorties de modèles.

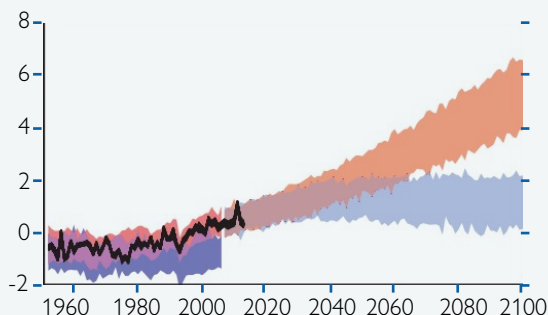


Figure 1 : Changements observés de température moyenne et projetés au Maghreb selon les scénarios RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (orange). Extrait de Fig. 22.2, de IPCC-WGII-chapitre 22 ⁵.

Malgré des tendances hétérogènes en signe et en significativité à travers la région, les cumuls annuels des précipitations se sont réduits, notamment au niveau de la moitié nord du Maroc, les côtes algériennes et la Tunisie méditerranéenne ⁶. Ces réductions observées sur les 50 dernières années sont plus avérées dans le cas du Maroc et concernent principalement les saisons d'hiver et de printemps. Des changements dans les aspects extrêmes de précipitations ont été aussi relevés notamment à travers une certaine accentuation de la sévérité de la sécheresse et une augmentation de sa persistance temporelle (hausse du nombre maximale de jours consécutifs secs) ⁷. En particulier, le rapport du GIEC publié en 2021, montre une augmentation des sécheresses hydrologiques et agricoles au niveau de la zone méditerranéenne de la région ⁸ (Tableau 1). En plus, les températures plus chaudes ont induit les pertes par évaporation et ONT réduit les chutes de neige et le manteau neigeux, amplifiant les déficits d'humidité du sol et de ruissellement. Cependant, il convient de noter que des tendances vers la hausse des précipitations, mais généralement non significatives, ont été détectées en automne ⁹ au Maroc indiquant l'importance des analyses intra-annuelles.

Les analyses effectuées sur le long terme (précipitations) montrent une dominance des conditions relativement humides dans les régions méditerranéennes de l'Algérie et de la Tunisie jusqu'aux années 1890, tandis que le XXe siècle a été

⁵ Niang et al. (2014)

⁶ Driouech et al. (2020) ; Donat et al., (2014)

⁷ Driouech(2010); Donat et al.(2014a); Driouech, 2017, Driouech et al. (2020b).

⁸ Seneviratne et al. (2021); Gutiérrez et al. (2021), <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>

⁹ Trambly et al. (2013)

relativement sec¹⁰ . Quelques années très humides se sont produites durant les années 1970 et 1980, mais dans l'ensemble, des conditions anormalement sèches ont prévalu depuis les années 1980 dans ces deux régions. Les tendances de précipitation calculées sur le long terme au niveau de ces régions sont négatives et statistiquement significatives. Une augmentation de la variabilité d'une année à l'autre a été également constatée depuis environ 1960. L'aridité croissante et l'apparition de conditions très sèches depuis les années 1980 sont confirmées à la fois par les relevés au niveau des stations et par les études de cernes au Maroc, en Algérie et en Tunisie¹¹ . Les tendances ont été différentes en Libye (région méditerranéenne) notamment au cours des dernières décennies. En effet, la région méditerranéenne de ce pays a été relativement humide durant les années 80 et 90. Les conditions sèches sont devenues depuis une règle.

Facteurs d'impact climatiques	Evolution observée	Etendue
Température moyenne de l'air	Tendance à la hausse	Toute la région
Extrêmes de chaleur	Tendance à la hausse	Toute la région
Vagues de froid	Tendance à la baisse	Toute la région
Précipitation moyenne	Tendance à la baisse dans certaines parties	Notamment au Maroc en hiver et au printemps
Aridité	Tendance à la hausse	Hors régions désertiques et Mauritanie
Sécheresse hydrologique	Tendance à la hausse	Hors régions désertiques et Mauritanie
Niveau relatif des mers	Tendance à la hausse	Hors régions désertiques et Mauritanie
Acidité des océans et lacs	Tendance à la hausse	Toute la région

Tableau 1 : Synthèse des tendances observées de facteurs climatiques pouvant impacter directement ou indirectement les ressources en eau de la région du Maghreb ¹²

¹⁰ Nicholson et al., 2018

¹¹ Esper et al., 2007 ; Kherchouche et al., 2013; Touchan et al. 2008; Ghenim et Megnounif, 2013

¹² Selon les résultats du rapport du GIEC publié en 2021 (Interactive Atlas: Regional synthesis) et d'autres études sur la région (Driouech et al. (2020b) ; Donat et al., (2014b))

4.1.2. Projections futures

Le Maghreb est une région qualifiée, de point de vue climatique, de « zone sensible » vu de nombreux facteurs de vulnérabilité incluant une forte dépendance à la ressource en eau et un climat favorisant les sécheresses et les événements extrêmes de fortes précipitations. Selon les modèles climatiques, et de façon compatible avec les tendances observées, les températures au Maghreb s'accroîtront davantage dans le futur et les cumuls pluviométriques subiront des changements sous les différents scénarios d'émission de GES et à différents horizons.

Les températures annuelles moyennes augmenteraient quelques soit le scénario d'émission mais de façon moins atténuée sous les scénarios (RCP2.6/SSP1-26) compatibles avec le niveau de réchauffement global défini par l'Accord de Paris¹³. Elles seraient plus chaudes par rapport à celles de 1981–2010 de 1°C à 3°C au mi-siècle courant (2030–2059) et de 3 à plus de 5°C en fin de siècle sous les scénarios intenses (RCP8.5/SSP2-85). Les augmentations sont plus fortes dans l'intérieur que sur les côtes. Sous le scénario avec des efforts importants de réduction des émissions de GES (RCP2.6/SSP1-26), les hausses seraient généralement comprises entre 1°C et 2°C. Ce réchauffement futur de la région maghrébine, projeté avec un grand consensus entre les modèles climatiques, se manifesterait aussi en termes d'extrêmes de fortes chaleurs. Des augmentations importantes du nombre, intensité et ampleur des vagues de chaleur estivales sont aussi projetées pour la fin du siècle notamment sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5¹⁴.

La partie la plus arrosée du Maghreb deviendrait un point chaud de point de vue sécheresse d'ici la fin du 21^{ème} siècle et subirait, avec un grand consensus entre les modèles, des réductions des cumuls pluviométriques annuels¹⁵. Des baisses des précipitations annuelles de 10% à 20% sont à attendre au niveau de la moitié nord du Maroc d'ici le mi-siècle et de 20% à 50% en fin de siècle⁹. Les cumuls pluviométriques baisseraient aussi au niveau des zones méditerranéennes de l'Algérie, la Tunisie et la Libye et notamment sous les scénarios d'émission intenses¹⁶. Sous RCP8.5/SSP2-85, ces régions recevront des précipitations réduites de 10 à 20% vers le mi-siècle (2030–2059) notamment en Algérie et Tunisie. Des baisses plus importantes (10% à plus de 30%) sont projetées

.....
¹³ IPCC WGII, Al Mazroui et al. (2020)

¹⁴ Driouech et al., 2010 ; IPCC, 2013 ; Dosio et Panitz, 2015 ; Polande et al., 2017 ; Driouech et al. 2020b, Al Mazroui et al, 2020

¹⁵ Giorgi et al., 2014 ; Waha et al., 2017 ; IPCC-2013-2018-2021

¹⁶ Giorgi et al., 2014 ; Waha et al., 2017 ; IPCC-2013-2018-2021

pour la fin du siècle (2070-2099) y compris dans des parties du nord de la Libye. Les modèles climatiques ne montrent pas de grand consensus quant au sens de l'évolution dans les régions désertiques et en Mauritanie. Les évolutions vers l'assèchement dans la région maghrébine concerneraient principalement la saison hivernale et viendraient notamment de l'augmentation des nombres de jours secs et des pertes en précipitations dues aux événements modérés.



Figure 2 : Changements futurs de précipitations annuelles (en %) projetés pour 2081-2100 (relativement à 1995-2014) par les modèles CORDEX-Africa (gauche, moyenne de 21 RCM) (scénario RCP 8.5) et ceux issus de CMIP6 (droite, moyenne de 33 GCM) (SSP5-8.5). Les hachures indiquent les zones avec grand consensus entre les modèles. Source : extrait de figures issues de IPCC-WGI Atlas ¹⁷

Plusieurs études projettent une prédominance des réductions des événements de fortes précipitations dans les zones les plus humides¹⁸. Des augmentations de ces phénomènes par endroits ne sont pas exclues notamment pour les très fortes précipitations¹⁹. Le sens de l'évolution future des fortes et très fortes précipitations n'affiche, cependant, pas un grand consensus entre les modèles climatiques.

Outre ces évolutions et changements à l'échelle régionale ou sous-régionale, des études ciblant les bassins versants maghrébins ont montré des amplitudes variant selon le bassin ou même sous-bassins en dépit d'un même sens d'évolution²⁰. Ces changements étant modulés à la fois par la couverture terrestre et l'utilisation des terres, des facteurs importants aussi dans les processus hydrologiques.

Les résultats du dernier rapport du GIEC (GIEC, 2021) corroborent ces évolutions vers la réduction des précipitations combinée à l'augmentation des sécheresses et des températures en autres (Figure 3).

¹⁷ <https://interactive-atlas.ipcc.ch>

¹⁸ Molinié et al., 2016) ; Nikulin et al., 2018

¹⁹ Giorgi et al., 2014 ; Polande et al., 2017 ; Betts et al., 2018

²⁰ Trambaly et al. (2016)

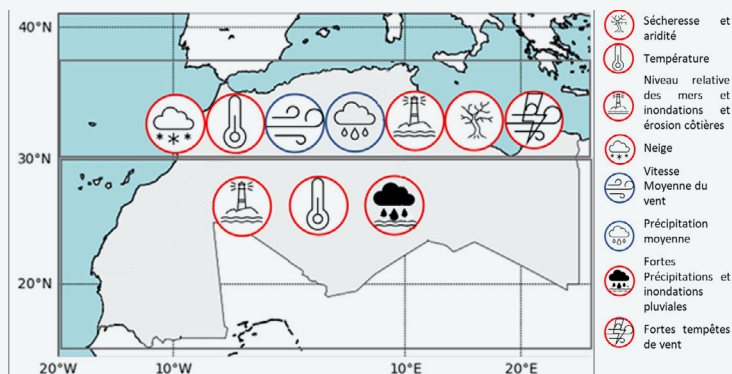


Figure 3 : Synthèse des changements projetés de facteurs climatiques pouvant impacter les ressources en eau de la région du Maghreb. Les changements sont présentés pour la partie méditerranéenne du Maghreb agrégée (cadran haut) et la région dite « désertiques » (cadran bas). (Basé sur Figure 12.11 du chapitre 12 et l'Atlas climatique du GIEC)²¹. Les cercles rouges indiquent une augmentation dans le futur et les cercles bleus une diminution.

4.2. Impacts sur les ressources en eau au Maghreb

Dans les pays du Maghreb - Algérie, Libye, Maroc, Mauritanie, Tunisie- les secteurs clefs de l'économie sont très dépendants du changement climatique et de la disponibilité de l'eau. A cause de ce changement climatique, les pays du Maghreb vivent sous la menace des pénuries d'eau les plus sérieuses et qui sera accentuée pour les prochaines années. En effet, les cinq pays du Maghreb, vivent aujourd'hui - à un degré moindre pour la Mauritanie - une situation de stress hydrique, conséquence d'une forte croissance démographique et du changement climatique. En termes de potentiel en eau renouvelable, tous les pays de la région sont sous le seuil de stress hydrique (<1000 m³/habitant/an) et le Maroc rejoindra l'Algérie, la Tunisie et la Libye à partir de 2025 en tant que pays souffrant de la pénurie d'eau sous le seuil de pénurie en eau absolue (moins de 500 m³/habitant/an). Quant à la Mauritanie, elle est le seul pays de la région à ne pas avoir de problème hydrique eu égard à sa faible population (3. 516.806 habitants en 2014) et au potentiel important en eau offert par le fleuve du Sénégal. Le pays se base sur le transfert de l'eau douce dudit fleuve pour satisfaire ses besoins en eau potable tout en développant l'irrigation sur la bande méridionale des berges de ce fleuve (Chennouf, 2016).

²¹ Selon les résultats du rapport du GIEC publié en 2021 : Ranasinghe et al. (2021)



4.2.1. Eaux de surface

Les ressources en eau renouvelables de surface dans la région du Maghreb sont estimées à 49 Milliards m³ par an (Filali, 2003) avec une tendance générale à la baisse. Il s'agit d'une moyenne établie sur plusieurs dizaines d'années. Cependant, pour une année humide, les ressources en eau renouvelables de surface peuvent être abondantes, en particulier en Algérie, Maroc et Tunisie. Au Maroc par exemple, un record de 45 Milliards m³d'apport en eau de surface a été enregistré en 2009. A l'opposé, des années sèches au Maroc ne peuvent mobiliser que 4 à 5 Milliards m³ (2020) dans l'ensemble du pays, où certaines retenues de barrages peuvent se trouver pratiquement à sec (cas du bassin de Souss Massa de la région d'Agadir en 2020).

Les eaux de surface au Maghreb sont recueillies dans plusieurs bassins hydrographiques dont les plus importants sont concentrés au Maroc, Algérie et Tunisie.

En effet, l'Algérie est divisée en cinq bassins hydrographiques regroupant les 19 bassins versants du pays dont les plus importants en termes d'apports sont : Oranie-Chott Chergui (77 169 km²) à l'ouest, Cheliff-Zahrez (56 227 km²) au centre-ouest, Algérois-Hodna-Soummam (47 431 km²) au centre et Constantinois-Seybouse-Mellegue (44 348 km²) à l'est. Les ressources en eau superficielle renouvelables internes totalisent environ 9.8 km³/an pour l'ensemble du pays dont le Sahara, bassin le plus important par la surface (2 018 054 km²), ne renferme que 0.6 km³. (http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/aquastat/pdf_files/DZA_algeria_cp.pdf). Quant au Maroc, il dispose de ressources en eau de surface non négligeables (18 – 22 Milliards m³ en moyenne) recueillies dans les bassins hydrographiques importants en termes d'apports : Sebou, Loukkos, Oum Er-Rbia, Tensift, Souss-Massa et Moulouya. En Tunisie, les bassins hydrographiques les plus importants en termes d'apports d'eau (plus de 2.5 Milliards m³) sont situés à l'extrême nord et au nord du pays dont on peut citer les bassins de Medjerda et les secteurs de Ichkeul, Cap bon et le Sahel nord.

Des centaines de barrages ont été réalisés au niveau des pays du Maghreb afin de mobiliser les eaux de surface. La capacité initiale de ces ouvrages dépassait 6 Milliards m³ en Algérie (une soixantaine de barrages), 19 Milliards m³ au Maroc (147 barrages) et 2.7 Milliards m³ en Tunisie (plus de 40 barrages). Cependant, l'érosion accentuée par le CC a accéléré l'envasement des retenues de barrages en réduisant leur capacité de stockage de 2 à 3% par an (Nichane et Khelili, 2015). Pour la Libye, les eaux de surfaces sont pratiquement limitées aux crues générées par des orages de courte durée en hiver. Les barrages (18)

d'une capacité de stockage total de 390 Millions m³, réalisés dans le nord du pays, contrôlent les ressources intermittentes dans les oueds pour recueillir annuellement environ 61 millions m³. Alors qu'en Mauritanie, le fleuve Sénégal apporte l'essentiel des ressources en eau renouvelables dépassant de loin la demande en eau du pays.

La réduction des précipitations due au CC a aussi conduit à la diminution des apports d'eau de surface aux retenues de barrages : la contribution du ruissellement aux eaux de surface a systématiquement diminué. Les flux trop faibles ne permettent pas de remplir suffisamment les barrages existants. En plus, l'augmentation des températures due au réchauffement global a aussi accru les taux d'évaporation des masses d'eau retenues par les barrages.

En 2014, la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau du Maroc (DRPE, 2014) a évalué l'impact potentiel des changements du climat sur 8 régions hydrauliques du pays (Sebou, Oum Er-Rbia, Bouregreg, Loukkos, Moulouya, Tensift, Souss Massa Draa, Ziz - Rheris - Guir) à l'aide d'une descente d'échelle statistique utilisant les sorties de 8 modèles climatiques. Les résultats de la comparaison des volumes annuels moyens de ruissèlement futurs avec ceux du Plan de Développement et Aménagement Intégré des Ressources en Eau (PDAIRE) montrent une prédominance des diminutions au niveau des différents bassins. Les amplitudes de ces diminutions sont variables d'un bassin à l'autre (entre -10% à -80%). Elles s'intensifient vers le mi-siècle et deviennent importantes vers la fin du siècle. Les baisses projetées sont principalement liées aux réductions des précipitations en premier lieu. L'effet de la hausse des températures, et de l'évapotranspiration, n'est pas négligeable. La réduction des neiges a un impact sur les bassins des Atlas notamment au Maroc et en Algérie. En hiver, au-dessus de 1500 m, il y a fréquemment un couvert neigeux qui se maintient plus de six mois en altitude. Mais le réchauffement a réduit la quantité et la durée de la couverture neigeuse notamment dans les massifs montagneux du nord du Maroc et de l'Algérie avec pour conséquence une réduction des disponibilités en eau et du potentiel hydro-électrique, ainsi qu'un changement de la saisonnalité des écoulements au niveau des bassins hydrauliques.

A cause de la variabilité climatique qui caractérise la région du Maghreb, des centaines de mm de pluie peuvent être enregistrées pendant quelques jours seulement durant toute l'année, accompagnées par une érosion très forte du sol et un ruissellement excessif causant fréquemment des catastrophes comme en témoignent les événements ci-après :

- Inondations qui ont affecté la région d'Alger, en particulier la commune de Bab El Oued le 10 novembre 2001 ;

- En octobre 2002, des pluies diluviennes (28.5 mm en 45 minutes) ont provoqué de graves inondations sur la région de Tamanrasset et notamment la région d'Arak ;
- Les inondations de novembre 2002 à Settat, Berrechid et Mohammedia au Maroc, et les inondations de Mars 2010 à Casablanca et fin 2008 au Maroc et en Algérie (Ghardaya et dans d'autres régions du pays) ;
- En septembre 2013, plusieurs villes tunisiennes (Tozeur, Sfax et autres) ont connu des inondations dévastatrices ;
- Le 26 novembre 2014, des pluies torrentielles se sont abattues pendant 72 heures dans la wilaya de Bechar avec des interruptions momentanées ayant engendré des pertes humaines et des dégâts matériels importants ;
- En décembre 2014 des pluies diluviennes ont provoqué de graves inondations dans le sud marocain qui a enregistré des précipitations records : à Agadir, plus de 250 mm de précipitations sont tombées dans certains secteurs de la ville, soit l'équivalent d'une année de pluie pour cette même ville. Ces intempéries, ont entraîné des crues d'oueds (rivières) et des dégâts considérables, en particulier à Guelmim, qui a été déclarée zone sinistrée ;
- En août 2015, des inondations à Bordj Badji Mokhtar ont provoqué des dégâts importants et ont sinistrés plusieurs quartiers ;
- Le 23 août 2015, d'importantes chutes de pluies se sont abattues sur Constantine, ont laissé une partie de la ville exsangue. Des quartiers ont été complètement inondés à El Khroub et la nouvelle ville Ali Mendjeli.

4.2.2. Eaux souterraines

En Algérie, la réduction des pluies due aux sécheresses qui sévissent depuis le début des années 70 a entraîné une baisse de la recharge en eau des principales nappes aquifères du nord du pays. Dans beaucoup de plaines du pays, le niveau des nappes phréatiques a déjà chuté dans des proportions alarmantes (> 20 m) et plusieurs sources d'eau ont tari ou fonctionnant avec des débits de plus en plus faibles dans les zones relativement élevées. L'aggravation des sécheresses, conjuguée à la surexploitation des nappes phréatiques, a entraîné la minéralisation des zones non saturées des nappes aquifères profondes, dans les régions semi-arides comme le plateau d'Oran et les hautes plaines occidentales. Le taux moyen d'utilisation des nappes phréatiques est de 79% dans la région Nord, il peut parfois atteindre et dépasser les 90% dans certaines zones (Nichane et Khelil, 2015). Dans les régions côtières, la baisse des niveaux de pression hydrostatique a d'ores et déjà entraîné la pénétration d'eau de mer

dans les réserves d'eau douce des nappes aquifères côtières des régions de la Mitidja, d'Oran, de Terga et d'Annaba.

Les ressources en eau souterraine renouvelables contenues dans les nappes phréatiques du nord du pays sont estimées à près de 1.5 km³/an. Ces nappes sont alimentées essentiellement par les précipitations dont la répartition demeure irrégulière, à la fois dans le temps et dans l'espace. Le sud du pays se caractérise par l'existence de ressources en eau souterraines (fossiles) très importantes provenant des nappes du continental intercalaire et du complexe terminal qui s'étendent jusqu'à la Libye en traversant la Tunisie.

Le Maroc dispose d'un potentiel en ressources en eau souterraines renouvelables (48 nappes superficielles et 32 nappes profondes) estimé à 4 Milliards m³/an, réparti sur plusieurs nappes côtières et continentales situées sous les plaines et les plateaux entre les montagnes de l'Atlas et l'océan Atlantique (Maâmora, Gharb, Tadla, Sais, Berrechid, Haouz, Doukkala, Souss...), ainsi qu'à l'est de la chaîne de ces montagnes (Trifa, Angad, Tafilalet, hauts plateaux, Draa...). Sous l'effet du changement climatique, ces nappes sont surexploitées pour satisfaire la demande croissante, surtout en eau d'irrigation, sachant bien qu'elles reçoivent moins de réalimentation à cause aussi de l'impact du changement climatique. Le taux de surexploitation est très élevé variant de 102% à 248% à tendance vers l'épuisement des réserves d'eau non renouvelables, avec des rabattements très significatifs de plusieurs dizaines mètres sur des nappes importantes comme le Souss, le Haouz et le Sais.

En Tunisie, les ressources en eau souterraines renouvelables sont estimées à 2.1 Milliards m³ renfermées dans des nappes phréatiques au nord et au centre, et principalement dans des nappes profondes au sud. L'impact du changement climatique se fait sentir au niveau des eaux souterraines, à titre principal au niveau des nappes phréatiques de forte salinité, des nappes littorales et des aquifères non renouvelables, qui diminueront de 28% en 2030 (MDD, 2014) avec des rabattements significatifs. La salinité des eaux souterraines proches du littoral augmentera suite à une élévation du niveau de la mer.

La Libye, qui connaît la situation la plus critique, s'est lancé dans le programme de la Grande rivière pompant les réserves fossiles d'eau non renouvelables enfouies dans le désert. La demande en eau de la Libye est bien supérieure à ses ressources renouvelables disponibles. En effet, la demande annuelle en eau est d'environ un milliard m³, par rapport à la recharge annuelle des eaux souterraines estimée à seulement 250 millions m³ (USAID, 2017). Avec seulement un ruban étroit le long de la côte recevant plus de 100 mm de pluie par an, et une intrusion saline fréquente dans les aquifères côtiers renouvelables, l'approvisionnement en eau

renouvelable est relativement faible et de faible qualité. L'augmentation prévue des jours de sécheresse sur la côte, évaluée actuellement à 101 contre plus de 224 au cours des quatre prochaines décennies, devraient également mettre plus de pression sur les ressources en eau (USAID, 2017). L'eau du projet de la Grande rivière artificielle, qui alimente l'agriculture Libyenne, les villes et l'industrie proviennent d'aquifères non renouvelables et qui ne sont pas rechargés par la pluie. Ces aquifères fossiles joueront encore un rôle plus important dans l'approvisionnement en eau à mesure que la sécheresse augmente et que les précipitations diminuent. Cependant, ces aquifères non renouvelables s'étendent sur plusieurs frontières d'autres pays, dont le plus important étant l'aquifère de grès de Nubie qui s'étend sur l'Égypte, le Tchad et le Soudan.

Quant à la Mauritanie, elle se caractérise par des nappes souterraines locales de profondeur variable et des nappes généralisées qui sont renfermées dans le bassin saharien de Taoudéni-Tanezrouft traversé par le fleuve Niger qui lui assure plus de 12 Milliards m³ de recharge par infiltration (PNISER, 2007). En plus, le bassin hydrogéologique Sénégal-Mauritanien dont l'extension se prolonge aux 3 pays voisins garantit une exploitation annuelle moyenne de 265 Mm³/an (Khouri, 1990 et OSS, 2003). Partant des impacts du changement climatique sur les précipitations et les écoulements, les impacts probables sur les eaux souterraines sont : (i) la baisse de la recharge des nappes et de leurs niveaux piézométriques, notamment dans les bassins de Taoudéni-Tanezrouk et Sénégal- mauritanien ainsi que leurs systèmes aquifères respectifs. Cette vulnérabilité sera accentuée par la pression anthropique liée aux prélèvements; (ii) la détérioration de la qualité de l'eau en relation avec l'augmentation ou la baisse de la recharge des nappes phréatiques.

Le changement climatique a accentué les déficits hydriques et a poussé les utilisateurs à les combler en faisant plus de pressions sur les eaux souterraines, menaçant ainsi leur épuisement. Les réserves souterraines fossiles des pays du Maghreb sont très importantes, surtout pour l'Algérie, la Tunisie et la Libye, mais elles sont profondes. Par endroit, elles sont chaudes et présentent un degré élevé de salinité pour la plupart des nappes (Zella et Smadhi, 2006). L'aquifère Albien en Algérie recèle 60000 milliards de m³, et l'aquifère artésien en Libye stocke 50000 milliards de m³ (Mutin, 2000). En Algérie, comme dans le cas des autres pays du Maghreb, les ressources en eaux souterraines du Nord (1.8 milliards de m³) (Ministère des ressources en eau, 1997), facilement exploitables et renouvelables, sont totalement utilisées, puisant même sur les réserves à des degrés variables. Le taux de surexploitation le plus élevé est enregistré en Libye dépassant 700% (Chennouf, 2016) ;au Maroc (disposant de quelques 4 Milliards m³) ce taux a atteint 170% dans la nappe de Souss ; alors qu'en Mauritanie

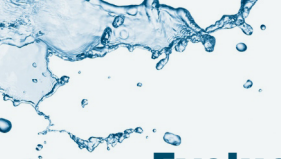
ce taux est plus élevé au Nord dans la nappe de Boulanouar-Bir El Guendouz qui s'étend aussi dans le sud du Maroc (près de Dakhla). Pour la Tunisie (2.1 Milliards m³), les ressources en eau souterraines renouvelables (nord du pays) sont totalement dépassées et puisent dans les réserves fossiles (139% au centre et 103% au sud).

En conclusion : Les risques liés au changement climatique prennent de plus en plus d'ampleur dans la région du Maghreb, et deviennent aujourd'hui une réalité. Le changement climatique et la perturbation du régime hydrique font du Maghreb une région très vulnérable avec des ressources en eau, non seulement limitées, mais aussi très irrégulières : ressources de plus en plus rares, de moins en moins d'apports d'eau mobilisables, plus d'érosion et d'envasement et de désertification, une salinité croissante des nappes dans les zones côtières, une baisse du niveau piézométrique des nappes phréatiques sans oublier la dégradation de la qualité de l'eau représentant une véritable menace pour le développement socio-économique de la région.

Face à cette situation, les pays du Maghreb doivent promouvoir une gestion des ressources en eau intégrant la dimension du changement climatique et visant non seulement l'utilisation optimale, économe et rationnelle de cette ressource, mais aussi sa préservation. A ce titre, tous les pays du Maghreb (sauf la Mauritanie) sont orientés vers l'utilisation des techniques non conventionnelles de mobilisation des ressources en eau, en particulier le développement d'un réseau d'usines de dessalement près des villes côtières, qui correspond bien aux attentes de la consommation domestique, voire l'irrigation de périmètres agricoles (cas du périmètre de Chtouka au Maroc).







Evaluation de la vulnérabilité des ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant

5.1. Approche méthodologique

L'objectif général de telle approche est de mesurer la vulnérabilité actuelle et future au changement climatique d'un bassin versant/ou une zone afin d'identifier des options d'adaptation et de renforcement de résilience pertinentes. Il s'agit en particulier de :

- Identifier les facteurs qui rendent actuellement le secteur vulnérable aux variabilités et changements climatiques y compris les événements extrêmes. Il s'agit d'évaluer les impacts biophysiques (ex : effet sur la qualité et quantité de l'eau) et les effets sur les secteurs et utilisateurs qui en dépendent (ex : population, agriculture, industrie, écosystèmes, etc.).
- Identifier les impacts potentiels du changement climatique futur (augmentation des températures, changement dans la distribution de la pluviométrie, etc.) sur les ressources en eau et les secteurs/utilisateurs qui en dépendent. Il s'agit de nouveau d'analyser les impacts biophysiques potentiels et de les combiner avec des projections des paramètres socio-économiques (taux de croissance de la population, stratégie de développement, évolution de la pauvreté, évolution du niveau d'éducation, etc.).
- Identifier les options d'adaptation qui puissent rendre les ressources en eau et les secteurs/utilisateurs qui en dépendent plus résilients aux impacts du changement climatique projetés, soit par une réduction de la vulnérabilité structurelle (réduire la vulnérabilité de l'accès à l'eau, diversification des sources de revenus, élever le niveau d'éducation, etc.), soit par une réduction de l'exposition biophysique aux impacts projetés (e.g. gestion intégrée des ressources en eau), ou soit par une combinaison des deux.

En effet, l'évaluation de cette vulnérabilité/analyse des risques au niveau d'un bassin versant peut être réalisée de deux façons :

1- La méthode classique dite « Top-Down » dont les principales étapes successives consistent en :

i. Descente d'échelle appliquée aux sorties de GCMs sélectionnés pour un ou plusieurs (de préférence) scénarios d'émissions afin de produire les données climatiques à échelle fine pour le bassin concerné. Cette étape est généralement réalisée par les climatologues ou les hydroclimatologues maîtrisant les techniques de descente d'échelle ;

- ii. Utilisation des projections climatiques issues de la descente d'échelle pour alimenter un modèle hydrologique/hydrogéologique du bassin en question afin d'évaluer les effets potentiels du changement climatique sur les ressources en eau du bassin (i.e. ruissellement, niveaux piézométriques, etc.). Ce travail est généralement réalisé par les hydrologues/hydrogéologues ;
- iii. Utilisation des résultats du modèle hydrologique/hydrogéologique pour conduire/alimenter un modèle de système de ressources en eau du bassin, et ainsi évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur des indicateurs de performance sélectionnés et représentant les conditions socio-économiques et environnementales du bassin associées au développement actuel et futur des ressources en eau... ;
- iv. Application du modèle du système des ressources en eau pour analyser et concevoir des options d'adaptation.

2- La méthode dite « Bottom-Up » qui comprend quatre étapes essentielles²²

- i. Identification des indicateurs de performance du système de ressources en eau, des risques et des seuils de risque ;
- ii. Évaluation des réponses du système aux changements climatiques (évaluation de la vulnérabilité) ;
- iii. Estimation de la plausibilité des aléas climatiques (informations climatiques adaptées) ;
- iv. Développement de stratégies d'adaptation et de voies pour la gestion des risques climatiques.

Il est important de noter qu'indépendamment de la méthode suivie, l'engagement de l'ensemble des parties prenantes est un facteur clé et l'étape d'institutionnalisation des décisions est primordiale. Cette dernière étape permettra de définir les plans d'actions et les mesures de mise en œuvre. Elle est considérée par certains experts comme étant l'étape 5 en complément des 4 étapes citées plus haut comme définie par Mendoza et al. (2018).

La méthode « Bottom-Up » est généralement recommandée dans le cas d'existences d'incertitudes significatives sur les conditions futures comme les sous-bassins du sud de la région maghrébine. La méthode classique peut être utilisée par exemple au niveau des sous-bassins à climat de type méditerranéens.

Afin de mettre en clair l'approche classique (souvent la plus fréquente), la figure 3 met en évidence les différentes étapes permettant le couplage des modèles climatiques avec les modèles hydrologiques/hydrogéologiques. Les

²² *Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA) UNESCO, 2018*

données climatiques (selon plusieurs scénarios d'émission de GES), qui peuvent représenter principalement les variables de précipitation, de température, d'évapotranspiration, sont produits par des modèles climatiques corrigés sur la base de séries chronologiques observées au niveau des stations du bassin versant considéré ou en utilisant d'autres sources de données (télédétection, réanalyses par exemple).

Ces données, output des modèles climatiques, serviront comme input aux modèles hydrologiques/hydrogéologiques déjà établis pour le bassin hydraulique ou la nappe considérée. Ainsi, les projections de températures seront intégrées dans ces modèles afin de servir, par exemple, dans la quantification de l'évapotranspiration potentielle et son évolution dans le temps au niveau du bassin et/ou la nappe. Conjointement avec les températures et éventuellement d'autres paramètres climatiques (i.e. humidité du sol), les projections des précipitations seront aussi intégrées dans ces modèles pour évaluer, le ruissellement et les débits au niveau du bassin, les volumes de recharge naturelle des nappes, etc. Ces paramètres, outputs des modèles hydrologiques/hydrogéologiques permettent d'établir le bilan et son évolution dans le temps et dans l'espace au niveau du bassin versant et/ou au niveau du système aquifère. Le gestionnaire disposera ainsi d'éléments clés comme les apports projetés (pour les années futures) aux retenues de barrages et les volumes d'eau/renouvelables/mobilisables dans la nappe. Ces informations sont d'une grande importance pour la planification de la gestion et l'exploitation des ressources en eau à l'échelle du bassin hydraulique, surtout en les confortant à la demande en eau et aux conflits d'utilisation.

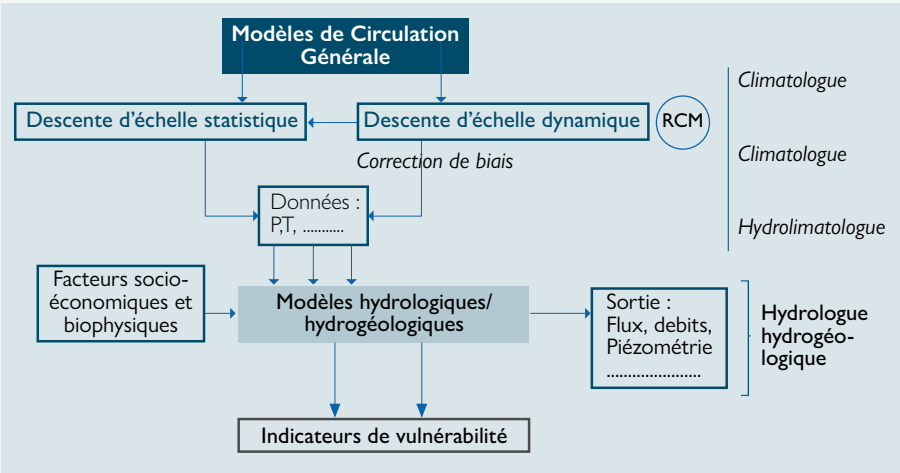


Figure 4 : Schéma synthétique de l'approche méthodologique de l'évaluation de l'impact du CC sur un système hydraulique et sa vulnérabilité

Puisque l'évaluation des impacts du changement climatique et de la vulnérabilité des ressources en eau est principalement basée sur les modèles climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques, il est utile de rappeler quelques notions sur leur définition et leur fonctionnement.

a. Les modèles hydrologiques conceptuels et processus de calage ainsi que les données requises (séries hydrologiques, climatiques, données physiographiques):

Modèles hydrologiques/hydrogéologiques

Un modèle hydrogéologique est une représentation mathématique des écoulements souterrains - par exemple un modèle représentant un aquifère, exploité par un forage, alimenté par la recharge et une eau de surface. Les différentes influences affectant le modèle (en l'occurrence : le forage, la recharge, l'eau de surface) sont traduites mathématiquement par des conditions aux limites. Entre les modèles hydrogéologiques et la réalité existent assez souvent de grandes marges de manoeuvre risquant de faire basculer le modèle dans l'erreur, l'imprécision, l'incohérence. Le modélisateur doit donc s'attacher à bien comprendre son problème (ou à bien définir son modèle conceptuel), à choisir le logiciel adéquat (2D, 3D, régime permanent ou transitoire, etc.), à définir les moyens de calage de son modèle, à effectuer ce calage et à valider son modèle (vérification de son modèle sur d'autres mesures que celles utilisées pendant le calage).

Les modèles spatialisés ou maillés sont incontournables pour la représentation des systèmes aquifères multi-couches. Ils ne peuvent cependant pas être utilisés pour tous les contextes hydrogéologiques, mais ils sont bien adaptés aux environnements sédimentaires (poreux et assimilés).

En plus de la définition générale donnée dans la section précédente, un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique). Les modèles hydrologiques doivent être capables de décrire les étapes de cette transformation pluie-débit, et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Les informations fournies aux décideurs telles que les débits sont exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, de protection contre les inondations ou pour la gestion hydrologique et écologique du bassin considéré.

Plusieurs approches ont été développées pour représenter la relation pluie-débit: les approches empiriques, les approches conceptuelles et les approches distribuées à base physique (Refsgaard et Storm, 1996). Le choix d'un type d'approche de représentation des processus conditionne particulièrement les autres caractéristiques d'un modèle hydrologique: un modèle hydrologique empirique ne nécessite pas de discrétisation spatiale des processus par exemple et est donc généralement global. Les modèles hydrologiques conceptuels cherchent à représenter les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Ce type de modèle est généralement constitué de réservoirs connectés entre eux, dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps et qui sont censés représenter les différents compartiments hydrologiques des bassins versants.

Un modèle hydrologique peut être classé selon la description du processus et selon la représentation de l'espace (global ou distribué). La discrétisation temporelle est choisie selon l'objectif recherché et la disponibilité des données d'observations, elle peut être journalière et même plus fine ou plus large (mensuelle, annuelle...). Cependant, le problème d'échelle influence la variabilité spatio-temporelle des processus hydrologiques, car certains prédominent seulement dans une gamme d'échelle. Comme ce processus hydrologique dépend de l'échelle spatiale et temporelle, nous pouvons alors raisonner que plus l'échelle spatiale est fine plus l'échelle temporelle doit être courte. Ce n'est pas toujours le cas pour l'infiltration en milieu non saturé.

Les modèles hydrologiques ont besoin de 2 types de données : les données en termes de séries hydrologiques (décrivant le processus hydrologique) en conséquence de séries climatiques (Input), et les données liées aux caractéristiques physiographiques du bassin qui influencent ce processus hydrologique. Bloschl et Grayson (2000) ont indiqué qu'il est toujours conseillé d'effectuer les mesures à une échelle adéquate permettant de représenter la variabilité naturelle du processus hydrologique. Mais, cela n'est pas toujours facile à mettre en œuvre dans la réalité étant données les contraintes techniques et financières.

Calage, validation et incertitudes

L'évaluation de la fiabilité des modèles hydrologiques/hydrogéologiques est généralement basée sur la comparaison des résultats du modèles avec les observations. En effet, le calage du modèle consiste à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée et donc réduire l'erreur entre les résultats simulés et observés. C'est une étape très délicate dans la modélisation hydrologique/hydrogéologique. Elle peut être effectuée manuellement par la procédure 'essai

et erreur', ou automatiquement par la procédure d'optimisation en cherchant la valeur optimale d'un critère donné (fonction-objectif) qui améliore la cohérence entre la réponse simulée et observée du bassin (Madsen, 2000).

La phase de la validation ou vérification du modèle hydrologique/hydrogéologique consiste à vérifier la reproductibilité des résultats et la représentativité des paramètres, ainsi calés. Le principe est basé sur le test du modèle sur une série de données indépendantes et qui n'ont pas été utilisées dans la phase de calage. Bien entendu, la réussite de cette phase dépend de la disponibilité des données.

Les phases de modélisation hydrologique/hydrogéologique, y compris les résultats finaux sont entachés d'incertitudes. Généralement, quatre types d'incertitudes ont été identifiés dans la modélisation hydrologique (Refsgaard et Storm, 1996) :

- Incertitude liée à la nature due à la variabilité spatio-temporelle du processus dans la nature (précipitations, températures...) ;
- Incertitude liée aux données (techniques d'acquisition, méthodes d'interprétation...) ;
- Incertitude liée aux paramètres du modèle ;
- Incertitude liée à la structure du modèle à représenter le processus physique réel.

Par conséquent, la paramétrisation des processus hydrologiques, afin de réduire l'incertitude, est un grand défi dans le domaine de la modélisation hydrologique/hydrogéologique et reste encore sujet de recherche à cause de la complexité des modèles et du grand nombre de paramètres à introduire.

b. Les modèles climatiques et descente d'échelle :

Les modèles climatiques sont nécessaires pour prédéterminer le climat futur. Ils demandent beaucoup de moyens de calcul (puissance informatique), ce qui impose généralement un compromis entre la résolution et le domaine de couverture. Les résultats des modèles climatiques mondiaux – dit modèles de circulation générale ou modèles globaux – ne sont pas suffisamment détaillés pour être directement utilisés dans les évaluations des impacts climatiques régionaux et locaux en raison de la grande taille des cellules de leurs grilles. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser les données issues de la descente d'échelle (downscaling). Ces informations sont produites généralement à l'aide des modèles régionaux de climat (descente d'échelle dynamique) –MRC qui permettent d'avoir les scénarii climatiques avec des résolutions allant de 10 à 50 km ; soit un niveau de détail répondant à ce qui est requis par la plupart des modèles hydrologiques/hydrogéologiques. Les informations climatiques

issues des MCR peuvent être affinées davantage par la descente d'échelle statistique si les données d'observation (i.e., précipitations, températures, etc.) sont disponibles et répondent aux critères de qualité, longueur et couverture spatiale à l'échelle du bassin.

La descente d'échelle statistique peut être aussi utilisée directement pour affiner les informations climatiques issues des GCM (sans passer par les MRC) mais il faudra pouvoir s'assurer de la validité de la méthode dans le climat futur (hypothèse de stationnarité), ce qui n'est pas évident et risque d'amplifier la marge d'incertitudes liées aux scénarii climatiques.

c. Les scénarios d'émission

Le climat futur dépend de la façon avec laquelle nous modifions la composition de l'atmosphère (CO₂, autres gaz, aérosols) et les propriétés du sol ; deux composantes principales du système climatique. Cela dépend à son tour de la croissance économique, du progrès technologique et des choix qui sont faits de limiter ou non les émissions. Les futurs possibles sont décrits par des scénarios, des manières plausibles dont le monde pourrait se développer et qui sont construites de façon à pouvoir étudier les conséquences du changement climatique et les choix pour le limiter.

Le cinquième rapport du GIEC (IPCC, 2013) a utilisé les trajectoires de concentration représentatives ('representative concentration pathways (RCP)'). Les RCP sont associés à des trajectoires de l'évolution des concentrations des différents gaz à effet de serre et de l'occupation des sols et sont nommés en fonction du niveau de forçage radiatif (W.m⁻²) autour de l'année 2100. Quatre types de scénarios ont été définis pour couvrir un large éventail d'avenirs possibles:

- RCP8.5 est un scénario de maintien du statu quo (business-as-usual) avec une augmentation des émissions de gaz à effet de serre au fil du temps, entraînant des niveaux de concentration de gaz à effet de serre élevés.
- RCP6.0 est un scénario de stabilisation dans lequel les émissions augmentent rapidement jusqu'en 2060 puis diminuent.
- RCP4.5 suppose une action plus rapide pour limiter les émissions de gaz à effet de serre avec des émissions culminant en 2040 et en forte baisse jusqu'en 2080.
- RCP2.6 décrit un effort total pour limiter le réchauffement climatique à moins de 2 °C, les émissions diminuant fortement après 2020.

Récemment, les voies socio-économiques partagées (SSP) sont développées comme base pour de nouveaux scénarios d'émissions suite aux développements

socio-économiques. Les scénarios socio-économiques sont utilisés pour dériver des scénarios d'émissions sans et avec les politiques climatiques. La figure 5 illustre les trajectoires socio-économiques partagées. La combinaison des SSP et RCP permet d'évaluer les impacts et les politiques climatiques. On parle ainsi de scénarios SSP5-8.5, SSP2-4.5, SSP1-2.6, etc. Les scénarios sont utilisés pour établir des projections de changement climatique (Fig. 6).



Figure 5 : Trajectoires socio-économiques partagées (SSP) ²³

SSP1	Durabilité	Faibles défis d'atténuation ou d'adaptation
SSP2	Milieu de la route	Défis intermédiaires
SSP3	Fragmentation	Défis importants à la fois pour l'atténuation et l'adaptation
SSP4	Inégalité	Faibles défis d'atténuation, mais défis d'adaptation élevés
SSP5	Développement conventionnel	Faibles défis d'adaptation, mais défis importants pour l'atténuation

²³ Kriegler et al., 2012

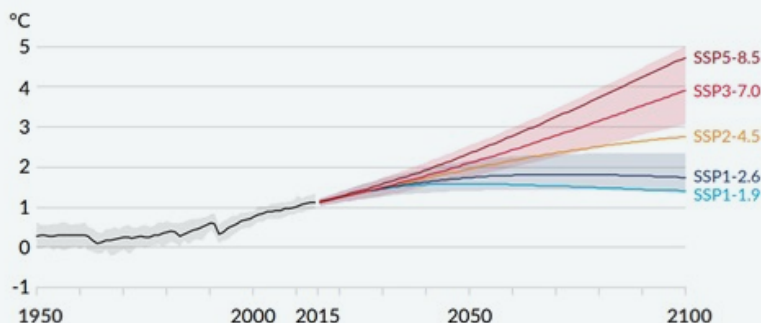


Figure 6 : Changement de la température moyenne globale par rapport à la période 1850-1900 en fonction des Scénarios ²⁴.

d. La correction de biais :

Avant leur utilisation par les modèles hydrologiques et hydrogéologiques, les informations climatiques issues des MRC doivent généralement être débiaisées en utilisant les méthodes de correction de biais. En effet, si les modèles climatiques peuvent reproduire de nombreuses caractéristiques climatiques observées, les simulations du climat ne correspondent pas exactement aux observations. En raison de la nature chaotique du système climatique et du fait que les modèles climatiques reposent sur des principes physiques et sont soumis à diverses hypothèses, l'incertitude est une caractéristique inévitable des projections climatiques. Il existe également des variations climatiques à petite échelle et même un modèle parfait (à la résolution de la grille) qui présenterait des différences de climat par rapport aux observations collectées au niveau d'un seul site.

Il existe différentes techniques de correction de biais ²⁵ permettant d'approcher au mieux les sorties des modèles aux observations et de réduire la marge des incertitudes des projections climatiques en entrée des modèles hydrologiques/hydrogéologiques. Il est important de noter qu'une méthode n'est ni nécessaire ni suffisante pour asseoir la confiance dans le potentiel des modèles à répondre convenablement au forçage anthropique et de considérer le degré de précision avec lequel les modèles reproduisent le climat.

.....

²⁴ IPCC (2021)

²⁵ Exemples de méthodes de correction de biais.

Les méthodes de correction de biais nécessitent des données d'observation suffisantes pour caractériser la climatologie de référence. La qualité des données observées affecte la qualité des données corrigées et la capacité du modèle climatique à représenter les processus physiques pertinents qui régissent la variable d'intérêt.

Il est à noter aussi que la plupart des méthodes de correction supposent que les causes des biais ne changent pas à l'avenir (hypothèse de stationnarité). La cohérence physique des différentes variables climatiques peut ne pas être maintenue si ces variables sont corrigées indépendamment. Par exemple, la correction de la température peut entraîner des valeurs inférieures à zéro, tandis que la pluie ne se transforme pas en neige.

La correction de biais constitue aussi une source d'incertitude à prendre en compte, en plus de celles provenant des données observées, des modèles, du scénario et du modèle d'impact.

e. Traitement des incertitudes dans l'évaluation des impacts :

Il existe plusieurs sources d'incertitude accompagnant l'évaluation des impacts du changement climatique. Celles-ci résultent d'incertitudes inévitables sur la nature de la société future se répercutant sur les émissions de GES (et d'aérosols), des incertitudes liées aux modèles climatiques et celles relatives aux modèles d'impact comme les modèles hydrologiques et hydrogéologiques. A ceux-ci s'ajoutent, pour l'évaluation des vulnérabilités, les incertitudes dans les changements socio-économiques impactant directement les ressources en eau (population, agriculture, industrie, etc.)

Ces sources d'incertitude conduisent à ce que l'on appelle communément la cascade d'incertitudes (Fig. 7).

- Pour couvrir la marge des incertitudes liées aux émissions, il est recommandé d'évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eau sous différents scénarios (RCP ou SSP-RCP).
- L'utilisation d'un ensemble multi-modèles permet d'estimer la marge d'incertitudes liées à la modélisation climatique (et la variabilité naturelle du climat). Il est donc important d'utiliser pour chaque scénario (RCP ou SSP-RCP) les projections climatiques issues de plusieurs modèles.
- L'utilisation de différents types de modèles hydrologiques/hydrogéologiques permet de comprendre les conséquences des incertitudes qui surviennent de ces modèles sur l'ampleur, l'étendue et le type des impacts simulés. Ceci est particulièrement important dans le cas des changements de climat s'étendent au-delà des conditions historiques pour lesquelles un modèle a été calibré et validé.

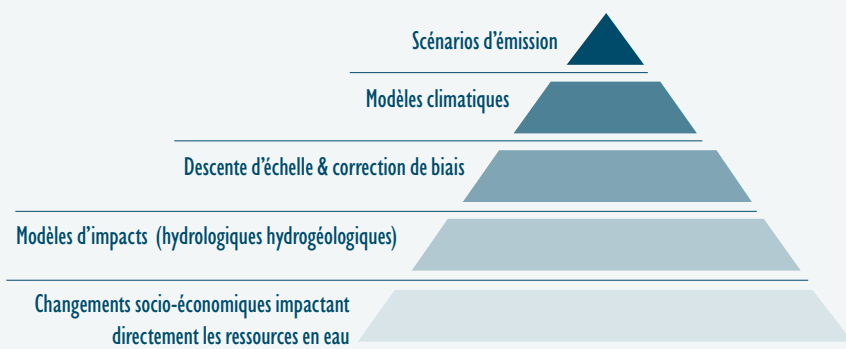


Figure 7 : Cascade schématisée d'incertitudes dans l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et leur vulnérabilité.

5.2. Construction de séries climatiques et évaluation des changements climatiques futurs à l'échelle d'un bassin versant

L'évaluation des impacts futurs des changements climatiques sur les ressources en eau d'un bassin versant nécessite la production de séries climatiques de paramètres météorologiques (voir section 5.1) pour alimenter les modèles hydrologiques/hydrogéologiques. Ces séries sont issues de descente d'échelles dynamiques (avec correction de biais préférablement) et/ou statistiques appliquée aux modèles de circulation générale. Ces séries doivent couvrir une période passée - dite période de référence- et une période future correspondant à l'horizon ciblé. Ces périodes sont généralement de 2 à 3 décennies chacune. La comparaison des climats des deux périodes permettra d'estimer les changements projetés (en termes de précipitations, températures, etc.) au niveau du bassin versant.

L'utilisation d'ensemble multi-modèles (GCM-RCM) sous différents scénarios d'émissions permettra d'évaluer les marges d'incertitudes au niveau des changements du climat projetés pour le bassin ainsi que celles relatives aux impacts sur les ressources en eau.

Où trouver les sorties de modèles climatiques ?

- Les Services et Centres de recherches nationaux (Services météorologiques, centres de recherche universitaires, etc.) peuvent produire les données des modèles climatiques à des résolutions fines compatibles avec les besoins de l'évaluation des impacts sur les ressources eau.

- Un certain nombre de sorties de modèles régionaux de climat (RCM) sont disponibles à travers des expériences internationales comme CORDEX²⁶. Les données climatiques issues de ces descentes d'échelles dynamiques ont généralement des résolutions de 50km (i.e. CORDEX-Africa, CORDEX-MENA) à 12 km (EURO-CORDEX, une partie de CORDEX-MENA). Elles peuvent en principe être utilisées pour alimenter les modèles hydrologiques et l'évaluation des changements climatiques à l'échelle d'un bassin versant. La correction de biais est cependant souhaitable. Une descente d'échelle statistique peut s'avérer nécessaire dans le cas de besoin de plus haute résolution ou en cas de petit bassins versants.
- L'expérience internationale CMIP ²⁷ permet de mettre à disposition les sorties de plusieurs modèles de circulation générale. Celles-ci peuvent servir pour l'application de descente d'échelle dynamique (utilisant les modèles climatique) ou statistique afin d'avoir des séries climatiques à des résolutions compatibles avec ce qui est demandé pour l'échelle d'un bassin versant et l'évaluation d'impacts sur les ressources en eau.
- D'autres sites offrent des services de mise à dispositions de données des modèles de CMIP, CORDEX ou autres comme, à titre d'exemple, le Centre de distribution de données du GIEC ²⁸, COPERNICUS ²⁹, l'initiative RICCAR ³⁰, etc.

Format des données de modèles climatiques :

- Les données des modèles climatiques sont très volumineuses (i.e. fichiers de plusieurs Go) et exigent l'utilisation de formats particuliers qui ne sont pas forcément connus des non-spécialistes. Parmi les formats les plus utilisés il y a le format netCDF ³¹ qui est un format binaire destiné principalement à stocker des tableaux de nombres multi-dimensionnels (i.e. les séries de données de précipitations sur une grille bidimensionnelle). Il est auto-descriptif et informe sur son contenu à travers la liste de métadonnées qu'il contient (i.e. les dates et périodes, les coordonnées, les unités de mesure, etc.). Les tableaux de données sont stockés de façon à permettre un accès efficace à une sous-partie d'un tableau. Le format est indépendant de l'architecture matérielle (la machine) et fonctionne avec différentes plateformes (Linux, Windows, Mac, Clusters). Divers outils existent pour lire, écrire, modifier et visualiser les fichiers netCDF³²,

.....
²⁶ Cordex – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

²⁷ CMIP (wcrp-climate.org)

²⁸ IPCC (ipcc-data.org)

²⁹ About C3S | Copernicus Climate Data Store

³⁰ Home | RICCAR

³¹ Network Common Data Format.

³² *ncdump, ncview, panoply, nco, cdo, etc.*

mais nécessitent un minimum de connaissances en informatique scientifique. En cas de besoin, il peut y avoir recours à un spécialiste du domaine pour extraire les données dont l'hydrologue/hydrogéologue a besoin, les traiter et les mettre en format souhaité.

5.3. Evaluation des impacts futurs sur les ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant

Afin d'analyser et évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eau à l'échelle d'un bassin versant, les modèles hydrologiques et hydrogéologiques sont des outils efficaces lorsqu'ils sont associés/combinaison aux outputs des modèles climatiques (séries de projections climatiques générées par les modèles climatiques : précipitations, températures...). Ainsi, en plus des inputs communément utilisés par les modèles hydrologiques/hydrogéologiques, les séries de projections climatiques issues des modèles climatiques et selon des scénarios RCP bien choisis et bien adaptés aux sites d'étude sont aussi introduites (par ex : RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 pour le Maghreb et pour des horizons à des intervalles de 20 ans jusqu'à la fin du siècle). Les outputs des modèles hydrologiques et hydrogéologiques sont présentés sous forme de séries hydrologiques, piézométriques ou sous forme de cartes thématiques facilement exploitables par l'utilisateur final ou le décideur. A ce titre, il est utile de noter que les modèles climatiques fournissent généralement des simulations jusqu'en 2100 (certains vont au-delà), soit à grande échelle (modèles de circulation globale) ou à l'échelle régionale (modèles climatiques régionaux). Il est aussi nécessaire d'analyser les résultats des modèles climatiques avant de les utiliser directement dans les modèles hydrologiques, car les échelles spatiales ne sont pas compatibles ou en raison d'un biais systématique dans les résultats du modèle, en particulier pour les précipitations. Par conséquent, les techniques de descente d'échelle ou de correction de biais doivent donc être appliquées avant de réaliser de futures projections hydrologiques.

5.4. Exemples d'études

Exemple 1 : Eaux de surface

Tramblay et al. (2016) ont réalisé une étude portant sur l'évaluation des impacts potentiels du CC sur l'hydrologie de certains bassins hydrographique du Maghreb, et plus précisément au Maroc et en Tunisie, dans le cadre du projet ENVIMED-CLIH MAG.

Les données observées nécessaires pour exécuter le modèle hydrologique utilisé pour traiter ces problèmes provenaient de divers bassins versants représentatifs. Ceux-ci incluent le Bassin de Loukkos (1785 km²), en amont du barrage d'Oued

Makhazine dans le nord du Maroc et le bassin versant d'El Abid (4980 km²), en amont du barrage Bin Ouidane (plus grande production hydroélectrique du Maroc), et en haute altitude (à 4167m) Bassin versant de Rheraya (225 km²) en amont du bassin versant de Tensift au sud du Maroc. En Tunisie, les bassins versants sélectionnés sont représentatifs des principaux bassins hydrographiques qui produisent la plupart des ressources en eau de surface. Ils incluent le bassin versant du Rhezala (138 km²) dans le bassin de la Medjerda, en amont du barrage de Sidi Salem (le plus grand de Tunisie), la Sejnane (376 km²), Joumine (231 km²), Melah (315 km²) et Maaden (145 km²) dans le nord et les bassins d'Ichkeul et le bassin versant d'El Abid (81 km²) dans la région du Cap Bon.

Généralement, deux types de données de simulations climatiques sont disponibles pour les études sur les impacts du changement climatique ; celles issues des modèles de circulation générale (GCMs) tournés à faibles résolutions (100-300 km) ou celles issues des modèles climatiques régionaux (RCMs), pilotés aux limites de leurs domaines par les GCM et tournés à des résolutions plus fines (12-25 km). Dans le cadre d'expériences internationales de descente d'échelle au niveau régional (i.e. CORDEX, www.cordex.org), les simulations des RCMs à une échelle spatiale fine (12 km) deviennent disponibles pour la plupart des régions du monde. Ainsi, une partie de l'Afrique du Nord est couverte à la fois par les domaines EuroCORDEX et MedCORDEX sur lesquels plusieurs modèles ont été tournés à haute résolution (12 km). Cette fine échelle spatiale permet aux processus orographiques d'être mieux représentés et améliore la simulation d'événements pluviométriques extrêmes, qui contribuent significativement aux précipitations totales dans les zones semi-arides. Cependant, malgré des améliorations dans les modèles grâce à une résolution spatiale plus fine, les quantités de précipitations sont généralement mal-estimées par les modèles et ne peuvent être utilisées directement dans les modèles hydrologiques qu'après descente d'échelle et et/ou une correction de biais pour réduire l'écart entre les résultats du modèle et les observations, généralement pris comme moyennes ou interpolés à l'échelle du bassin versant pour les applications hydrologiques.

Les impacts projetés sur les ressources en eau des bassins étudiés ont été analysés à l'aide d'un ensemble de simulations de résolution moyenne (50 km) et élevée (12 km) de l'expérience EuroCORDEX et MedCORDEX et selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Sur le plan climatique, les résultats à l'échelle régionale ont confirmé ceux des études précédentes indiquant une augmentation générale de la température associée à une diminution des précipitations (Bargaoui et al., 2014). Cependant, les simulations à haute résolution ont permis de mieux caractériser spatialement les changements projetés. Comme le montre la figure 8, les changements relatifs

aux précipitations suivent un gradient clair d'Est en Ouest avec les précipitations qui devraient diminuer de 10% en moyenne dans les bassins du nord de la Tunisie contre une baisse de 40% dans le sud du Maroc. Au contraire, les changements projetés de températures sont beaucoup plus homogènes en Afrique du Nord et dépendent principalement des différents scénarios d'émissions considérés (RCP 4.5 et RCP 8.5).

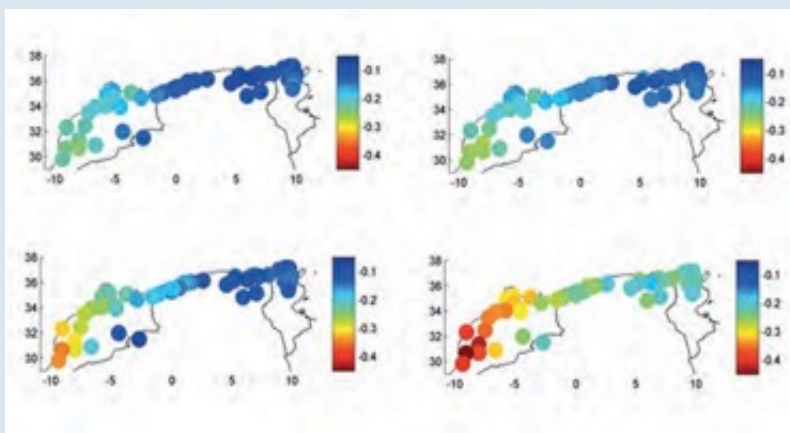


Figure 8 : Changements futurs des précipitations dans les 47 principaux bassins versants en Afrique du Nord, simulés par le modèle climatique régional SMHI-RCA4 piloté par 5 modèles climatiques globaux (CNRM, IPSL, HADGEM, ECEARTH, MPI) sous les scénarios d'émissions RCP 4.5 (ligne haute) et RCP 8.5 (ligne basse). Les valeurs correspondent à la moyenne multi-modèles (Tramblay et al., 2016).

Sur le plan hydrologique, le changement dans les précipitations aura le plus fort impact sur les ressources en eau, les bassins versants nord-africains étant plutôt limités en eau que limités en énergie. Ainsi, l'impact hydrologique des changements projetés a été aussi évalué et analysé à l'échelle des bassins versants représentatifs du Maghreb. Les résultats obtenus sont illustrés par un exemple de ruissellement projeté pour un bassin versant situé au centre du Maroc (Figure 9). Pour les bassins situés dans les zones les plus humides, couvrant le nord du Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie, la tendance du changement climatique est vers une réduction de 10% à 20% des précipitations, pour le moyen terme (2040-2065), et pour le scénario RCP 4.5, et pour la plupart des saisons, il est difficile de faire la distinction entre le changement climatique, la variabilité naturelle dans les incertitudes de modélisation. Cependant, pour le scénario

d'émission le plus intense (RCP 8.5), la situation est sévère quant aux apports futurs des eaux de surface en hiver et au printemps à l'échelle du Maghreb. A l'inverse, dans les bassins enneigés principalement situés dans les montagnes de l'Atlas du sud du Maroc (Marchane et al., 2016), un climat beaucoup plus sévère dû au changement climatique indiquant une diminution importante du ruissellement au printemps associée à une couverture de neige réduite. Cela pourrait avoir de graves conséquences puisque ces régions arides dépendent, dans une large mesure, des ressources en eau fournies par ces chaînes de montagnes.

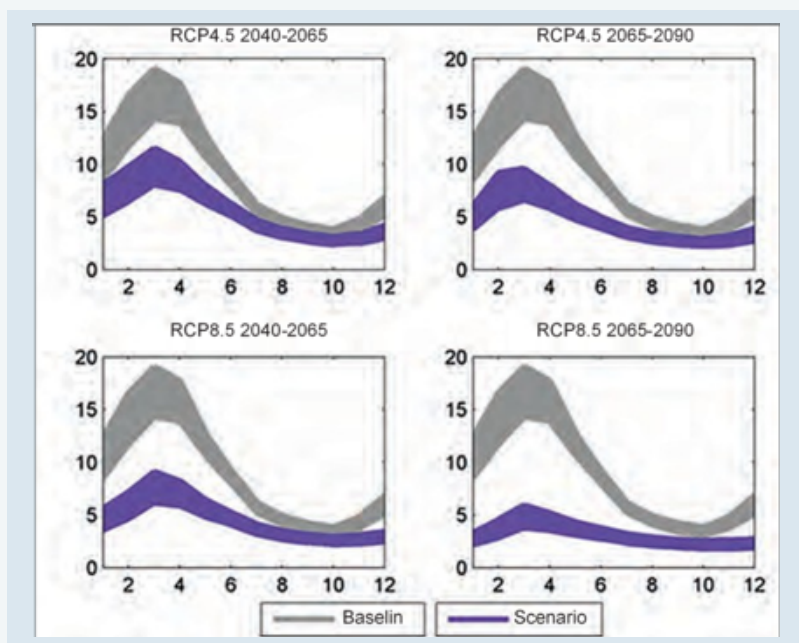


Figure 9 : Changements futurs du ruissellement mensuel moyen du barrage de Bin Ouidane (sud du Maroc). La largeur de bande indique l'incertitude sur les projections du modèle (simulée par le modèle climatique régional SMHI-RCA4 et forcé aux bords par 5 modèles climatiques globaux: CNRM, IPSL, HADGEM, ECEARTH, MPI). Les valeurs correspondent à la moyenne multi-modèles pour le scénario RCP4.5 (ligne grise) et RCP 8.5 (ligne bleu) (Tramblay et al., 2016).

Exemple 2 : Eaux de surface/neige (Bassin Rheraya-Marrakech, Maroc)

Un autre exemple de bassin hydrologique a été aussi étudié par Marchane et al. (2017) pour évaluer les changements potentiels sur la quantité d'eau disponible dans le bassin versant montagneux Rheraya (situé près de Marrakech). Deux modèles de bilan hydrique mensuel (GR2M et MWBM), y compris un module de neige, ont été considérés pour reproduire le ruissellement de surface mensuel pour la période 1989-2009. Un ensemble de 5 modèles climatiques régionaux (RCM) fournis par le programme Med-CORDEX sont considérés pour simuler des scénarios futurs de prévisions des débits. Les projections des 5 RCMs selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ont montré une hausse des températures ($+1.4^{\circ}$, $+2.6^{\circ}$) conjointement à une baisse des précipitations totales (-22% à -31%). La modélisation hydrologique par 2 modèles a montré que les prévisions des débits (2041-2062) présenteraient une forte diminution du ruissellement de surface, surtout au printemps allant de -19% à -63% (Figure 10) et des baisses significatives des niveaux des réservoirs enneigés, liées à la diminution des précipitations et l'augmentation de la température.

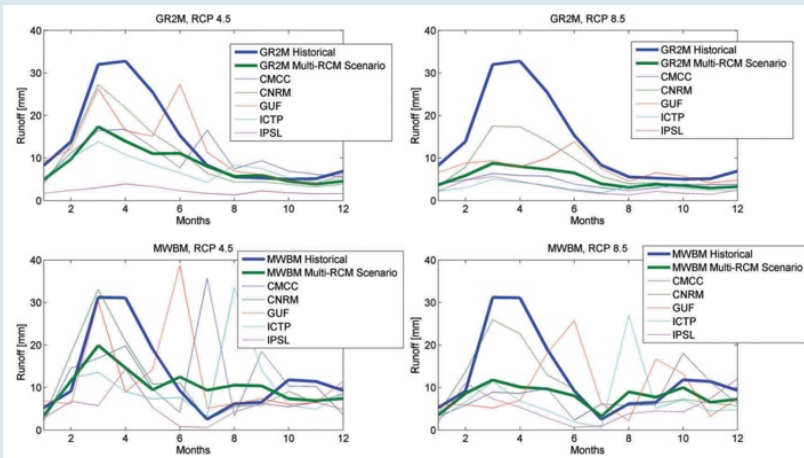


Figure 10 : Changements projetés dans le ruissellement dans le bassin Rheraya à partir de cinq simulations RCM pour la période future 2049-2065 (Marchane et al., 2017).

Exemple 3 : Eaux souterraines (Nappe de Béni Amir-Tadla, Maroc)

Une étude a été réalisée par Larabi (2020) pour évaluer les impacts du changement climatique sur la disponibilité et l'utilisation des ressources en eau souterraine dans le système aquifère de Tadla (Maroc), qui alimente en eau domestique ainsi que les grands périmètres d'irrigation dans la zone agricole de Beni Amir. L'étude pilote est basée sur les projections de l'Initiative régionale pour l'évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et la vulnérabilité socio-économique dans la région arabe (RICCAR) (ESCWA, 2017).

La méthodologie est basée sur un modèle conceptuel tridimensionnel des eaux souterraines, qui simule un ensemble complet de processus physiques. Le modèle a été calibré et vérifié avec des observations. Ensuite, les résultats de trois modèles climatiques sélectionnés par RICCAR ont été intégrés dans le modèle des eaux souterraines pour simuler l'impact du CC sur les eaux souterraines de 2020 à 2100. Le forçage anthropique et climatique basé sur deux scénarios, RCP 4.5 et RCP 8.5, a été mis en œuvre afin de projeter les impacts du CC sur le système des eaux souterraines et les impacts à long terme sur les ressources en eau et les cultures.

Les principaux résultats de cette étude confirment que les ressources en eau souterraine de l'aquifère de Tadla seront affectées par le CC en raison d'une réduction de la recharge naturelle due aux précipitations (20% de moins à la fin du siècle pour le RCP 4.5; et 50% de moins pour le RCP 8.5) et l'augmentation de l'évapotranspiration causée en partie par des températures plus élevées (augmentation de 2 °C pour le RCP 4.5 et augmentation de plus de 4 °C pour le RCP 8.5 à la fin du siècle), ce qui se traduit par une réduction du bilan hydrique accompagnée d'un déclin de la nappe phréatique pour les deux scénarii variant de 10 m pour le RCP 4.5 à plus de 25 m pour le RCP 8.5, ce qui rend certaines zones aquifères complètement sèches (Fig. 11).

Ces résultats sont d'une grande importance en tant qu'informations clés pour les décideurs concernant l'avenir de l'exploitation durable des ressources en eaux souterraines dans l'aquifère. En effet, les résultats du scénario RCP 8.5 présentent une grande inquiétude pour l'avenir de l'agriculture irriguée dans la zone d'étude puisque certaines exploitations seraient abandonnées en raison de l'indisponibilité des eaux souterraines. En revanche, les résultats du scénario RCP 4.5 sont moins sévères mais nécessiteront une gestion rationnelle et économique des ressources en eau.

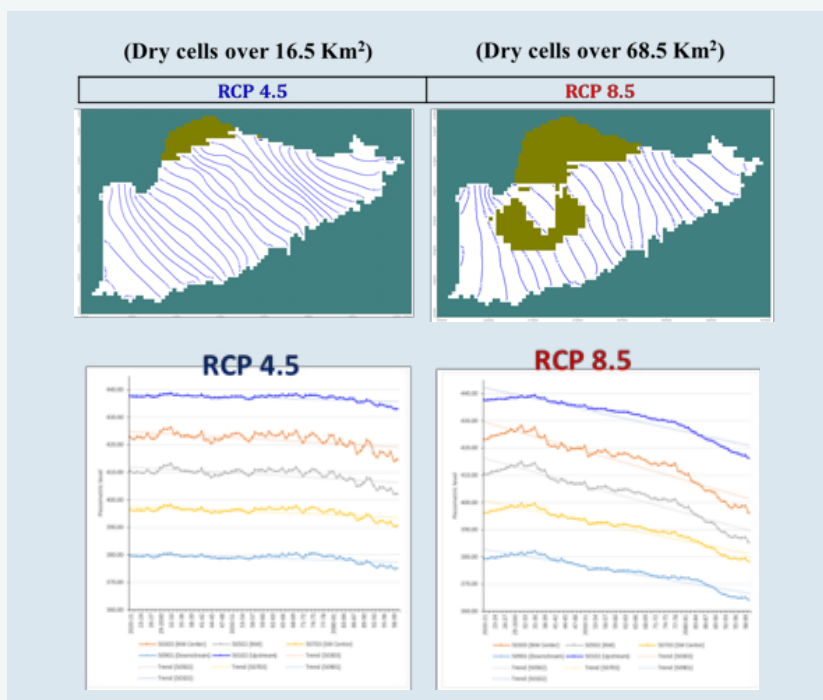
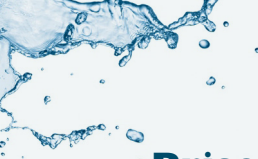


Figure 11 : Nappe de Béni-Amir dans le bassin d'Oum Er-Rbia : Tous les puits de pompage traversant la première couche seront séchés, ainsi que sur une superficie de 68,5 km² de la 2ème et 13 km² de la dernière couche pour le RCP 8.5. Tous les piézomètres de la nappe affichent une tendance générale à la baisse pour les 2 RCPs (Larabi, 2020).

Des mesures d'adaptation qui tiennent compte de ces impacts du CC sur les ressources en eaux souterraines, en particulier pour améliorer la productivité dans le secteur agricole, sont nécessaires de toute urgence, telles qu'une reconversion extensive de l'irrigation par gravité en irrigation goutte à goutte et des cultures adaptées qui sont économes en eau et plus résilientes au changement climatique.

Afin d'évaluer l'impact du CC sur les ressources en eau au Maroc, plusieurs travaux d'études et de recherche ont été réalisés et concernent plusieurs régions pour évaluer l'évolution des bilans hydriques, ainsi que leurs termes tels que la recharge naturelle ; en plus des chroniques/cartes piézométriques, l'extension du biseau salé et les volumes d'intrusion marine envahissant les eaux douces (Larabi (2021) ; El Hamidi et al. (2021a) ; Larabi et al. (2021b) ; El Asri et al. (2021) ; El Hamidi et al. (2020) ; Ait Oubaha et al. (2020) ; El Asri et al. (2020); Larabi et al. (2020a) ; Larabi et al. (2020b) ; Larabi et al. (2020c); El Asri et al. (2019) ; Zhim et al. (2019) ; Larabi et al. (2017)).





Prise en compte du changement climatique dans la gestion et la planification

A travers les 3 exemples Maghrébins traités dans la section précédente, on se rend bien compte des impacts produits par le changement climatique sur les ressources en eau en termes d'apports d'eaux de surface et/ou en eaux souterraines. Par conséquent, en disposant de ces informations clés, les parties prenantes/décideurs (Agences de Bassins, offices d'irrigation, Office d'AEP, etc.) seront capables de prendre en compte le CC dans la gestion et la planification des ressources en eau, par exemple à l'échelle d'un bassin hydrographique, mais également pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Ainsi, cette prise en compte du changement climatique pourrait avoir des répercussions positives sur la gestion des ressources en eau, les infrastructures hydrauliques et les ouvrages d'assainissement.

Selon la toute dernière évaluation du GIEC, le climat devrait devenir encore plus chaud et plus sec dans la région du Maghreb. Des températures plus élevées et des précipitations réduites augmenteront la fréquence des sécheresses, un effet qui se matérialise déjà dans les 3 pays du Maghreb tous exposés au stress hydrique. Ce qui est susceptible d'entraîner une pression accrue sur les ressources en eaux souterraines, qui sont actuellement exploitées dans la plupart des zones au-delà du potentiel de recharge des aquifères. En outre, les rendements agricoles, en particulier dans les zones pluviales, devraient fluctuer plus largement, tombant finalement à une moyenne à long terme nettement inférieure. Dans les zones urbaines, une augmentation de la température de 1 à 3 degrés pourrait exposer 6 à 25 millions de personnes aux inondations côtières (IPCC, 2021). De plus, les vagues de chaleur, l'augmentation de l'« effet d'îlot de chaleur », la rareté de l'eau, la baisse de la qualité de l'eau, la détérioration de la qualité de l'air et la formation d'ozone au sol sont susceptibles d'affecter la santé publique, et plus généralement de conduire à des conditions de vie difficiles. En effet, Les modèles prévoient que le niveau de la mer augmentera d'environ 0,1 à 0,3 mètre d'ici 2050, et d'environ 0,1 à 0,9 mètre d'ici 2100. Par conséquent, il est nécessaire que les pays du Maghreb agissent rapidement par l'élaboration d'un programme d'adaptation à court, moyen et long terme :

- Investissements dans les infrastructures en ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles. Les projets devront être implantés, conçus et mis en œuvre de manière à minimiser leur vulnérabilité au changement climatique. En outre, le renforcement de la résilience climatique exigera aussi l'intensification

des investissements prévus dans ces infrastructures par l'implication des secteurs public et privé. Cependant, un renforcement des connaissances du CC doit être requis, car une conception adéquate des interventions d'adaptation nécessitera une meilleure connaissance du timing, du lieu et de l'ampleur des impacts, ainsi que l'identification des options les moins coûteuses pour minimiser ces impacts.

- Réforme des politiques et des institutions. Des progrès significatifs en matière d'adaptation peuvent être introduits en améliorant le cadre politique et incitatif. Par exemple, des réformes fiscales peuvent encourager une utilisation plus efficiente des terres, de l'eau et des ressources énergétiques, favorisant ainsi leur affectation à des utilisations plus résilientes au CC et libérant des fonds publics précieux qui pourraient être utilisés pour protéger les groupes sociaux les plus vulnérables.

Le dimensionnement et le fonctionnement des réservoirs et des réseaux devraient ainsi être modifiés en prenant en compte des scénarii de changement climatique. Par exemple en Méditerranée, un modèle de dimensionnement coût-bénéfice d'un réservoir à l'échelle du bassin versant a été utilisé en Grèce afin d'évaluer le coût de l'incertitude sur le climat futur et les dommages du changement climatique. Dans cette étude de cas, le coût de l'erreur est faible, et l'adaptation n'est pas efficace (Nassopoulos, 2012). Une méthodologie sur toute la région du Maghreb, avec une modélisation générique à l'échelle des bassins versants doit être développée. Elle permettra de reconstruire les réseaux de réservoirs et les liens réservoirs-demandes et déterminera le fonctionnement des réseaux de réservoirs et ce, en utilisant uniquement des données disponibles à l'échelle globale. Cependant, il est préférable de se référer à l'approche CRIDA (Climate Risk Informed Decision Analysis) afin de déterminer les actions d'adaptation les plus appropriées en tenant compte de leurs effets, y compris les effets secondaires.

La méthodologie de reconstruction des liens précités a été appliquée à l'irrigation et validée qualitativement sur l'Algérie. Le changement de fiabilité, avec adaptation des règles opérationnelles, sous changement climatique, semble être plus influencé par les changements de ruissellement que par les changements de demandes. Les changements obtenus pour d'autres régions voisines (Nil, Europe) ne sont pas très marqués, alors que les pays du Maghreb, sous influence du changement climatique, enregistrent une diminution importante de la fiabilité des apports d'eau pour l'irrigation (Nassopoulos, 2012).

Les épisodes soudains de fortes précipitations, comme enregistré ces dernières années au Maghreb, peuvent également mettre à mal les réseaux d'assainissement qui voient leurs capacités de transit dépassées. C'est le cas de la ville de Casablanca qui a subi ces dernières années plusieurs inondations, à cause notamment du développement de l'urbanisation qui a occupé toute la partie aval du bassin versant de l'oued Bouskoura, malgré le détournement des eaux pluviales de crues via des canaux d'assainissement et de délestage pour déverser les eaux de crue dans la mer. D'où l'intérêt d'un dimensionnement adéquat, tenant compte du changement climatique. De même que pour toutes les études de dimensionnement des barrages, il est nécessaire de se référer aux modèles climatiques et les bases de données qu'ils mettent à la disposition des ingénieurs et des scientifiques, en particulier celles en rapport avec les températures et les précipitations afin de les exploiter pour la prédétermination des crues qui pourraient être générées. Ces dernières sont très importantes pour la détermination des débits de pointe qui peuvent se produire et auxquels les ouvrages hydrauliques peuvent résister. Ces données climatiques joueront donc un rôle important, et pour le bon dimensionnement des barrages et pour une bonne planification et exploitation des ressources en eau à différentes utilisations, en particulier pour connaître la recharge naturelle des nappes et son évolution dans le temps et l'espace.

Par conséquent, la réussite de la mise en œuvre des projets socio-économiques liés aux ressources en eau en termes d'optimisation de coûts dépend beaucoup de la prise en compte de l'impact du changement climatique. Seulement, cette prise en compte du changement climatique dans l'évaluation des ressources en eau doit couvrir les deux aspects quantitatif et qualitatif affectés par le CC. Elle devrait reposer sur les principaux points suivants :

- Améliorer la compréhension du changement climatique dans tous ces aspects, et en particulier en ce qui concerne le réseau de mesures ou d'observations au niveau du bassin, l'établissement d'une base de données climatiques, choix de la période de référence, les scénarios adoptés, modèles GCMs/RCMs et surtout les méthodes de descente dans l'échelle (downscaling) ;
- Développer les modèles hydrologiques/hydrogéologiques et leur couplage avec les données output des modèles climatiques, surtout pour les projections ;
- Exploiter les résultats de ces modèles pour évaluer les impacts futurs quant à la prise de décision au niveau des phases de planification et de gestion des ressources en eau au niveau du bassin ;

- Evaluer la vulnérabilité des ressources en eau au changement climatique : impacts sur les ressources en eau et sur les différents usages (allocations, consommations, eau potable, irrigation, hydroélectricité, débit écologique, etc.);
- Elaboration de la gestion adaptive de l'eau par des stratégies de rationalisation et de développement de l'eau à partir des ressources non conventionnelles afin de surmonter les conflits d'utilisation sous la contrainte du changement climatique (zones côtières, zones montagneuses, zones rurales, zones urbaines, etc.) ;
- Renforcement de la capacité des gestionnaires de l'eau en CC et en adaptation.

Cependant, les estimations des changements futurs à l'échelle d'un bassin donné, ainsi que de leurs impacts dépendent de la résolution des modèles climatiques utilisés et de l'utilisation ou non de modèles hydrologiques adaptés. Par conséquent, l'affinement des résultats et des informations qui en découlent pour un meilleur appui à l'adaptation, nécessite entre autres ³³:

- L'utilisation d'approches multi-modèles climatiques avec descente d'échelle pour l'évaluation des changements futurs à l'échelle du bassin.
- L'évaluation fine des évolutions passées et futures des extrêmes pluviométriques et des risques associés en termes d'inondations et de sécheresse.
- L'extension de l'évaluation des impacts pour inclure les aspects liés à la répartition intra-annuelle, aux extrêmes et aux eaux souterraines.

Enfin, la prise de décision en matière des ressources en eau requiert de disposer d'éléments clés par rapport à la disponibilité de ces ressources dans le temps et dans l'espace dans un bassin hydrographique. Cette disponibilité dépend beaucoup de la variabilité climatique et du changement climatique qui doit être intégré dans la gestion des ressources en eau d'une manière générale selon le schéma de l'approche méthodologique développée dans la section 5 de ce rapport.

Quant au renforcement de la capacité en CC et adaptation, un rapport réalisé par la Banque mondiale en 2009 donne un aperçu relativement intéressant des options d'adaptation du CC pour des thèmes sous forme de tableau en relation avec la gestion des ressources en eau. Ci-dessous une brève description des problèmes rencontrés en ressources en eau qui définissent les groupes d'options d'adaptation, ainsi que les adaptations appropriées qui les correspondent :

.....
³³ Driouech (2019)

Options d'adaptation : Renforcement de la capacité d'adaptation (Banque mondiale, 2009)

Groupe d'options d'adaptation	Adaptations
Capital social : Ces options visent à permettre aux communautés de comprendre le climat et les risques hydrologiques et participer activement aux réponses à la gestion.	• Éducation et formation - pour améliorer la compréhension de la communauté et des parties prenantes des risques climatiques et leur capacité à participer aux réponses de la gestion et / ou à générer, modifier ou appliquer adaptations. • Gouvernance - déléguer un certain niveau de responsabilité de la planification et de la gestion de l'eau aux communautés locales pour accroître «l'appropriation» locale des problèmes et des réponses. • Partage d'informations - lancer des processus de partage d'informations sur les risques climatiques et les réponses au sein et entre les communautés vulnérables.
Informations sur les ressources : Rassembler et fournir des informations sur les risques climatiques et les systèmes hydrauliques gérés.	• Comprendre le climat - analyse des informations historiques et paléoclimatiques pour comprendre les facteurs naturels de la variabilité climatique. • Projections du changement climatique - élaboration de projections de changement climatique à échelle réduite pour la zone d'intérêt. • Quantifier le système hydrique - comprendre l'échelle et les caractéristiques du bassin/aquifère (s); les processus d'écoulement, de recharge, de transmission et de décharge; bilan hydrique (y compris l'utilisation); la qualité d'eau, etc. • Suivi, évaluation et rapports - de l'état des ressources en eau.
Recherche & Développement : Activités de recherche et développement pour améliorer l'efficacité des réponses adaptatives au CC et la variabilité hydrologique.	• Évaluations de l'impact du climat - études pour mieux définir la nature des impacts du changement climatique projeté sur le système hydraulique et les risques climatiques et hydrologiques associés. • Gestion de la recharge des eaux souterraines - méthodes. • Gestion du stockage des eaux souterraines - technologies, gestion de l'eau et autres pratiques à maximiser la capacité de stockage des eaux souterraines et la disponibilité des ressources. • Protection de la qualité de l'eau - technologies et systèmes de gestion pour permettre le traitement et la réutilisation d'eau contaminée et éviter la contamination d'une eau de meilleure qualité par une eau de moindre qualité. • Protection des aquifères insulaires et côtiers contre les effets de l'élévation du niveau de la mer. • Gérer la demande d'eau souterraine - technologies et pratiques de gestion qui: améliorent l'efficacité des utilisations urbaines et agricoles de l'eau; réduire les exigences de qualité de l'eau utilisations non potables; ou réduire le besoin en eau.

Gouvernance et institutions : Améliorer la gouvernance et les arrangements institutionnels pour la gestion des ressources en eau. Amélioration des régimes de planification pour les ressources en eau, les humains associés et les systèmes naturels.	• Gestion conjointe des eaux de surface et des eaux souterraines dans les zones rurales. Gestion intégrée du cycle de l'eau (y compris diverses sources potables et non potables dans les zones urbaines). • Planification multi-juridictionnelle et dispositions de gestion des ressources pour les systèmes aquifères transfrontaliers à grande échelle. • Définir les allocations d'eau en fonction de la part des ressources plutôt que du volume. • Établir et réglementer des normes pour (par exemple) la planification des ressources en eaux souterraines et de l'utilisation des terres, la gouvernance de l'eau, la gestion de l'environnement. • Planification de la réponse à la sécheresse.
Marchés: Mise en place et fonctionnement des marchés de l'eau et les services environnementaux associés.	• Marchés - établissement et fonctionnement des marchés et commercialisation de l'eau dans un système hydraulique. Marché pour déterminer le prix de l'eau. • Droits de propriété - établir clairement le titre et les droits de propriété sur les ressources en eau.

Exemple 1 d'adaptation : Gestion des eaux d'irrigation dans un bassin

Ce premier cas concerne le bassin hydraulique d'Oum Er Rbia qui compte la moitié de l'agriculture irriguée du Maroc en produisant 60% de ses betteraves sucrières, 40% de ses olives et 40% de son lait. Au cours de la dernière décennie, les régimes pluviométriques inférieurs aux prévisions, ont réduit l'eau d'irrigation disponible à environ la moitié du volume prévu. En conséquence, les agriculteurs complètent les eaux de surface en pompant les eaux souterraines dans les aquifères, dont le niveau piézométrique baisse jusqu'à 5 mètres par an (http://web.worldbank.org/archive/website01418/WEB/0__C-152.HTM). L'incertitude concernant l'approvisionnement en eau d'irrigation est un facteur majeur qui dissuade les agriculteurs de passer à des cultures à plus forte valeur ajoutée, et les tensions concernant l'accès aux ressources en eau augmentent. Face à cette situation, les autorités doivent concevoir des moyens de rendre l'irrigation dans le bassin plus durable, plus rentable et plus résiliente au changement climatique. Le principe de ce projet est de fournir une quantité fixe d'eau aux agriculteurs à la demande, afin qu'ils soient sûrs que l'eau sera disponible exactement au moment où ils en ont besoin. En contrepartie, les agriculteurs devront s'engager à ne pas dépasser une quantité fixe/limite de consommation d'eau. Le projet est aussi accompagné par des subventions des équipements d'irrigation localisée (goutte à goutte, micro-aspiration, etc.), promotion de l'investissement privé

dans les infrastructures post-récolte, et aides des agriculteurs à se connecter aux marchés nationaux et internationaux.

Exemple 2 d'adaptation : Gestion de la recharge et du stockage des aquifères

La gestion de la recharge des aquifères implique la construction d'infrastructure et/ou modification du paysage pour améliorer intentionnellement la recharge des eaux souterraines (Fig. 12). Elle forme l'une des réponses d'adaptation considérée comme une option pour améliorer la sécurité de l'approvisionnement en eau dans les zones où l'eau est rare (Gale, 2005), et ensuite réduire la vulnérabilité au CC des ressources en eau. Elle présente plusieurs avantages, notamment: stockage de l'eau pour une utilisation future, rétablir les niveaux des eaux souterraines d'aquifères surexploités, réduire les pertes par évaporation, gestion de l'intrusion marine ou de la subsidence du sol et permettre la réutilisation des eaux usées traitées et les eaux pluviales d'orages.

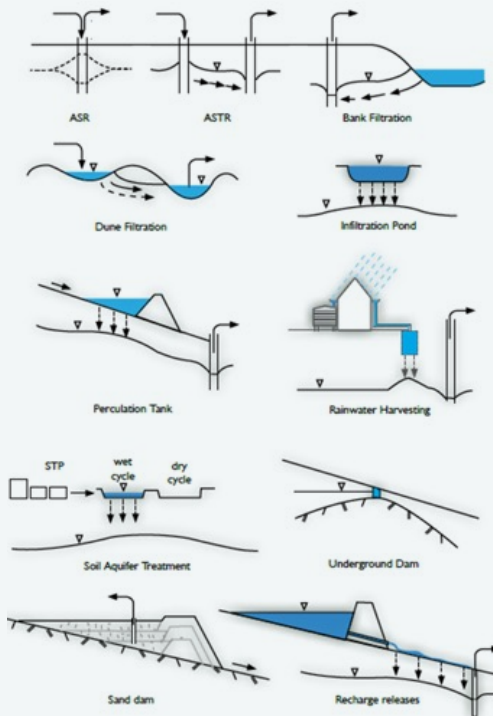


Figure 12 : Exemples d'approches de gestion de la recharge des aquifères. ASR : stockage et rétablissement des aquifères ; ASTR : stockage, traitement et rétablissement des aquifères, STP : station d'épuration. Source : Peter Dillon (pers. comm., 2008 in World bank, 2009).

Cette approche est très utilisée dans plusieurs pays dont le Kenya qui a réussi à implanter des centaines de sites de recharge d'aquifères. En effet, elle repose sur 3 principaux critères :

- La disponibilité de l'eau de recharge,
- Les conditions hydrogéologiques du site ; et
- La faisabilité de la recharge.

Depuis 1995, plus de 400 barrages souterrains de sable ont été construits dans le district de Kitui au Kenya (Fig. 13); Foster et Tuinhof, 2004). Chacun de ces barrages fournit à au moins 2000 m³ de stockage, il est construit par les habitants locaux et en utilisant des matériaux locaux. Les avantages identifiés à travers ce programme comprennent: l'approvisionnement en eau plus facilement disponible en saison sèche, sécurité en termes de nourriture pendant les périodes de sécheresse et moins de déplacements sur le terrain pour s'approvisionner en eau.

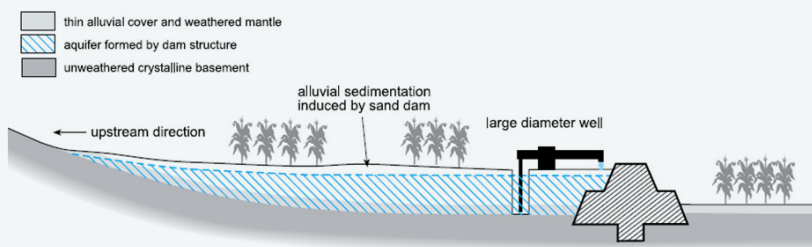


Figure 13 : Coupe transversale de la structure d'un barrage de sable type au Kenya (d'après Foster et Tuinhof, 2004)

Les barrages souterrains sont construits en établissant un mur à travers le lit d'une rivière, ce qui ralentit les crues soudaines / écoulement éphémère et permet aux sédiments plus grossiers de s'installer et s'accumuler derrière le mur du barrage. L'accumulation d'eau crée une nappe d'eau artificielle peu profonde qui est rechargée à la fois latéralement et verticalement par écoulement fluvial (Gale, 2005).

On conclut alors que les stratégies développées dans la planification et la gestion des ressources en eau par les États Maghrébins, surtout à court et à moyen termes, doivent tenir compte de l'effet du changement climatique afin de relever les défis de la rareté des ressources en eau. Elles doivent s'articuler, d'abord, sur

une évaluation de l'effet du changement climatique sur le potentiel futur des ressources en eau, en particulier sur des décennies. Ensuite, sur la base de la variation de ce potentiel, les stratégies futures doivent s'adapter et combler le déficit d'eau en puisant d'abord dans les solutions offertes par la gestion de la demande et en faisant recours aux ressources additionnelles à mobiliser aussi bien par les techniques conventionnelles que non conventionnelles, notamment le dessalement des eaux et la réutilisation des eaux usées épurées. La réussite de ces stratégies doit être aussi assurée par la mise en œuvre d'une approche économique de l'eau qui vise à maîtriser la demande par une bonne efficacité de l'eau en luttant contre les pertes des réseaux de distribution d'eau agricole et potable, ainsi que l'envasement des barrages, en plus de la collecte des eaux de pluie.

Exemple 3 d'adaptation/orientation : Une étude de cas CRIDA sur les tests de stress pour les impacts du changement climatique sur la sécurité de l'eau dans un bassin versant (Verbist et al., 2020)

Cette section résume l'importance de l'approche CRIDA dans l'orientation des politiques en matière de gestion des ressources en eau. Par conséquent, des outils adéquats sont nécessaires pour assister les décisions en matière de gestion des ressources en eau à moyen et à long terme. L'analyse des décisions éclairées sur les risques climatiques (Climate Risk Informed Decision Analysis, CRIDA) fournit une méthodologie pour des évaluations plus localisées de la vulnérabilité des ressources en eau face au changement climatique, tout en englobant l'incertitude des projections climatiques globales actuelles. Dans ce cadre, cet exemple présente un test de stress climatique pour identifier les changements dans les indicateurs clés de performance définis par le biais de consultations avec les parties prenantes locales en utilisant une approche ascendante (bottom-up). Appliqué à une étude de cas dans le bassin de la rivière Limari au Chili, le test de stress climatique met en évidence la vulnérabilité du système de réservoir à la variabilité et au changement climatiques, à travers une analyse complète et compréhensive de 43 modèles de circulation globale, dont 34 ont été retenus. Le niveau de préoccupation ('Level of Concern', LoC) a été défini comme élevé, en raison d'une forte probabilité d'entrer dans des conditions défavorables de sécurité de l'eau, qui devraient provoquer un impact significatif dans les zones hautement productives du bassin versant. Ainsi et à travers cet exemple, le test de stress climatique a fourni un outil d'évaluation pertinent pour les impacts potentiels du changement climatique sur les composants critiques du système hydrique dans les bassins versants vulnérables.





Suivi, évaluation et actualisation

Compte tenu de l'ampleur des impacts réels et potentiels du changement climatique sur les ressources en eau en tant que composante du développement durable des pays du Maghreb, ces derniers sont désormais déterminés à les intégrer pleinement dans leurs politiques de développement de planification et de gestion, et ainsi contribuer efficacement au développement économique et social de ces pays à même d'assurer une durabilité des ressources en eau et le bien-être de leurs populations.

Afin de s'assurer de l'efficacité du processus d'intégration de l'effet du changement climatique dans la gestion de l'eau, il est important d'évaluer régulièrement les progrès des actions planifiées et de vérifier les résultats réels par rapport aux objectifs définis lors de l'élaboration des stratégies, notamment l'amélioration de la gestion des ressources en eau et la réduction des risques liés au changement climatique. Il est aussi important de pouvoir envisager en cas de besoin des ajustements, ajouts ou de suppressions de certaines actions au vu des résultats du suivi. Le suivi-évaluation-actualisation permettra de :

- S'assurer que les actions décrites dans la stratégie sont prises en compte et que les ressources sont allouées et utilisées efficacement ;
- Evaluer les progrès accomplis vers la réalisation des buts et objectifs par rapport aux actions ;
- S'assurer de l'efficacité des actions prises, dans les différents secteurs consommateurs d'eau, pour garantir une gestion appropriée des ressources en eau tenant compte des contraintes posées par le changement du climat ;
- S'assurer de la réduction effective des impacts négatifs des changements climatiques sur les ressources en eau et la maximisation du profit des conditions favorables quand elles se présentent ;
- Estimer les coûts socio-économiques engendrés par ces actions ainsi que la minimisation des effets secondaires imprévus ;
- Utiliser les informations obtenues pour affiner la stratégie et pour éclairer la prise de décision à différents niveaux - de la planification nationale au comportement des utilisateurs de l'eau.

Les éléments importants du processus de suivi-évaluation-actualisation incluent :

1) La définition claire des objectifs (i.e. Réduire la consommation d'eau dans un secteur à l'horizon 2030 sans répercussions négatives (diminution) sur la productivité du secteur) et d'un état de référence pour la comparaison et

l'évaluation (i.e. quantités d'eau consommées par un secteur particulier en une année de référence). Ceci permettra d'avoir des réponses précises aux questions suivantes :

- Où en est-on (état initial) ?
- Vers où veut-on aller (état final) ?

2) La sélection d'indicateurs appropriés mesurables et clairement liés et compatibles avec les objectifs définis, qui permettront de répondre notamment à la question : « où sommes-nous par rapport à l'objectif ? ». Ces indicateurs doivent tenir compte des compromis relatifs à la disponibilité des données et qui risquent de s'imposer même dans le cas d'efforts mutualisés et d'investissements convenables dans cet aspect fort important. La communication sur le but du suivi et de l'évaluation auprès de l'ensemble des parties prenantes est capitale pour l'ensemble du processus, et en particulier pour la collecte et mise à disposition des informations nécessaires pour le calcul des indicateurs.

3) La possibilité d'affiner et/ou de revoir les indicateurs. Cette étape peut nécessiter de dresser un inventaire des indicateurs qui sont déjà utilisés pour éliminer les redondances, et également de considérer la relation entre les efforts à différentes échelles (locale, régionale, nationale, etc.).

4) La définition des fréquences d'évaluation et « reporting ». En général, les processus doivent être contrôlés fréquemment tenant compte de l'horizon temporel selon chaque objectif spécifique. Cela peut signifier un suivi mensuel, trimestriel, semestriel ou annuel.

Les indicateurs suivi-évaluation incluent généralement des indicateurs relatifs : à la disponibilité de l'eau et/ou à sa qualité de l'eau, aux performances d'irrigation, à la santé des écosystèmes aquatiques, à l'incidence des maladies d'origine hydrique, à l'incidence et des impacts des inondations ou de la sécheresse, et à l'accès à l'approvisionnement en eau et à l'assainissement. On peut citer à titre d'exemple :

- Consommation de l'eau en agriculture avant, pendant et après intervention ;
- Pourcentage de ménages urbains ayant accès à l'eau potable ;
- Pourcentage de ménages ruraux ayant accès à l'eau d'une source protégée ;
- Approvisionnement en eau potable durable aux communautés côtières pour lutter contre l'augmentation de la salinité due à l'élévation du niveau de la mer ;
- Mètres cubes par habitant de stockage d'eau.



Conclusion

Au Maghreb, et à travers les données observées à ce jour, le changement climatique a eu des conséquences palpables sur l'augmentation des températures, le changement des régimes des précipitations et des écoulements d'eau de surface, la diminution de la recharge naturelle des nappes et de la superficie couverte par la neige ainsi qu'une augmentation notable de la fréquence des inondations et des sécheresses. Ces aspects revêtent de plus en plus un caractère structurel comme démontré par les modèles climatiques utilisés dans les modélisations de l'évolution des paramètres climatologiques et hydrologiques.

Par conséquent, les gestionnaires de l'eau et les chercheurs scientifiques sont appelés à multiplier les études d'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau en exploitant les énormes potentialités offertes par les modèles climatiques et hydrologiques. Ceci devrait permettre de mieux gérer et planifier les ressources en eau, surtout dans une région comme le Maghreb où ces ressources se font de plus en plus rares à cause du changement climatique et devront faire face à une demande sans cesse croissante, conséquente de l'accroissement de la démographie et l'augmentation des besoins des secteurs usagers de l'eau.

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau permettra d'améliorer les options d'adaptation et de renforcement de la résilience face à ce phénomène, d'autant plus que les prévisions des spécialistes du climat présagent des conséquences encore plus graves sur les ressources en eau et leurs usages. Ceci plaide en faveur de l'adoption de mesures urgentes visant à changer de paradigme et de comportement à l'égard de l'eau, une meilleure maîtrise de la demande en eau actuelle et future, une gestion parcimonieuse et valorisante des ressources en eau, l'optimisation du mix de techniques conventionnelles - non conventionnelles pour augmenter l'offre en eau, la prise en compte du changement climatique dans le dimensionnement et le fonctionnement des réservoirs de régularisation de l'eau, des réseaux d'adduction et de distribution et des ouvrages de protection contre les inondations, etc.

Globalement, l'approche décrite dans cet ouvrage préconise une révision des stratégies hydriques développées par les pouvoirs publics pour tenir compte du changement climatique afin de relever les défis qu'il impose. Ces stratégies doivent s'articuler sur les prévisions des modèles climatiques à long terme pour analyser la vulnérabilité au sein de chaque bassin versant et faire une évaluation de l'effet de ce phénomène sur le potentiel futur des ressources en eau, de point de vue quantitatif et qualitatif. Ainsi, sur la base du potentiel en eau évalué au niveau de chaque bassin versant, les stratégies futures doivent agir d'abord sur la demande



en eau pour combler le déficit prévisible avant de recourir aux techniques de mobilisation adéquates, qu'elles soient conventionnelles ou non, notamment le dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres et la réutilisation des eaux usées épurées qui sont moins vulnérables au changement climatique. Ces stratégies devraient être accompagnées par des mesures complémentaires visant à sensibiliser les usagers de l'eau à la gestion parcimonieuse de cette denrée vitale, la lutte contre toutes les formes de pollution des eaux de surface et souterraines et la sauvegarde des écosystèmes naturels et de la biodiversité.

En somme, la prise en compte du changement climatique dans les stratégies de gestion des ressources en eau aura un impact positif certain sur l'amélioration de la résilience face à ce phénomène et l'optimisation des investissements dans le secteur de l'eau tout en garantissant la sécurité hydrique escomptée.





Bibliographie

Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Islam, M. N., Ismail, M., Klutse, N. A. B., & Siddiqui, M. H. (2020). Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4(3), 455-475.

Banque mondiale (2009). World Bank (2009). *Water and climate change: Impacts on groundwater resources and adaptation options*. Water Unit, - Energy, Transport, and Water Department.

Betts R. A., L. Alfieri, C. Bradshaw, J. Caesar, L. Feyen, P. Friedlingstein, L. Gohar, A. Koutroulis, K. Lewis, C. Morfopoulos, L. Papadimitriou, K. J. Richardson, I. Tsanis, K. Wyser (2018) Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5°C and 2°C global warming with a higher-resolution global climate model. *Phil. Trans.R.Soc.A376:20160452*. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0452>

Chennouf S. (2016). *Changements Climatiques et Ressources en Eau dans les Pays du Maghreb : Enjeux Stratégiques et Défis Majeurs*. Revue algérienne d'économie et gestion, Volume 9, Numéro 1, Pages 147-171, 2016.

Donat, M. G., Peterson, T. C., Brunet, M., King, A. D., Almazroui, M., Kolli, R. K., Boucherf, D., Al-Mulla, A. Y., Nour, A. Y., Aly, A. A., Nada, T. A. A., Semawi, M. M., Al Dashti, H. A., Salhab, T. G., El Fadli, K. I., Muftah, M. K., Dah Eida, S., Badi, W., Driouech, F., El Rhaz, K., Abubaker, M. J. Y., Ghulam, A. S., Erayah, A. S., Mansour, M. B., Alabdouli, W. O., Al Dhanhani, J. S. and Al Shekaili, M. N. (2014a). Changes in extreme temperature and precipitation in the Arab region: long-term trends and variability related to ENSO and NAO. *Int. J. Climatol.*, 34: 581–592. doi: 10.1002/joc.3707.

Donat, M. G., J. Sillmann, S. Wild, L. V. Alexander, T. Lippmann, W. Zwiers (2014b) Consistency of Temperature and Precipitation Extremes across Various Global Gridded In Situ and Reanalysis Datasets. *Journal of Climate*, American Meteorological Society. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00405.

Dosio A., H. Panitz (2015) Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models. *Clim Dyn* (2016) 46:1599–1625. DOI 10.1007/s00382-015-2664-4

Douville, H., K. Raghavan, J. Renwick, R. P. Allan, P. A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T. Y. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, O. Zolina, 2021, *Water Cycle Changes*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Driouech F., Staïi H., Khouakhi A., Moutia S., Badi B., ElRhaz K., Chehbouni A. (2020). Recent observed country-wide climate trends in Morocco. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.6734

Driouech F., K. ElRhaz, W. Moufouma Okia, K. Arjda, S. Balhane (2020) Assessing Future Changes of Climate Extreme Events in the CORDEX MENA Region Using Regional Climate Model ALADIN Climate. *Earth Systems and Environment* <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00169-3>.

Driouech F. (2010): *Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes*, Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse.

Driouech F., Mahe G., Déqué M. et al. (2010) *Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya*. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources*. IAHS Pub 340, 2010.

Droogers, P., Immerzeel, W. W., Terink, W., Hoogeveen, J., Bierkens, M. F. P., van Beek, L. P. H., and Debele, B.: Water resources trends in Middle East and North Africa towards 2050, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3101–3114, <https://doi.org/10.5194/hess-16-3101-2012>, 2012.

El Asri, H., A. Larabiand M. Faouzi(2021). Assessment of Future Climate Trend Based on Multi-RCMs Models and Its Impact on Groundwater Recharge of the Mediterranean Coastal Aquifer of Ghis-Nekkor (Morocco). Chapter in the book: *Climate Change in the Mediterranean and Middle Eastern Region* Publisher: Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-030-78566-6.

El Asri, H., A. Larabi and M. Faouzi (2020). Configuration Hydrogéologique et Impact des Changements Climatiques sur la Recharge Future et l'Etat piézométrique de l'Aquifère de Ghis-Nekkor (Maroc). *Revue Techniques et Sciences Méthodes (TSM, France)*, édit. Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (Astee), ISSN : 0299-7258, N° 10, pp. 29-41. : <https://doi.org/10.36904/tsm/202010029>. <https://astee-tsm.fr/numeros/tsm-10-2020/el-asri/>

El Asri, H., A. Larabi and M. Faouzi (2019). Climate Change Projections in the Ghis-Nekkor Region of Morocco and Potential Impact on Groundwater Recharge. *Theoretical and Applied Climatology Journal*, edit. Springer-Verlag GmbH Austria, ISSN 0177-798X, Volume 138, Issue 1-2, pp. 713–727. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02834-8>

El Hamidi M.J., A. Larabi and M. Faouzi(2021). Numerical Modeling of Saltwater Intrusion in the Rmel-Oulad Ogbane Coastal Aquifer (Larache, Morocco) in the Climate Change and Sea-Level Rise Context (2040). *Water Journal*, Academic Editor: Eyal Shalev, Licensee MDPI, Volume 13 Issue : 16, 2167, 33p. <https://doi.org/10.3390/w13162167>

El Hamidi M.J., A. Larabi, M. Faouzi and I. Er-Rakady (2020) – Assessment of Groundwater Resources based on IT Platform of GIS-Mathematical Model to Account for Climate Change in the Sahel Aquifer (Morocco). In *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Technologies for Humanity - ICATH*, ISBN 978-989-758-514-2, pp. 35-41. DOI: 10.5220/0010427100350041

Esper, J., Frank, D., Büntgen, U., Verstege, A., Luterbacher, J., & Xoplaki, E. (2007). Long-term drought severity variations in Morocco. *Geophysical research letters*, 34(17).

Filali B.A. (2003). Les pratiques de l'irrigation (in : Les pratiques de l'irrigation dans les pays du Maghreb : Quelle Durabilité ? Actes du séminaire organisé par ENDA Maghreb, Rabat – Maroc, 23-24 Octobre 2003.

Foster, S., & Tuinhof, A. (2004). Brazil, Kenya: Subsurface dams to augment groundwater storage in basement terrain for human subsistence. *World Bank Sustainable Groundwater Management Lessons from Practice*, 1-8. GW-MATE Case Profile Collection, Number 5. The World Bank, Washington.

Gale Lan, (2005). *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas*, UNESCO's International Hydrological Programme (IHP), IHP/2005/GW/MAR. Available online: <http://www.iah.org/recharge/>

Ghenim Nekkache A. et Abdesselam Megnounif (2013). « Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie) », *Physio-Géo*, Volume 7 | -1, 35-49.

Giorgi F, Coppola E, Raffaele F, Diro GT, Fuentes-Franco R, Giuliani G, Mamgain A, Llopart MP, Mariotti L, Torma C (2014) Changes in extremes and hydroclimatic regimes in the CREMA ensemble projections. *Clim Change* 125:39–51. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1117-0>

GIECC (2014). *Changements climatiques 2014, Rapport de synthèse du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf.

GIZ, AGIRE (2019). *Changement climatique et ressources en eau au Maroc : Synthèse bibliographique des principaux résultats et conclusions relatifs à l'évolution et changement du climat et leurs impacts sur les ressources en eau au Maroc, Rapport inédit par GIZ dans le cadre du programme d'Appui à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau*.

Gutiérrez, J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma, L.M. Alves, M. Amjad, I.V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon, 2021: Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Interactive Atlas available from <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>

IPCC WGII, AR6 *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* The Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Kherchouche D, Kalla M, Gutierrez E, Briki A, Hamchi A, 2013. La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma (Algérie). *Sécheresse* 24 : 129-37.

Kriegler, E., O'Neill, B. C., Hallegatte, S., Kram, T., Lempert, R. J., Moss, R. H., & Wilbanks, T. (2012). The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: a new approach based on shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 22(4), 807-822.

Larabi A. (2021a). Modélisation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eaux des nappes d'eaux souterraines des zones OCP. Rapport final du projet OCP 'GEO-LAR-01/2017' : Coupling Regional Climate Models to Hydrological Models to Assess and Predict the CC Impacts on Water Resources and Socio-Economic Vulnerability ; Case Studies of the OCP Areas. Dec 2021.

Larabi A., R. Choukr-Allah, M. Saber et D. Zejli (2021b). L'approche nexus «agriculture-eau- énergie-écosystèmes» dans la gestion de l'eau au niveau d'un bassin versant : cas du bassin hydrographique Souss Massa. Report number: Rapport Thématique du 27/04/2021 (IRES), édité par l'Institut Royal des Etudes Stratégiques, Rabat, 187 pp. + 3 Annexes.

Larabi A. (2020). *Assessment of Climate Change Impacts on Groundwater Resources using RICCAR Data in the Beni-Amir Aquifer (Tadla Complex, Morocco)*, Technical Report UN-ESCWA, 2020.

Larabi, A., H. El Asri, M.J. El Hamidi and S. Zhim (2020a). *Modeling the impacts of climate change on water resources in Mediterranean and Atlantic hydraulic basins of Morocco*. February 2020, *Desalination and Water Treatment* 176(2020):434-435, DOI: 10.5004/dwt.2020.25557.

Larabi A., H. El Asri, M. J. ElHamidi, S. Zhim and M. Faouzi (2020b). *Climate Change Trends in Morocco's Mediterranean & Atlantic Hydraulic Basins: Impacts on Water Resources*. *International Journal of Water Resources and Arid Environments*, ISSN 2079-7079, 9(1): 01-20. <https://psipw.org/attachments/article/2054/1e.pdf>

Larabi A., M. Faouzi, H. El Asri and M. J. El Hamidi (2020c) – *Use of RICCAR Data to assess the impact of climate change on water resources in Morocco*. The 2nd International Conference on Water Resources in Arid Areas November 9-11, 2020, Muscat, Oman. p. 92.

Larabi A., M. J. El Hamidi, M. Faouzi and I. Bouaamlat (2017). *Modeling the Impacts of Climate Change on the Aquifers in Morocco*. *International Journal of Water Resources and Arid Environments*, ISSN 2079-7079, 6(2): 133-142. <https://psipw.org/attachments/article/401/1e.pdf>

Marchane A., Y. Tramblay, L. Hanich, D. Ruelland, L. Jarlan (2017). *Climate change impacts on surface water resources in the Rheraya catchment (High Atlas, Morocco)*, *Hydrological Sciences Journal*, 62:6, 979-995, DOI: 10.1080/02626667.2017.1283042

Marchane A, Jarlan L, Boudhar A, Tramblay Y, Hanich L (2016) *Linkages between snow cover, temperature and rainfall and the North Atlantic Oscillation over Morocco*. *Clim Res* 69:229-238. <https://doi.org/10.3354/cr01409>

Mendoza, Guillermo, Jeuken, Ad, Matthews, John H., Stakhiv, Eugene, Kucharski, John, Gilroy, Kristin (2018). *Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA) : collaborative water resources planning for an uncertain future*, UNESCO Publishing, Dec 31, 2018 - Climatic changes - 162 pages.

Molinié G., Déqué M., Coppola E., Blanchet J., Neppel L. (2016) *Heavy precipitation in the Mediterranean basin Observed trends, future projections*. *The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*. IRD Editions, 2016, 736p. ISBN: 978-2-7099-2219-7

Nassopoulos Hypatie (2012). *Les impacts du changement climatique sur les ressources en eaux en Méditerranée*, thèse de Doctorat en sciences économiques, Economies et finances. Université Paris-Est, 2012. Français. NNT : 2012PEST1045. Pastel-00838516.

Nikulin G., C. Lennard, A. Dosio, E. Kjellström, Y. Chen, A. Hänsler, M. Kupiainen, R. Laprise, L. Mariotti, C. F. Maule, E. van Meijgaard, H. Panitz, J. F. Scinocca, and S. Somot (2018). The effects of 1.5 and 2 degrees of global warming on Africa in the CORDEX ensemble. *Environ. Res. Lett.* in press <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab1b1>

Niang, I., O.C. Ruppel, M.A. Abdrabo, A. Essel, C. Lennard, J. Padgham, and P. Urquhart, 2014: Africa. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1199-1265.

Nichane M. et M.A. Khelil (2015). *Changements Climatiques et Ressources en Eau en Algérie Vulnérabilité, Impact et Stratégie d'adaptation*. LARHYSS Journal, Volume 12, Numéro 1, Pages 15-23.

Nicholson, S. E., Funk, C., & Fink, A. H. (2018). Rainfall over the African continent from the 19th through the 21st century. *Global and planetary change*, 165, 114-127.

Oubaha N., M. Faouzi, A. Larabi and M. J. El Hamidi (2020) – Modeling Tools for the Fom El Oued Groundwater Aquifer under Climate Changes Context: Geodatabase and Hydrological Model. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Technologies for Humanity - ICATH*, ISBN 978-989-758-514-2, pp. 48-54. DOI: 10.5220/0010427300480054

Polade S. D., A. Gershunov, D. R. Cayan, M. D. Dettinger, D. W. Pierce (2017) *Precipitation in a warming world: Assessing projected hydro-climate changes in California and other Mediterranean climate regions*. *Scientific Reports* 7: 10783. DOI:10.1038/s41598-017-11285-y.

Ranasinghe, R., A. C. Ruane, R. Vautard, N. Arnell, E. Coppola, F. A. Cruz, S. Dessai, A. S. Islam, M. 7 Rahimi, D. Ruiz Carrascal, J. Sillmann, M. B. Sylla, C. Tebaldi, W. Wang, R. Zaaboul, 2021, Climate 8 Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In: *Climate Change 2021: The Physical 9 Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental 10 Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. 11 Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. 12 Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Touchan, R., Anchukaitis, K. J., Meko, D. M., Attalah, S., Baisan, C., & Aloui, A. (2008). Long term context for recent drought in northwestern Africa. *Geophysical Research Letters*, 35(13).

Tramblay Y., Adlouni S. E., Servat E. 2013. Trends and Variability in Extreme Precipitation Indices over Maghreb Countries. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12): p. 3235–3248.

Tramblay Y., D. Ruelland, Lahoucine Hanich, H. Dakhlaoui (2016). Hydrological impacts of climate change in North African countries. *The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*. IRD Editions, 2016, 736p. ISBN: 978-2-7099-2219-7.

United Nations Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA) et al. 2017. *Arab Climate Change Assessment Report – Main Report*. Beirut, E/ESCWA/SDPD/2017/RICCAR/Report.Waha, K., Krummenauer, L., Adams, S., Aich, V., Baarsch, F., Coumou, D., Fader, M., Hoff, H., Jobbins, G., Marcus, R., Mengel, M., Otto, I. M., Perrette, M., Rocha, M., Robinson, A., Schleussner, C.-F. (2017): Climate change impacts in the Middle East and Northern Africa (MENA) region and their implications for vulnerable population groups. - *Regional Environmental Change*, 17, 6, 1623-1638

Zhim, S., A. Larabi and H. Brirhit (2019). Analysis of precipitation time series and regional drought assessment based on the standardized precipitation index in the Oum Er-Rbia basin (Morocco). August 2019, *Arabian Journal of Geosciences* 12(16). DOI: 10.1007/s12517-019-4656-x.

https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9rie_temporelle

http://web.worldbank.org/archive/website01418/WEB/0__C-152.HTM

*Changeons les esprits,
pas le climat*



Bureau de l'UNESCO pour le Maghreb

Avenue Aïn Khalwiya km 5.3,
BP : 1777RP - Rabat, Maroc
<http://www.unesco.org/new/fr/rabat/home/>

SC-2023/HCFD/Maghreb/PA/17