

Papiers de Recherche | Research Papers

Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc: observations, projections et impacts

Marie-Noëlle WOILLEZ *

Juillet 2019

Pour citer ce papier :

WOILLEZ, M.-N. (2019), "Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : observations, projections et impacts", *Papiers de Recherche AFD*, n° 2019-108, Juillet.

Contact à l'AFD :

Marie-Noëlle WOILLEZ (woillezm@afd.fr)

Papiers de Recherche de l'AFD

Les *Papiers de Recherche de l'AFD* ont pour but de diffuser rapidement les résultats de travaux en cours. Ils s'adressent principalement aux chercheurs, aux étudiants et au monde académique. Ils couvrent l'ensemble des sujets de travail de l'AFD : analyse économique, théorie économique, analyse des politiques publiques, sciences de l'ingénieur, sociologie, géographie et anthropologie. Une publication dans les Papiers de Recherche de l'AFD n'en exclut aucune autre.

L'Agence Française de Développement (AFD), institution financière publique qui met en œuvre la politique définie par le gouvernement français, agit pour combattre la pauvreté et favoriser le développement durable. Présente sur quatre continents à travers un réseau de 72 bureaux, l'AFD finance et accompagne des projets qui améliorent les conditions de vie des populations, soutiennent la croissance économique et protègent la planète. En 2014, l'AFD a consacré 8,1 milliards d'euros au financement de projets dans les pays en développement et en faveur des Outre-mer.

Les opinions exprimées dans ce papier sont celles de son (ses) auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement celles de l'AFD. Ce document est publié sous l'entière responsabilité de son (ses) auteur(s).

Les *Papiers de Recherche* sont téléchargeables sur : <https://www.afd.fr/fr/ressources>

AFD Research Papers

AFD Research Papers are intended to rapidly disseminate findings of ongoing work and mainly target researchers, students and the wider academic community. They cover the full range of AFD work, including: economic analysis, economic theory, policy analysis, engineering sciences, sociology, geography and anthropology. *AFD Research Papers* and other publications are not mutually exclusive.

Agence Française de Développement (AFD), a public financial institution that implements the policy defined by the French Government, works to combat poverty and promote sustainable development. AFD operates on four continents via a network of 72 offices and finances and supports projects that improve living conditions for populations, boost economic growth and protect the planet. In 2014, AFD earmarked EUR 8.1bn to finance projects in developing countries and for overseas France.

The opinions expressed in this paper are those of the author(s) and do not necessarily reflect the position of AFD. It is therefore published under the sole responsibility of its author(s).

AFD Research Papers can be downloaded from: <https://www.afd.fr/en/ressources>

AFD, 5 rue Roland Barthes

75598 Paris Cedex 12, France

✉ ResearchPapers@afd.fr

ISSN 2492 - 2846

Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : observations, projections et impacts

Marie-Noëlle Woillez, Agence Française de Développement

Résumé

L'empreinte du changement climatique global est déjà clairement visible au Maroc : la température moyenne du pays a augmenté de +0,42 °C/décennie depuis 1990 et la diminution des précipitations est estimée à plus de 20% entre 1961 et 2005. La moyenne des projections des différents modèles climatiques indique que cette tendance à l'aridification va se poursuivre, avec à horizon 2050 une augmentation supplémentaire de la température de +1,5 °C (+2 °C) pour le scénario RCP4.5 (RCP8.5) et une diminution des précipitations de -15 % environ. Certains modèles projettent un déclin des précipitations bien supérieur, de l'ordre de -40 %. À horizon 2050 les projections de l'évolution des pluies extrêmes ne sont pas toujours statistiquement significatives. En revanche, la fréquence des vagues de chaleur et des sécheresses devrait fortement augmenter. Les rendements de l'agriculture non-irriguée seront affectés négativement, avec un déclin qui pourrait dépasser 40 % dans certaines régions pour le blé et l'orge. Globalement, les besoins en eau des plantes risquent de fortement augmenter, nécessitant un recours accru à l'irrigation, tandis que dans le même temps le débit des rivières pourrait diminuer de plus de 30 %. L'adéquation entre les ressources en eau disponible et les besoins du secteur agricole semble donc relativement incertaine. Par ailleurs, le secteur de l'énergie pourrait être affecté par une diminution de la capacité de production des centrales thermiques et hydrauliques. Enfin, 1,82 millions de Marocains habitent actuellement dans des zones qui seraient submergées de façon permanente en cas de montée du niveau marin de plus de 40 cm, une valeur très probable pour la fin du siècle et qui n'est pas à exclure dès le milieu du siècle si le Groenland et l'Antarctique fondaient plus rapidement que prévu.

Mots-clés : Maroc, changement climatique, impacts

Classification JEL : Y9

Version originale : Français

Acceptée : Juillet 2019

Introduction

En un siècle, la température moyenne de notre planète s'est élevée d'environ $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fig.1). Cette élévation a été particulièrement nette au cours des 50 dernières années, avec une tendance de $+0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ par décennie en moyenne. Le réchauffement n'est pas spatialement homogène, mais plus intense sur les continents que sur les océans, ainsi que sur les hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Les travaux de la communauté scientifique, régulièrement synthétisés dans les différents rapports du GIEC¹, ont permis de montrer clairement le lien de causalité entre ce réchauffement global et les émissions massives de gaz à effet de serre par les activités humaines.

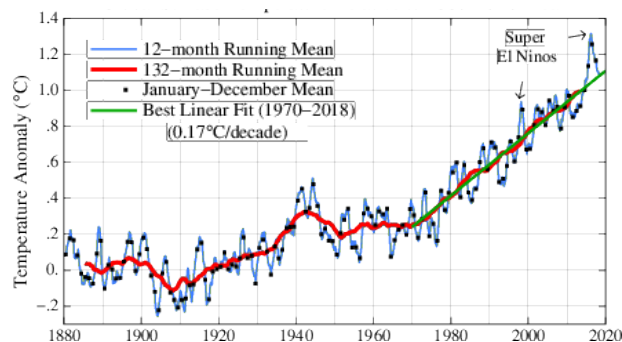


Figure 1: Evolution de la température moyenne globale entre 1880 et 2018, en $^{\circ}\text{C}$ (anomalie par rapport à la température moyenne en 1880-1920). Source : Université de Columbia.

Cette perturbation anthropique n'entraîne pas uniquement des changements de température, mais bien une modification globale du fonctionnement du système climatique. On observe déjà notamment dans de nombreuses régions du monde une perturbation du cycle hydrologique et donc des précipitations.

Le climat Marocain de ces dernières décennies est déjà marqué par une hausse des températures et un déclin des cumuls annuels de précipitations. D'après les projections climatiques disponibles, ce phénomène d'aridification devrait s'amplifier au cours du 21^e siècle, ce qui risque d'exacerber les tensions sur l'usage de l'eau déjà existantes et constitue une menace particulière pour le secteur agricole. Avec 38 % de la population vivant en milieu rural, il s'agit d'un secteur-clef de la société Marocaine, qui représentait 12,4 % du PIB annuel et environ 37 % de la main d'œuvre en 2017². D'importants investissements ont été faits pour le développement d'une agriculture irriguée, tournée vers l'exportation, qui représente à elle-seule environ 45 % de la valeur ajoutée du secteur agricole pour seulement 15 % de la surface agricole utile³. Les projections de raréfaction des ressources eau interrogent la pérennité de ce modèle économique. La production de céréales pour

¹ Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ou Intergouvernemental Panel on Climate Change (IPCC)

² Banque Mondiale

³ <http://www.agriculture.gov.ma/pages/lirrigation-au-maroc>

la consommation domestique en revanche est majoritairement pluviale, ce qui la rend particulièrement vulnérable aux variations de précipitations. L'aridification menace donc la sécurité alimentaire et accentue la dépendance extérieure du Maroc à l'égard des importations de céréales, qui est déjà élevée (l'autosuffisance varie selon les années entre 30 % et 75 %⁴).

La littérature scientifique sur le changement climatique et ses impacts au Maroc, ou plus largement en Afrique du Nord, est relativement abondante. Les thématiques traitées sont nombreuses : évolution du climat moyen, des événements climatiques extrêmes, impacts sur les ressources en eau superficielles ou profondes, sur l'agriculture, la santé, les écosystèmes ou encore le tourisme et l'énergie. Quelques rapports de synthèse sont également disponibles, en particulier celui de l'UNESCO (2010) sur le Maghreb, celui de la Banque mondiale sur l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient (2014), celui de l'IRES sur le Maroc (2011), et celui de l'ESCWA (2017) pour l'Afrique du Nord et le Moyen Orient. Sauf celui de l'IRES, qui remonte déjà à quelques années, ces différents rapports ne sont donc pas focalisés sur le Maroc.

Dans ce contexte, afin de résumer l'essentiel des connaissances actuelles sur le changement climatique au Maroc, il nous est apparu utile de réaliser un nouveau travail de synthèse et d'analyse de cette littérature, en incluant les publications les plus récentes et en appliquant au Maroc des calculs d'impact développés au niveau mondial. Sans être exhaustif, ce document présente les observations des changements déjà enregistrés ces dernières décennies, les projections à horizon 2050 et les principaux impacts attendus dans différents secteurs, pour deux scénarios d'émissions mondiales de gaz à effet de serre.

I. Evolution du climat Marocain au cours des dernières décennies

Les observations de température et précipitation présentées dans le rapport du GIEC de 2014 montrent une augmentation significative des températures en Afrique du Nord (Fig.2). Au Maroc, on retrouve clairement l'empreinte du réchauffement global, avec une augmentation de l'ordre de +1°C à +2°C en moyenne annuelle entre 1901 et 2012. Sur les 30 dernières années, la tendance est nettement supérieure à la moyenne globale, avec +0.42°C/décennie en moyenne depuis 1990, contre +0.28°C/décennie en moyenne sur l'ensemble des continents⁵.

⁴ <https://www.fellah-trade.com/fr/export/info-filiere/chiffres-cles-maroc/echanger>

⁵ Source : <http://berkeleyearth.lbl.gov/regions/morocco>

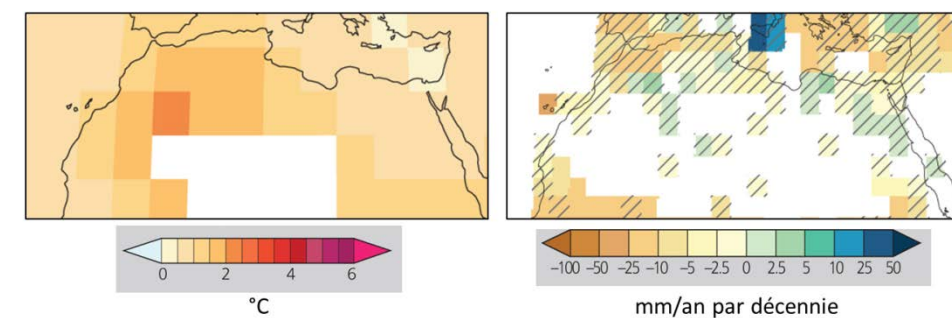


Figure 2 : Gauche : évolution de la température moyenne annuelle entre 1901 et 2012 (en °C). Droite : évolution des précipitations annuelles entre 1951 et 2010 (en mm/an par décennie). Zones hachurées : tendance non statistiquement significative. Source : IPCC 2014, WGII, chap.22.

Les précipitations annuelles ont quant à elles été marquées par une importante diminution sur la période 1951-2010, entre -10 et -25 mm/an par décennie sur le Nord du pays (Fig.2). Cependant, la variabilité spatiale et temporelle des précipitations est très importante et les tendances observées ne sont pas toujours significatives sur le plan statistique.

A l'échelle nationale, le déclin du cumul des précipitations durant la saison humide (septembre à avril) est estimé en moyenne à -26% entre 1961 et 2005 (Driouech & Mokssit, 2010). La diminution est plus marquée en fin de saison (février à avril), tandis que la tendance serait plutôt à la hausse en début de saison mais cette dernière évolution n'est pas significative sur le plan statistique. Dans le même temps, la sécheresse semble devenir plus persistante en fin de saison pluvieuse, avec un allongement d'environ 13 jours de la période maximale de jours consécutifs secs.

Une étude récente (Filahi et al., 2016) basée sur les données de 20 stations météorologiques couvrant la période 1970 à 2012 illustre le caractère très hétérogène des changements de précipitations sur cette période. Une majorité de stations montre une diminution des précipitations annuelles, notamment dans le Nord-Ouest, où se trouvent les plus grands barrages. Cependant cette tendance n'est significative que pour 4 stations (Fig.3.a). L'évolution des indicateurs caractérisant l'intensité des pluies n'est pas plus homogène. À titre d'exemple, seules 4 stations indiquent une augmentation significative des cumuls dus aux jours très pluvieux (Fig.3.b). L'index d'intensité journalière quant à lui montre une tendance significative pour 6 stations côtières seulement (Fig.3.c). Il faut cependant noter que ces tendances significatives sont toutes positives. L'évolution du nombre de jours de pluies intenses est également assez hétérogène, avec des tendances positives ou négatives selon les endroits. Les tendances positives sont cependant plus nombreuses.

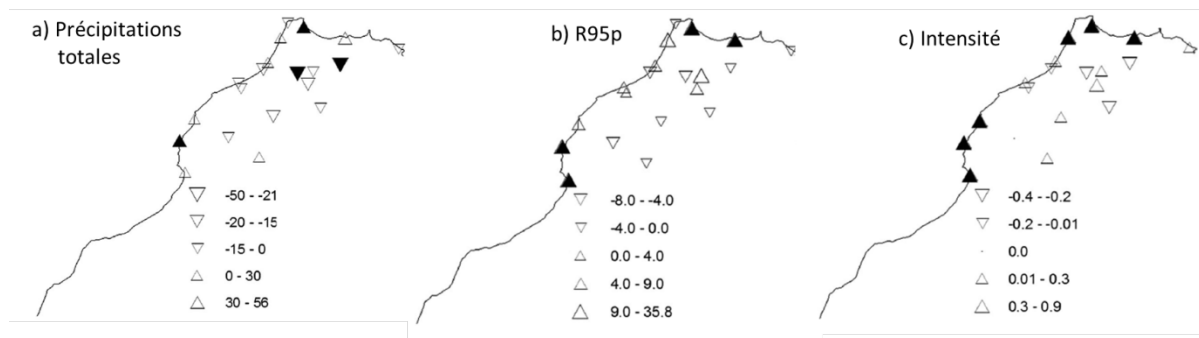


Figure 3 : Tendances entre 1970 et 2012 pour : a) Précipitations totales (mm/décennie) ; b) R95p : cumuls des jours très humides (bilan annuel des précipitations journalières dépassant le 95^e percentile, en mm/décennie) ; c) Intensité : rapport des précipitations annuelles sur le nombre de jours de pluie (en mm/décennie). Les triangles vers le haut (le bas) représentent une augmentation (diminution). Les triangles pleins correspondent aux tendances significatives. Source : [Filahi et al. \(2016\)](#), reproduit avec la permission de Springer Nature ©2016.

Si les tendances sur les précipitations n'apparaissent donc pas toujours statistiquement significatives sur les dernières décennies, en considérant l'évolution sur un siècle le caractère particulièrement sec des 40 dernières années apparaît assez net (Nicholson et al., 2018), même si certaines années avant 1980 ont également été marquées par la sécheresse (Fig.4).

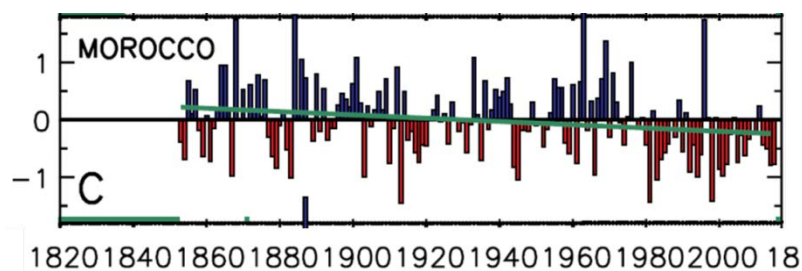


Figure 4 : Pluviométrie moyenne au Maroc entre 1850 et 2018 (standardisée). Source : [Nicholson et al. \(2018\)](#).

Le changement climatique se manifeste donc déjà de façon prononcée au Maroc, avec un climat globalement plus chaud et sec, accompagné dans certaines régions d'une augmentation des épisodes de pluies intenses. Les climats de type aride et semi-aride progressent vers le Nord, au détriment des zones classifiées comme semi-humides ou humides (Fig.5).

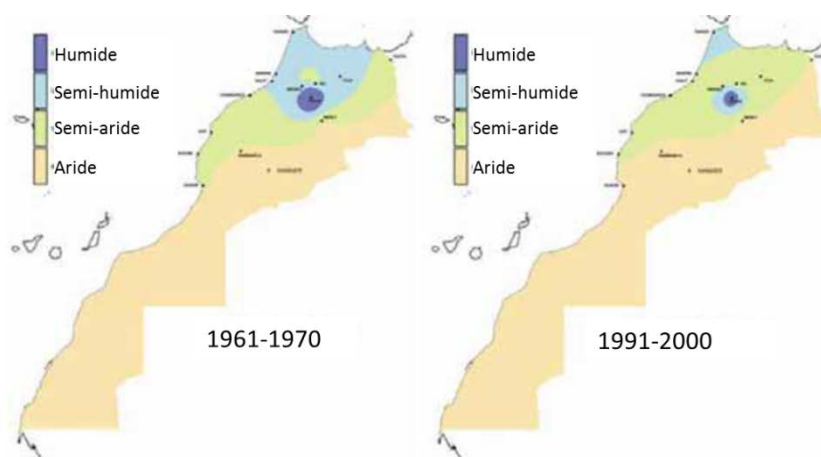


Figure 5 : Types de climat au Maroc durant la période 1961-1970 et 1991-2000, définis selon l'indice d'aridité de De Martonne. Source : Driouech & Mokssit (2010)/ Direction de la Météorologie Nationale.

II. Projections climatiques

Cette section présente les résultats des projections climatiques de modèles climatiques globaux ou régionaux pour le Maroc. Chaque modèle ayant ses propres forces et faiblesses et aucun n'étant plus performant que les autres pour toutes les régions et toutes les variables climatiques (voir Annexe 1), nous présentons de préférence les résultats issus de plusieurs modèles.

2.1. Choix des scénarios

L'évolution future du climat au 21^e siècle dépendra des émissions anthropiques globales de gaz à effet de serre et d'aérosols, ainsi que de la sensibilité intrinsèque du système climatique à ces émissions, laquelle demeure relativement incertaine. Pour le 5^{ème} rapport du GIEC (2014), quatre scénarios d'émissions, appelés *Representative Concentration Pathways* (RCP), ont été choisis par les scientifiques pour forcer les modèles climatiques et étudier les effets de plusieurs niveaux d'émissions (voir Annexe 2) :

- Le scénario RCP2.6, trajectoire de réduction des émissions qui conduirait à une stabilisation du niveau de réchauffement global sous le seuil de +2 °C par rapport à l'ère préindustrielle ;
- Le scénario RCP8.5, trajectoire de poursuite de fortes émissions, qui conduirait à un réchauffement global supérieur à +4,5 °C en 2100 ;
- Les scénarios RCP4.5 et RCP6.0 qui sont intermédiaires et conduisent à un réchauffement global d'environ +2,5 °C et +3 °C en 2100 respectivement.

Le texte de l'Accord de Paris prévoit de contenir le réchauffement global « *bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels* » et de poursuivre les efforts pour le limiter à +1,5 °C. Ainsi qu'il a été souligné dans le rapport spécial du GIEC de 2018, les émissions de gaz à effet de serre émises jusqu'à ce jour sont probablement insuffisantes à elles seules pour provoquer un réchauffement global de +1,5 °C. Tout dépendra donc des émissions futures et une réduction extrêmement rapide des émissions similaire au scénario RCP2.6 permettrait de rester sous le seuil de +2 °C. Cependant, les contributions volontaires de réduction des émissions affichées à ce jour par les pays signataires de l'Accord de Paris sont nettement insuffisantes pour respecter cet engagement. De plus, en pratique, les projections d'émissions correspondant aux politiques actuelles conduisent à une élévation de la température globale d'environ +3,5 °C en 2100. Au rythme actuel, le seuil de +1,5 °C pourrait être atteint aux alentours de 2050 (IPCC 2018). Il semble donc actuellement peu probable que les émissions mondiales suivent une trajectoire proche du scénario RCP2.6. Aussi, afin d'étudier les impacts du changement climatique au Maroc à horizon 2050, nous avons choisi de nous concentrer sur deux scénarios à notre sens plus réalistes des trajectoires possibles à cet horizon de temps: le RCP4.5 et le RCP8.5.

2.2. Projections avec les modèles globaux

Des dizaines de modèles climatiques globaux (GCM) différents ont été utilisés pour simuler le climat au cours du 21^e siècle en fonction des scénarios d'émissions associés aux RCP. Les résultats de ces simulations standardisées sont comparés dans le cadre du projet CMIP5⁶ et synthétisés dans le rapport du GIEC de 2014. Les projections pour l'ensemble du globe sont données en Annexe 3.

Pour le Maroc, l'augmentation de température moyenne simulée à horizon 2050 par l'ensemble des modèles est d'environ +1,5 °C pour le RCP4.5 et +2 °C pour le RCP8.5 (par rapport à 1986-2005). La hausse de température s'accompagne d'une diminution des précipitations, de l'ordre de -15 % pour les deux scénarios, avec toutefois une importante variabilité interannuelle et inter-modèles (Fig.6 & 7). Pour le scénario RCP8.5, certains modèles simulent un déclin des précipitations supérieur à 40 % en 2050. L'ensemble des modèles donne un intervalle probable⁷ compris entre -6 % et -30 % (source : Climate Fact Sheet GERICS).

⁶ Climate Model Intercomparison Project, Phase 5 (Taylor et al., 2012)

⁷ Intervalle dans lequel se situent 66 % des projections

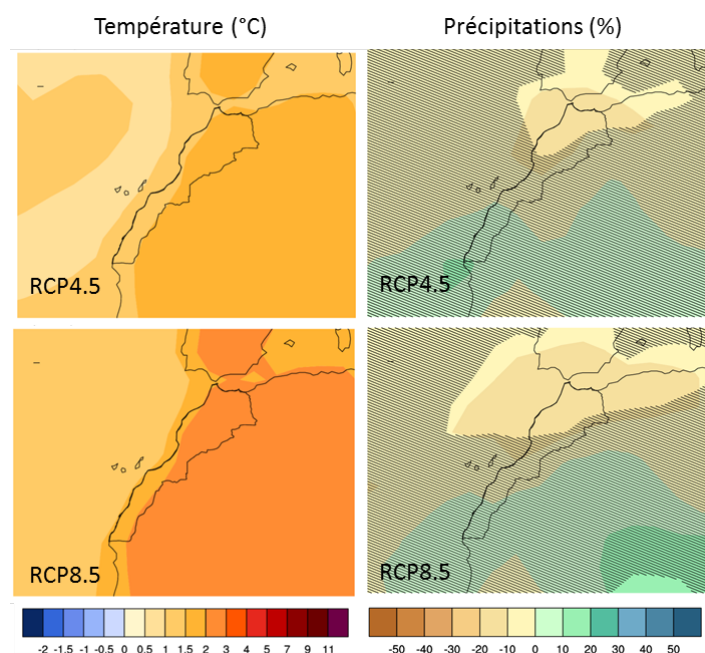


Figure 6 : Moyennes des anomalies de température moyenne annuelle ($^{\circ}\text{C}$) et de précipitations moyennes annuelles (%) en 2040-2060 par rapport à 1986-2005 telles que simulées par les modèles CMIP5 pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les hachures indiquent les zones où le changement simulé est inférieur à un écart-type de la variabilité naturelle. Source : <https://climexp.knmi.nl>.

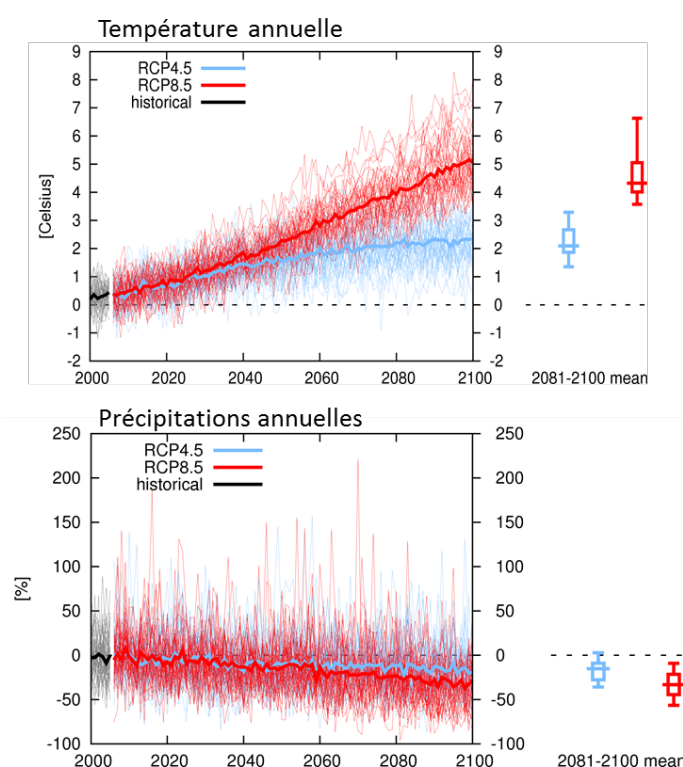


Figure 7 : Anomalies de température ($^{\circ}\text{C}$) et précipitations (%) au Maroc par rapport à la moyenne sur 1986-2005, simulées par l'ensemble des modèles CMIP5. Chaque ligne correspond à un modèle, les lignes en gras à la moyenne multi-modèles. La barre horizontale des boîtes à moustaches représentent la valeur médiane en 2081-2100. Figures générées à partir des simulations CMIP5 (<https://climexp.knmi.nl>).

Dans les deux scénarios, le réchauffement est nettement plus prononcé en été qu'en hiver et les vagues de chaleur augmentent de façon très importante dès le milieu du siècle (Lelieveld et al., 2016) : pour le Nord du Maghreb, le Warm Spell Duration Index (cumuls des jours où la température maximale excède le 90^e percentile de la période de référence durant au moins 6 jours) passe d'une dizaine de jours par an en moyenne sur la période de référence (1986-2005) à une soixantaine de jours par an en 2046-2065 pour le RCP4.5 et une centaine de jours par an pour le RCP8.5 (Fig.8).

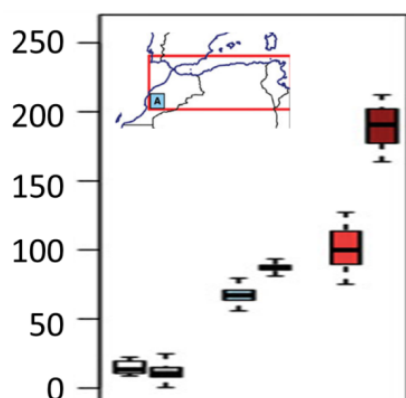


Figure 8 : Warm Spell Duration Index (jours) observés pour le Nord du Maghreb en 1986-2006 (gris, données HadEX) et simulés par les modèles CMIP5 pour cette même période (blanc) ; pour 2046-2065 pour les scénarios RCP4.5 (bleu ciel) et RCP8.5 (rouge clair) et pour 2081-2100 pour RCP4.5 (bleu foncé) et RCP8.5 (rouge foncé). Source : Lelieveld et al. (2016).

2.3. Projections avec des modèles régionaux

2.3.1. Intérêt des modèles régionaux

Le climat Marocain est un climat relativement contrasté, influencé à la fois par l'océan Atlantique, la mer Méditerranée et le Sahara. La répartition des précipitations est marquée par une grande hétérogénéité, avec des cumuls annuels inférieurs à 200 mm dans le Sud et l'Est du pays mais supérieurs à 600 mm dans le Nord. Le Rif et l'Atlas concentrent les précipitations les plus importantes, avec des cumuls supérieurs à 1000 mm/an dans certaines zones. Cette barrière orographique marque la transition entre l'Ouest, sous influence humide atlantique, et l'Est, sous influence du Sahara (Fig.9).

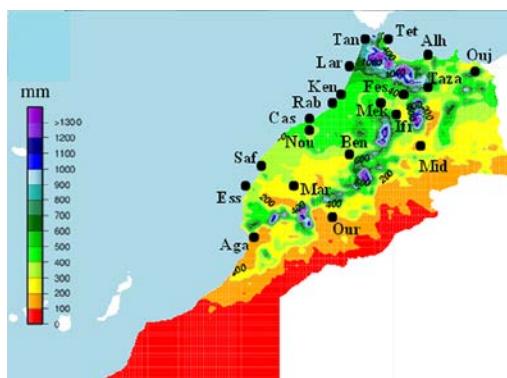


Figure 9 : Précipitations annuelles (mm/an, moyenne sur 1981-2010). Source : Filabi et al. (2017). © 2017 Royal Meteorological Society, reproduit avec la permission de John Wiley and Sons.

La résolution spatiale des GCM, de l'ordre de 100-200 km, est insuffisante pour capturer finement l'influence de la côte et de l'orographie et donc simuler l'hétérogénéité du climat Marocain. Elle ne permet pas non plus de reproduire correctement les événements climatiques extrêmes. Il est donc nécessaire de recourir à des méthodes de descente d'échelle afin de rendre compte des impacts du changement climatique à une échelle plus locale. Deux approches sont possibles : statistique ou dynamique. Les méthodes statistiques sont généralement basées sur la détermination de relations entre variables climatiques à grande échelle et variables à l'échelle locale. Toutefois, certaines reposent sur une hypothèse de stationnarité⁸ qui s'est avérée ne pas être toujours vérifiée dans le cas du Maroc (Driouech et al., 2010). Ce problème est évité avec une approche dynamique, c'est-à-dire l'utilisation de modèles climatiques régionaux (RCM). Ce type de modèle permet de simuler le climat sur une sous-région du globe avec une résolution spatiale généralement inférieure à 50 km.

De nombreuses projections à l'échelle régionale couvrant tout ou partie du Maroc ont déjà été réalisées. Citons en particulier des simulations réalisées avec le modèle ARPEGE de Météo France dans une version zoomée sur le Maroc (Driouech et al. (2009), Driouech et al. (2010)), les simulations du projet européen ENSEMBLES⁹ (Tramblay et al., 2012), celles réalisées avec le modèle ALADIN par la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc (ESCWA et al., 2017) et celles du projet CORDEX¹⁰. Des projections à 12 km de résolution sont disponibles sur le domaine EURO-CORDEX couvrant l'Europe et l'Afrique du Nord et des projections à environ 50 km pour le domaine MENA (Afrique du Nord et Moyen Orient, voir en particulier le rapport du projet RICCAR¹¹ (ESCWA et al. 2017)). Dans le présent travail de synthèse, nous avons choisi de privilégier les publications faisant appel à des RCM plutôt qu'à des méthodes statistiques.

2.3.2. Projections de températures

La publication la plus récente de projections climatique à haute résolution pour la moitié Nord du Maroc est celle de Filahi et al. (2017), qui analyse les résultats de simulations réalisées pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec 4 RCM différents de résolution spatiale 12 km. Les résultats obtenus pour divers indices de températures indiquent une claire augmentation des températures sur l'ensemble du pays, plus intense sur la partie Est (Fig.10). Pour le scénario RCP8.5, l'augmentation de température journalière maximale en 2036-2065 par rapport à 1975-2004 est de 2-3°C à l'Est de l'Atlas contre environ 1°C sur la façade Atlantique. Des résultats similaires avaient été obtenus avec un autre RCM dans le cadre du projet RICCAR.

⁸ On suppose que le lien actuellement observé entre certaines variables à grande échelle et une variable à l'échelle locale sera toujours valable dans un contexte climatique global différent.

⁹ <http://ensembles-eu.metoffice.com/>

¹⁰ Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (<http://www.cordex.org/>), qui réalise des projections climatique à haute résolution pour 14 régions couvrant la majeure partie des continents.

¹¹ Regional Initiative for the Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources and Socio-Economic Vulnerability in the Arab Region.

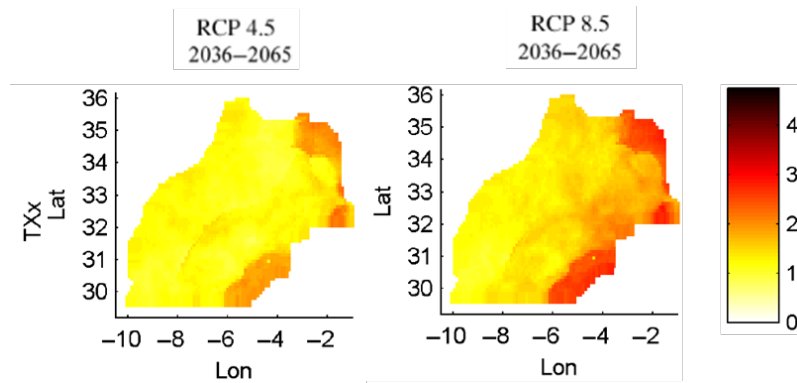


Figure 10 : Changement de température journalière maximale pour la période 2036-2065 par rapport à 1975-2004 pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Source : [Filahi et al. \(2017\)](#). © 2017 Royal Meteorological Society, reproduit avec la permission de John Wiley and Sons.

2.3.3. Projections de précipitations

Pour les deux scénarios, l'ensemble des simulations analysées dans Filahi et al. (2017) confirment les résultats des modèles globaux, avec une importante diminution du cumul annuel des précipitations sur l'ensemble du pays (Fig.11).

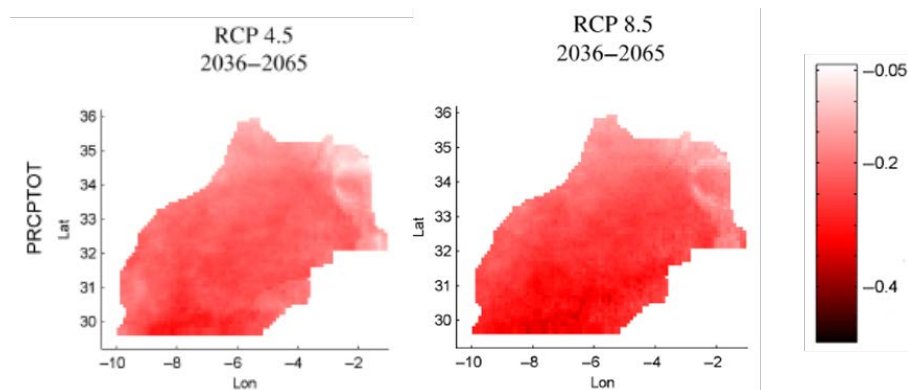


Figure 11 : Changement relatif de précipitations annuelles pour la période 2036-2065 par rapport à 1975-2004 pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Source : [Filahi et al. \(2017\)](#). © 2017 Royal Meteorological Society, reproduit avec la permission de John Wiley and Sons.

Au-delà de l'évolution des précipitations moyennes, les modèles régionaux permettent, dans une certaine mesure, de simuler les épisodes de pluies intenses. La question de possibles changements de leur fréquence et/ou de leur intensité dans les prochaines décennies est cruciale pour le Maroc, dont la population est très vulnérable face à ce type de phénomènes (Tramblay et al., 2012). Les inondations et crues éclair, générant d'importants dommages humains et matériels, sont en effet généralement causées par des épisodes de pluies torrentielles.

Les modèles simulent une diminution du cumul annuel associé à des jours extrêmement pluvieux (précipitations > 99^e percentile), en revanche les projections pour d'autres indices caractérisant les pluies intenses (nombre de jours avec précipitations supérieures à 10 ou 20 mm ou valeur du

maximum mensuel des précipitations journalières par exemple) sont en désaccord et le signal est peu clair pour la période 2036-2065 (Filahi et al., 2017). Des changements apparaissent plus clairement pour la fin du siècle dans le scénario RCP8.5, avec une possible augmentation du maximum mensuel de précipitations journalière sur la façade Méditerranéenne, mais cette projection demeure assez incertaine. Les travaux antérieurs de Trambly et al. (2012) avec d'autres RCM avaient également montré une possible augmentation des précipitations extrêmes sur la façade Méditerranéenne et une diminution sur la façade Atlantique, mais toujours avec une large incertitude, notamment avant 2050. En revanche, l'étude de Trambly et al. (2018) portant sur l'ensemble des bassins versants Méditerranéen à horizon 2100 montre plutôt une diminution des précipitations extrêmes sur la rive Sud de la Méditerranée.

2.4. Conclusions

Les projections des GCM comme des RCM montrent pour l'ensemble du Maroc une amplification du réchauffement et de la baisse du cumul des précipitations déjà observées ces dernières décennies. Le réchauffement sera plus marqué dans les zones à l'Est de l'Atlas, sous influence saharienne, que sur les façades Atlantique et Méditerranéenne. Le déclin des précipitations concernera l'ensemble du pays et pourrait atteindre -40 % dès 2050 dans les pires scénarios. En revanche, les modèles climatiques ont généralement des difficultés pour simuler les événements de pluies extrêmes, dont les projections demeurent moins claires, surtout pour la première moitié du siècle.

III. Projections des impacts du changement climatiques

La hausse des températures et le déclin des précipitations projetées auront des impacts importants sur différents secteurs de l'économie et de la société marocaine. Cette section, non exhaustive, présente les impacts projetés sur les ressources en eau, l'agriculture, l'énergie, la santé et le tourisme.

3.1. Ressources en eau

Les ressources en eau dépendent non seulement de l'apport d'eau par les précipitations mais également de la demande atmosphérique (évapotranspiration), laquelle augmente avec la température de l'air. Le déclin des précipitations et l'augmentation des températures projetées pour le Maroc dans tous les scénarios se conjuguent donc pour menacer les ressources en eau du pays.

Plusieurs études ont exploré l'impact du changement climatique sur le ruissellement et le débit des rivières à l'échelle globale à l'aide de modèle hydrologiques forcés par les projections climatiques de GCM. Citons en particulier Schewe et al. (2013) et Prudhomme et al. (2013), dont les analyses des simulations hydrologiques issues du projet ISI-MIP¹² pointent toutes deux le Maroc comme un futur « point chaud » pour le stress hydrique. Pour un réchauffement de +2 °C

¹² Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, <https://www.isimip.org/>

par rapport à 1980-2010, soit vers le milieu du siècle selon le scénario RCP8.5, la diminution des débits annuels au Maroc serait supérieure à 30 % sur l'ensemble du pays (Fig.12). Pour ce même scénario la fréquence des jours de sécheresse augmenterait de 50 % en 2070-2099 par rapport à 1976-2005 (Prudhomme et al. 2013). Une interpolation linéaire de ce chiffre donne donc un ordre de grandeur de +25 % pour le milieu du siècle.

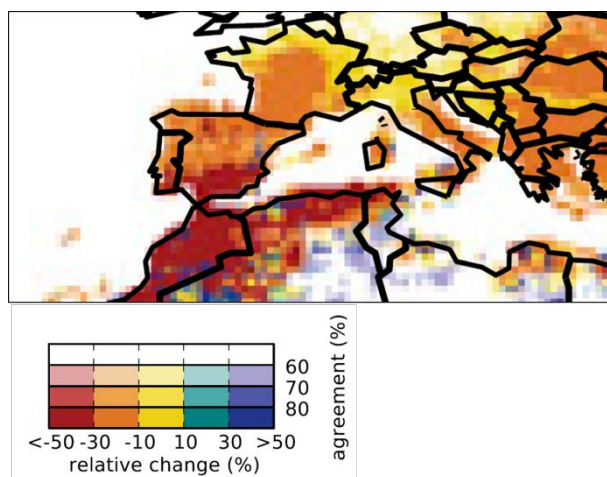


Figure 12 : *Changement relatif des débits annuels pour un réchauffement de +2 °C par rapport à 1980-2010 (RCP8.5). Les couleurs représentent le changement moyen simulé par les modèles, l'intensité l'accord sur le signe du changement entre les modèles. Source : [Scheve et al. \(2014\)](#).*

Les projections de ruissellement réalisées plus récemment à l'échelle régionale avec des forçages climatiques à haute résolution (ESCWA et al., 2017) confirment ces résultats, avec une diminution d'environ 32-40 % sur la moitié Nord du Maroc pour le milieu du siècle dans le cas du scénario RCP8.5.

Il faut donc s'attendre à une baisse importante des ressources en eau disponibles, que ce soit les eaux de surface ou les eaux souterraines, avec des conséquences notamment pour l'irrigation.

3.2. Agriculture

L'impact du changement climatique sur l'agriculture au Maroc a déjà fait l'objet d'un certain nombre d'études par modélisation. Citons en particulier une étude de la FAO pour la Banque Mondiale (Gommes et al., 2009) portant sur une cinquantaine de types de culture à horizon 2050. Cette étude montre une augmentation des besoins en eau variant entre +8 % et +27 % selon les cultures, une importante baisse des rendements des cultures pluviales de céréales et légumes (de -5 % à -30 %) mais une hausse des rendements pour l'agriculture irriguée, qui bénéficierait du changement climatique. Cependant, ces projections ne tiennent pas compte des projections de diminution des ressources en eau et donc du risque que ces ressources deviennent insuffisante pour maintenir ou développer l'irrigation et permettre effectivement une augmentation des rendements en contexte de changement climatique. L'étude fait par ailleurs des hypothèses assez ambitieuses sur les progrès technologiques, en extrapolant les tendances de hausse de rendement observées ces dernières années. Une telle hypothèse pourrait ne pas se vérifier sur le long terme :

en France par exemple, les rendements du blé n'augmentent plus depuis le milieu des années 1990 (Schauberger et al., 2018).

Plus récemment, le projet MOSAICC¹³ (Balaghi et al., 2016) porté par la FAO a utilisé les projections de 3 GCM différents pour simuler les rendements du blé et de l'orge (bour) avec le modèle AquaCrop. Afin d'obtenir une bonne résolution spatiale, les projections climatiques des 3 GCM ont été raffinées en combinant méthode statistique et interpolation. La hausse des températures et le déclin des précipitations entraînent une diminution des rendements simulés pour la majorité des grandes régions agricoles du Maroc dès le milieu du siècle (Fig.13), aussi bien dans le scénario RCP4.5 que RCP8.5. Seules les régions montagneuses, où le réchauffement crée des conditions plus favorables, voient les rendements du blé augmenter. Une augmentation des rendements du blé et de l'orge est également simulée dans le Nord du pays, dans la région du Rif, probablement pour les mêmes raisons. L'agrégation de ces évolutions de rendement et leur inclusion dans un modèle économique de type CGE montre un impact assez limité sur le PIB Marocain. Cependant, la production de blé et d'orge présente une forte variabilité interannuelle qui n'est pas prise en compte par le modèle économique, pour des raisons de stabilité numérique. Seule des tendances lissées (moyenne glissante sur 10 ans ou linéarisation) ont pu être utilisées. Les impacts économiques potentiels de conditions climatiques particulièrement défavorables pour une année donnée ne sont donc pas simulés. Par ailleurs, les projections de rendement sont assez variables selon le GCM utilisé pour forcer le modèle agricole. Cette variabilité a pour conséquence des écarts importants pour les prix simulés par le modèle économique : ainsi, la variation du prix de l'orge à horizon 2050 dans le scénario RCP4.5 varie de +111 % à -24 %, selon le GCM et la méthode de lissage des projections de rendement. Pour le scénario RCP8.5, le prix de l'orge augmente de 60 % à 170 % et celui du blé de 8 % à 64 %, toujours selon le modèle climatique et la méthode de lissage.

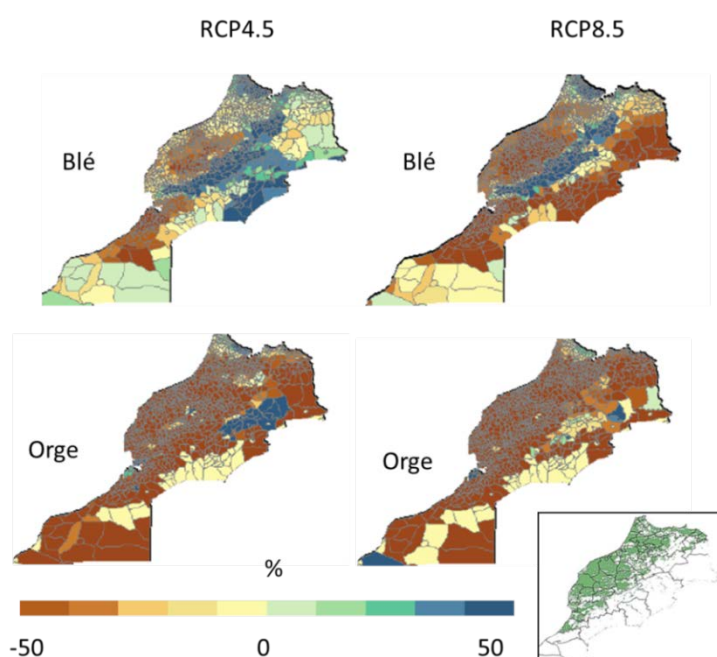


Figure 13: Projections de changement de rendements moyens (%) du blé et de l'orge bour simulés avec le modèle AQUACROP forcé par 3 GCMs pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 en 2040-2069 par rapport à 1971-2000. Source : Balaghi et al. (2016). Encadré : terres agricoles (source : rapport technique ACCAGRIMAG, Balaghi et al., 2009).

¹³ <http://www.fao.org/in-action/mosaicc/on-the-ground/morocco/en/>

De très nombreux autres travaux de modélisation des impacts du changement climatique sur l'agriculture à l'échelle globale ou régionale sont disponibles dans la littérature scientifique. Les études spécifiques pour le Maroc sont cependant peu nombreuses, quelques résultats sont résumés dans le tableau 1 ci-après.

La variabilité des hypothèses sous-jacentes aux modèles de culture rend très délicate la comparaison des simulations de rendement obtenues avec des modèles différents (voir Annexe 1). Malgré les difficultés propres à la modélisation des rendements agricoles, qui dépendent entre autres des pratiques et technologies utilisées ainsi que des potentiels changements physiologiques des plantes (Fader et al., 2016), il semble que l'aridification projetée au Maroc sera défavorable aux cultures pluviales. En l'absence d'irrigation pour palier le déclin des précipitations, le déclin des rendements de céréales à horizon 2050 pourraient être important. L'irrigation pourrait permettre une augmentation des rendements même en contexte d'aridification croissante, cependant les modèles qui en font l'hypothèse supposent que l'accès à l'eau pour l'irrigation n'est pas limité. La validité de cette hypothèse est multifactorielle et dépend entre autres de l'évolution de la demande sectorielle et des besoins en eau des plantes, qui pour certaines cultures pourrait diminuer grâce à l'effet de fertilisation du CO₂ et le raccourcissement de la saison de croissance (Fader et al., 2016). Cependant, compte-tenu des projections de diminution des ressources en eau (section 4.1), le Maroc pourrait rencontrer des difficultés pour pallier les déficits de précipitation par l'irrigation (Fader et al. (2016), Elliott et al. (2014)).

Il faut toutefois souligner que l'intégration complète entre agriculture et ressources en eau implique de pouvoir modéliser de nombreux processus supplémentaires, dont l'efficacité des différents systèmes d'irrigation, les ressources d'eau souterraines, les prélèvements, les choix d'allocation entre agriculture et autres activités... et ce à fine échelle spatiale et temporelle. Ces contraintes représentent d'importantes difficultés techniques qui expliquent l'absence de travaux de cette nature à l'échelle du pays. Prendre en compte les impacts du changement climatique sur l'agriculture irriguée pour l'ensemble du Maroc nécessiterait donc probablement une approche différente du couplage intégré.

Tableau 1 : Exemple d'études sur les impacts du changement climatique sur l'agriculture

Auteurs	Caractéristiques de l'étude et principales conclusions	
Giannakopoulos et al. (2009)	Scénario climatique	Réchauffement global de +2 °C (horizon 2050, scénario SRES A2, analogue au RCP8.5)
	Région	Méditerranée
	Type de culture	Maïs (irrigué), blé, tournesol, pomme de terre (irriguée), haricot (modèle CROPSYST, forcé par le GCM HadCM3)
	Résultats pour le Maroc	Diminution des rendements pour toutes les cultures : Maïs : -12 % ; Haricots : -40 % ; Tournesol : -15 % ; Pomme de terre : -25 % ; Blé : -15 %
	Limitations	1 seul modèle 1 seul point de grille pour le Maroc Pas de limitations pour l'irrigation CROPSYST, comme beaucoup de modèles ne prend pas en compte les extrêmes de température sur le développement et la croissance des plantes.
Ponti et al. (2014)	Scénario climatique	+1,8 °C de réchauffement global en 2041-2050 par rapport à 1961-1970 (scénario SRES A1B, analogue au RCP8.5 pour cet horizon temporel)
	Région	Méditerranée
	Type de culture	Olive (Modèle trophique simulant la dynamique de la production d'olive et de son principal ravageur, la mouche de l'olive)
	Résultats pour le Maroc	Déclin des populations de mouche de l'olive et augmentation des rendements sur la façade Méditerranéenne. Peu de changement de rendements sur le reste du pays
	Limitations	1 seul modèle L'olivier étant résistant à la sécheresse, pas de prise en compte d'un éventuel stress hydrique. Seules température et rayonnement sont utilisés en entrée du modèle.
Rosenzweig et al. (2014)	Scénario climatique	RCP8.5
	Région	Monde
	Type de culture	Maïs, blé, riz, soja (7 modèles d'agriculture, 5 GCM, projet AgMIP)
	Résultats pour le Maroc	En moyenne, importante diminution des rendements du blé en 2100, notamment dans le Sud du pays où les diminutions projetées dépassent 40%
	Limitations	Modèles non calibrés spécifiquement pour le Maroc

3.3. Energie

La diminution des ressources en eau projetée par les modèles affectera les réserves disponibles pour l'irrigation mais également pour la production d'énergie. Van Vliet et al. (2016) projettent ainsi pour le Nord du Maroc une diminution de la capacité hydroélectrique utilisable supérieure à 15% en 2050 par rapport à 1971-2000 (scénario RCP8.5). La diminution des débits des rivières et l'augmentation de la température peuvent également affecter le système de refroidissement des centrales thermoélectrique. Van Vliet et al. (2016) ne présentent pas de projections pour le Maroc mais, à titre de comparaison, leurs résultats montrent une diminution de la capacité utilisable supérieure à 15% pour le Sud de l'Espagne.

3.4. Santé

L'augmentation de la température signifie également une augmentation des extrêmes de chaleur. L'exposition prolongée à des températures élevées peut avoir des effets délétères sur la santé humaine (Kjellstrom et al., 2016), notamment pour les populations les plus fragiles ou exposées. Ahmadalipour et al. (2018) ont ainsi montré à l'aide d'un modèle empirique reliant le risque de mortalité des plus de 65 ans à la température et l'humidité de l'air qu'au Maroc ce risque serait augmenté d'un facteur 2 à 5 en période estivale à horizon 2050 pour le scénario RCP4.5, voire d'un facteur 3 à 8 dans le cas du scénario RCP8.5 (Fig.14). Le risque de surmortalité ne concerne pas uniquement les humains mais également les animaux d'élevage, ainsi que l'a montré l'importante surmortalité survenue dans les élevages avicoles marocains durant l'été 2003 (Balafrej, 2010).

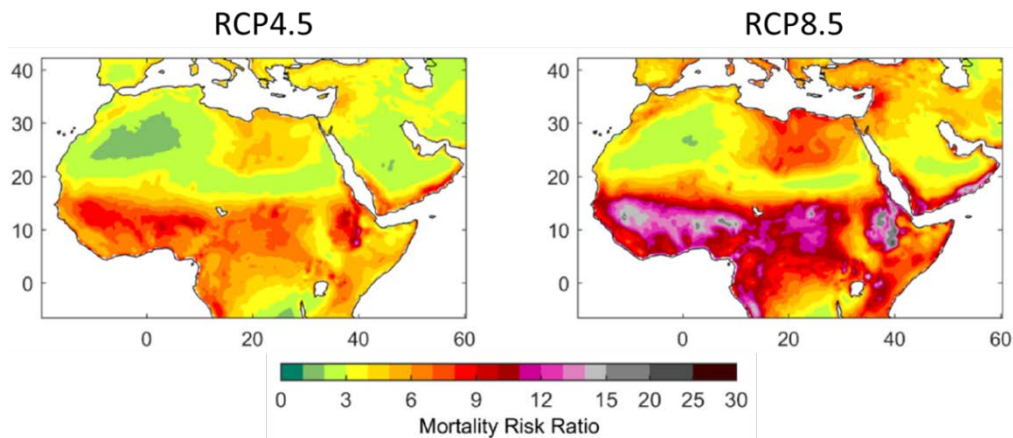


Figure 14 : Projection du risque de mortalité en été pour les plus de 65 ans en 2040-2069. Le ratio est défini comme le rapport du risque en 2040-2069 sur le risque pour la période historique. Reproduit de *Ahmadalipour et al. (2018)* avec permission d'Elsevier.

Le calcul de l'indice de chaleur (HI, voir Annexe 4) moyen en août au Maroc, construit à partir de la moyenne des projections CMIP5 (scénario RCP8.5), montre que ses valeurs restent similaires à celles de la seule température de l'air et passeraient d'environ 27 °C à plus de 32 °C à horizon 2100 (Fig.15). Pour la première moitié du 21^{ème} siècle, un mois d'août avec un HI moyen correspondant au premier niveau d'inconfort thermique deviendrait donc la norme. Vers la fin du

siècle, le HI moyen dépasserait 32 °C, seuil au-delà duquel le risque d'hyperthermie devient important en cas d'activité continue (voir Annexe 4).

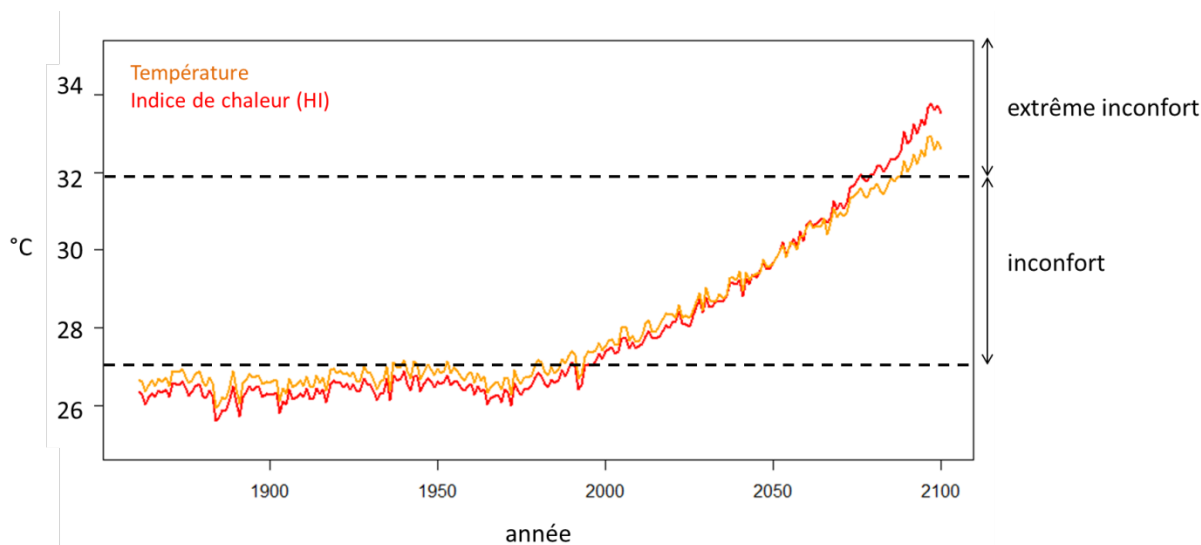


Figure 15 : Indice de chaleur moyen (rouge) et température moyenne (orange) au mois d'août au Maroc (en °C), calculé à partir des projections de température et d'humidité relative de la moyenne des modèles CMIP5 (période historique et scénario RCP8.5). Source des données : <https://climexp.knmi.nl>.

Ces résultats sont des valeurs moyennes mensuelles à l'échelle du pays et comme telles ne permettent pas de quantifier les risques à l'échelle journalière ou plus locale, en tenant compte des écarts de température entre les façades maritimes et saharienne (Fig.10). Ils illustrent cependant un risque accru d'exposition à des conditions de stress thermique durant l'été, ainsi que le montrent également les projections d'une importante augmentation de la durée des vagues de chaleur pour le Nord du Maghreb, et ce dès le milieu du siècle (voir section 3.2, Fig.8).

Eviter les risques pour la santé associés aux fortes chaleurs implique de réduire l'activité physique et donc une diminution de la capacité de travail. En s'appuyant sur les recommandations d'intensité d'activité physique tolérable suivant les valeurs de WBGT (température au thermomètre-globe mouillé, indice mesurant la chaleur ressentie par l'organisme, voir Annexe 5) Dunne et al. (2013) ont ainsi montré que les projections climatiques pour le scénario RCP8.5 pourraient entraîner à l'échelle mondiale une réduction de la capacité de travail durant le mois le plus chaud de 95% actuellement à environ 80% en 2050 et 60% en 2100. Le calcul de WBGT pour le mois d'août au Maroc suggère toutefois que le seuil de 25 °C, à partir duquel il faut commencer à réduire les activités physiques intenses, ne serait pas dépassé avant 2050, du moins sans tenir compte de l'exposition directe au rayonnement solaire (voir Annexe 5). Cependant, la faible résolution spatiale des projections et le fait que l'indice de chaleur corresponde lui au premier niveau de vigilance dès avant 2050 (Fig.15) suggèrent que ces projections de WBGT pour le Maroc pourraient sous-estimer l'impact sur la capacité de travail.

3.5. Tourisme

Le réchauffement global entraîne une élévation du niveau marin moyen en raison de la dilatation thermique de l'océan et de la fonte des glaces terrestres. Les projections proposées dans le dernier rapport du GIEC à horizon 2050 sont comprises entre +15 cm et +35 cm environ, avec relativement peu de différence entre les différents scénarios RCP. Il n'est cependant pas exclu que ces projections soient sous-estimées (Bamber et al., 2019), en raison des grandes incertitudes qui pèsent sur l'évolution à venir des calottes Groenlandaises et Antarctique, dont la contribution à la hausse du niveau marin a nettement augmenté ces dernières années.

Pour le Maroc, cette hausse du niveau marin aura un impact non seulement sur les populations vivant dans les zones côtières de faible élévation, mais également sur le tourisme via les risques de submersion de plages ou d'infrastructures. À titre d'ordre de grandeur, si l'on se base sur la population marocaine actuelle 1,82 millions de personnes seraient affectées par une élévation du niveau marin de +0,44 m. Pour +0,39 m, environ 50 % des plages entre Saidia et Ras el Ma seraient érodées et pour +0,89 m la quasi-totalité des plages de Tanger disparaîtraient, ainsi que 84,5 % des infrastructures de tourisme de la zone (World Bank, 2014).

Par ailleurs, la diminution des ressources en eau aura probablement pour conséquence une exacerbation de la compétition pour l'usage de l'eau entre le tourisme et les autres activités (World Bank, 2014). L'augmentation de l'amplitude et de la fréquence des extrêmes de chaleur pourrait également affecter la fréquentation touristique durant la période estivale.

IV. Conclusions

L'empreinte du changement climatique global est déjà discernable dans les observations météorologiques marocaines. Le rythme de réchauffement est plus intense que la moyenne globale, et s'accompagne d'un déclin marqué des précipitations annuelles sur les 40 dernières années. Les tendances pour la fréquence ou l'intensité des précipitations extrêmes sont en revanche généralement peu significatives sur le plan statistique, du moins sur la base des données du réseau de stations météorologiques qui reste peu dense et donc susceptible de mal caractériser les tendances de phénomènes très localisés.

Les multiples projections réalisées avec des modèles climatiques globaux ou régionaux montrent une accentuation de cette tendance au réchauffement et à la diminution des cumuls pluviométriques. Le Maroc risque donc de connaître une exacerbation de conditions déjà difficiles et d'affronter des périodes de sécheresse plus intenses et/ou plus fréquentes. Cette aridification, qui sera d'autant plus marquée que le niveau de réchauffement global sera élevé, aura des conséquences importantes sur les ressources en eau du pays et donc entre autres sur le secteur agricole. Plusieurs études de modélisation des impacts sur l'agriculture sont publiées mais présentent des limitations importantes, notamment l'absence de comparaison entre les projections de ressources en eau et les besoins pour maintenir ou développer l'irrigation.

Bibliographie

Ahmadalipour, A., & Moradkhani, H. (2018). Escalating heat-stress mortality risk due to global warming in the Middle East and North Africa (MENA). *Environment international*, 117, 215-225.

Balafrej, T. (2010). Le changement climatique au Maroc: Réalités et perspectives. In : *Changement climatique : enjeux et perspectives au Maghreb*, édité par le Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat.

Balaghi, R., El Hairech, T., Lahlou, M., Arrache, R. (2009). Projet “Adaptation au changement climatique de l’agriculture du Maghreb”. Composante 3, livrable 1 : Dispositif d’acquisition des données des modèles de gestion efficace des risques climatiques. *Rapport technique*.

Balaghi, R., El Hairech, T., Alaouri, M., Motaouakil, S., Benabdelouahab, T., Mounir, F., ... & Evangelisti, M. (2016). Climate change impact assessment using MOSAICC in Morocco.

Bamber, J. L., Oppenheimer, M., Kopp, R. E., Aspinall, W. P., & Cooke, R. M. (2019). Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(23), 11195-11200.

Driouech, F., Déqué, M., & Mokssit, A. (2009). Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco. *Climate dynamics*, 32(7-8), 1055-1063.

Driouech, F. and Mokssit, A. (2010). Variabilité et changements climatiques au Maroc, tendances observées et projections futures. In : *Changement climatique : enjeux et perspectives au Maghreb*, édité par le Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat.

Driouech, F., Déqué, M., & Sánchez-Gómez, E. (2010). Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global and Planetary Change*, 72(1-2), 1-10.

Dunne, J. P., Stouffer, R. J., & John, J. G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3(6), 563.

Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., ... & Eisner, S. (2014). Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3239-3244.

Filahi, S., Tanarhte, M., Mouhir, L., El Morhit, M., & Trambly, Y. (2016). Trends in indices of daily temperature and precipitations extremes in Morocco. *Theoretical and applied climatology*, 124(3-4), 959-972.

Filahi, S., Trambly, Y., Mouhir, L., & Diaconescu, E. P. (2017). Projected changes in temperature and precipitation indices in Morocco from high-resolution regional climate models. *International Journal of Climatology*, 37(14), 4846-4863.

Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., & Goodess, C. M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 C global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209-224.

Fader, M., Shi, S., Bloh, W. V., Bondeau, A., & Cramer, W. (2016). Mediterranean irrigation under climate change: more efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 953-973.

Gommes, R., EL HAIRECH, T., Rosillon, D., BALAGHI, R., & KANAMARU, H. (2009). World Bank–Morocco study on the impact of climate change on the agricultural sector: Impact of climate change on agricultural yields in Morocco. FAO, Rome, Italy (ftp://extftp.fao.org/SD/Reserved/Agromet/WB_FAO_morocco_CC_yield_impact/report/).

IPCC 2014: Barros, V. R., Field, C. B., Dokke, D. J., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Bilir, T. E., ... & Girma, B. (2014). 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.

IPCC 2014: Stocker, T. (Ed.). (2014). Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

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.

IRES (2011). Rapport stratégique de synthèse: Le Maroc face au changement climatique, Incidences sur la trajectoire de développement et perspectives d'adaptation.

Kjellstrom, T., Briggs, D., Freyberg, C., Lemke, B., Otto, M., & Hyatt, O. (2016). Heat, human performance, and occupational health: a key issue for the assessment of global climate change impacts. *Annual review of public health*, 37, 97-112.

Knutti, R., & Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4), 369.

Lelieveld, J., Proestos, Y., Hadjinicolaou, P., Tanarhte, M., Tyrlis, E., & Zittis, G. (2016). Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century. *Climatic Change*, 137(1-2), 245-260.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747.

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.

Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M., & Dell'Aquila, A. (2014). Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201314437.

Prudhomme, C., Giuntoli, I., Robinson, E. L., Clark, D. B., Arnell, N. W., Dankers, R., ... & Hagemann, S. (2014). Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3262-3267.

Requier-Desjardins, M. (2010). Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Maroc et en Tunisie et priorités d'adaptation. *Centre International de Hautes Études Agronomiques Méditerranéennes, Montpellier*.

Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., ... & Neumann, K. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3268-3273.

Schauberger, B., Ben-Ari, T., Makowski, D., Kato, T., Kato, H., & Ciais, P. (2018). Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Scientific reports*, 8(1), 16865.

Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2015). Climate change and Mediterranean agriculture: impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147, 103-115.

Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., ... & Gosling, S. N. (2014). Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3245-3250.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.

Tramblay, Y., Badi, W., Driouech, F., El Adlouni, S., Neppel, L., & Servat, E. (2012). Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Global and Planetary change*, 82, 104-114.

Tramblay, Y., & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289-302.

United Nations Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA) et al. (2017). Araba Climate Change Assessment Report - Main Report. Beirut, E/ESCWA/SDPD/2017/RICCAR/Report.

Van Vliet, M. T., Wiberg, D., Leduc, S., & Riahi, K. (2016). Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 6(4), 375.

World Bank Group. (2014). *Turn Down the Heat: Confronting the New Climate Normal*.

Annexes

1. Incertitudes

D'une manière générale, tous les modèles (climatiques, hydrologiques, agricoles...) ont leurs propres forces et faiblesses. Aucun des 42 modèles climatiques globaux (GCM) utilisés dans le cadre du projet CMIP5 ne présente de meilleures performances que les autres pour toutes les variables et toutes les régions du monde. On constate même que les résultats obtenus en considérant la moyenne des modèles sont en général meilleurs que ceux obtenus avec un modèle particulier. Il faut donc considérer avec prudence les projections obtenues avec un modèle unique, et lorsque cela est possible, il est préférable de prendre en compte plusieurs modèles afin de rendre compte de cette variabilité inter-modèles.

Par ailleurs, lorsque l'on combine différents modèles, on combine également les incertitudes. Ainsi, les modèles climatiques régionaux (RCM) permettent généralement d'obtenir de meilleures projections sur la sous-région considérée, mais il faut garder à l'esprit qu'outre leurs propres biais ils sont également tributaires de ceux du GCM utilisé pour fournir les conditions aux limites du domaine choisi. Il en va de même pour les modèles hydrologiques ou agricoles, qui non seulement présentent une grande variabilité inter-modèles, mais dont les performances dépendent également de la qualité des variables climatiques fournies en entrée.

Dans le cas des modèles agricoles, il faut souligner que les mécanismes représentés, les hypothèses implicites ou explicites (notamment de pratiques agricoles, d'irrigation et effet de fertilisation par le CO₂) ou encore la calibration peuvent être très variables d'un modèle à l'autre. De nombreux modèles par exemple ne prennent pas en compte les effets des extrêmes de chaleur sur la croissance des plantes et la plupart font l'hypothèse de l'absence de limitation des ressources en eau pour l'irrigation. Par ailleurs, certains ont été davantage utilisés dans certaines régions et de ce fait leurs hypothèses implicites peuvent être moins adaptées à des régions différentes.

2. Les scénarios RCP

Réaliser des simulations numériques du climat futur nécessite de fournir en entrée au modèle climatique les niveaux d'émission de gaz à effet de serre ou l'évolution de leur concentration atmosphérique. Dans le 4^{ème} rapport du GIEC (2007), des scénarios d'émission, dits scénarios SRES, étaient fournis par des modèles d'impact intégrés (IAM), en fonction de différentes hypothèses sur les trajectoires économiques et démographiques futures. Or, depuis, les déterminants socio-économiques des émissions ont évolué. Les trajectoires démographiques par exemple ont été revues à la baisse, tandis qu'il s'est avéré que le développement des pays émergents avait été sous-estimé. Aussi, pour le 5^{ème} rapport (2014), une nouvelle approche méthodologique a été utilisée: les scientifiques ont choisi *a priori* quatre scénarios d'émission de gaz à effet de serre, dits scénarios RCP (pour *Representative Concentration Pathway*, Moss et al., 2010). Ils incluent des informations sur tous les gaz à effet de serre, ainsi que sur l'usage des sols, mais ne dépendent pas d'hypothèses socio-économiques particulières. Ces scénarios RCP sont ensuite utilisés pour réaliser les projections climatiques et étudier l'impact d'un certain niveau d'émission

sur le climat. *En parallèle*, les socio-économistes élaborent leurs scénarios, dont les niveaux d'émission sont comparés aux RCP.

Les noms des quatre scénarios RCP font référence au niveau de *forçage radiatif*¹⁴ atteint à la fin du siècle. À chaque trajectoire de forçage radiatif correspond des trajectoires d'émission des différents gaz à effet de serre. Plus le forçage est élevé, plus la température globale augmente. Le RCP2.6 représente une trajectoire de forte réduction des émissions, qui permettrait de contenir le réchauffement global sous le seuil de +2 °C par rapport à la période préindustrielle. À l'opposé, le RCP8.5 représente une trajectoire de poursuite de fortes émissions, pour aboutir à un forçage radiatif supérieur à +8,5 W/m² en 2100 et une élévation de la température moyenne globale de l'ordre de +4 °C par rapport à 1986-2005. Le RCP4.5 et RCP6.0 se situent entre les deux.

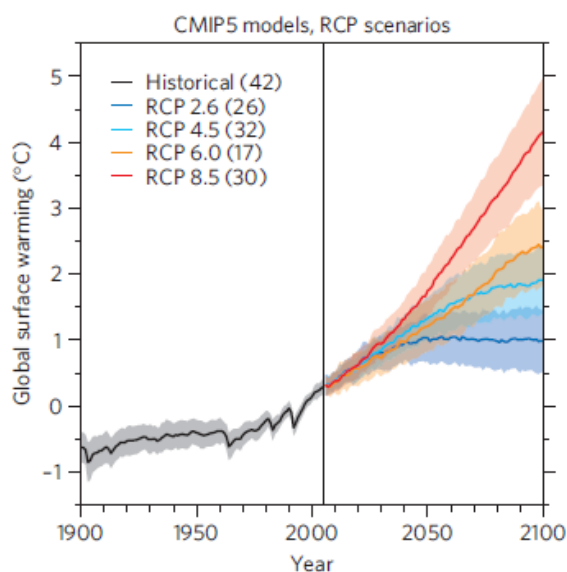


Figure A.1: Anomalies de température globale par rapport à 1986-2005 telles que simulées par les modèles climatiques CMIP5 pour les différents RCP. Le réchauffement entre 1850-1900 et 1986-2005 est estimé à +0.61 °C. Les traits pleins représentent la moyenne des projections et les zones en transparence l'écart-type. Source : Knutti et al. (2012), reproduit avec la permission de Springer Nature ©2012.

3. Projections de température et précipitation à l'échelle globale

À l'échelle *régionale*, on constate que l'évolution de la température et des précipitations moyennes simulées avec les modèles de climat globaux (GCM) répond de façon relativement linéaire au niveau de réchauffement global (Fig.A.2). Pour chaque degré de réchauffement global, on peut donc ainsi déterminer approximativement l'ampleur du changement à l'échelle régionale. Cette méthode, appelée *pattern scaling*, présente certaines limitations mais est néanmoins largement utilisée pour déterminer des projections régionales pour des scénarios de réchauffement différents des RCP (IPCC 2014).

Concernant les températures, on retrouve le pattern déjà constaté au 20^e siècle, avec une amplification du réchauffement sur les continents et aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Les projections de précipitations sont plus incertaines que pour la température et présentent une

¹⁴ Le forçage radiatif, exprimé en W/m², correspond à la différence entre le rayonnement entrant et sortant au sommet de la troposphère (10-16 km d'altitude), qui est modifié par le changement de composition atmosphérique en gaz à effet de serre.

variabilité spatiale et saisonnière importante. La diminution des précipitations sur le pourtour Méditerranéen apparaît cependant comme une caractéristique assez robuste dans les différents modèles climatiques.

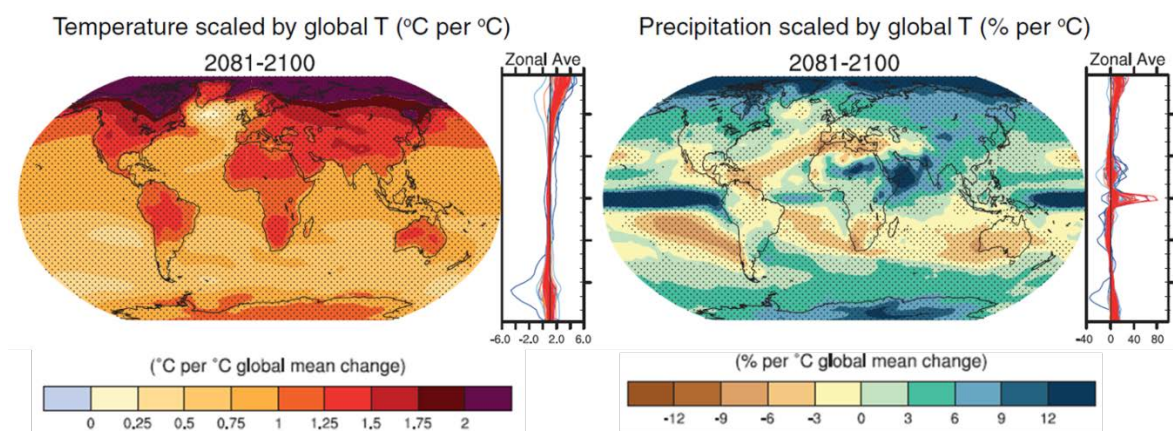


Figure A.2 : *Changement de température (gauche) et précipitation (droite) déterminés à partir de l'ensemble des simulations climatiques CMIP5 pour l'ensemble des RCP à horizon 2100, par °C de réchauffement global. Les pointillés indiquent les zones où le changement de valeur moyenne est supérieur au 95^e percentile de la distribution des modèles. Source : IPCC 2014, WGI, chap.12.*

4. Indice de chaleur

L'indice de chaleur (HI, pour heat index) est un indice combinant température de l'air et humidité relative pour déterminer la perception de chaleur par le corps humain. Quatre seuils ont été définis afin de quantifier les risques pour la santé encourus (voir tableau ci-dessous ; source : <https://www.weather.gov/ama/heatindex>).

HI (°C)	Risques
26–32 °C	Prudence : fatigue possible en cas d'exposition prolongée et/ou d'activité physique
32–39 °C	Extrême prudence: coup de chaleur, crampes de chaleur ou épuisement par la chaleur sont possibles en cas d'exposition prolongée et/ou activité physique.
39–51 °C	Danger: crampes de chaleur ou l'épuisement par la chaleur probables; coup de chaleur possible en cas d'exposition prolongée et/ou d'activité physique.
>51 °C	Danger extrême : coup de chaleur extrêmement probable

La formule de calcul est disponible sur le site de la NOAA : https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml.

5. WBGT et capacité de travail

Les êtres humains sont adaptés à des températures supérieures à la température de la peau (35 °C) ou même la température interne (37 °C), grâce au refroidissement que permet l'évaporation de la transpiration. L'efficacité de ce processus dépend de l'humidité ambiante, aussi la seule température de l'air est-elle un mauvais indicateur pour mesurer le stress thermique. Plusieurs indicateurs permettant de mieux caractériser le ressenti réel des individus ont été développés, parmi lesquels la température au thermomètre-globe mouillé (wet-bulb globe temperature, WBGT) qui peut s'approximer comme :

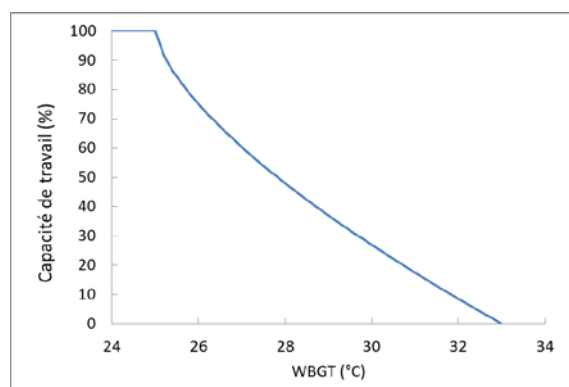
$$WBGT = 0,7 \times WBT + 0,3 \times T$$

avec WBT la température du thermomètre mouillé (wet bulb temperature) et T la température de l'air (on néglige les effets du rayonnement solaire et du vent). La WBT représente la température la plus basse qu'il est possible d'atteindre par simple évaporation pour des conditions de température et d'humidité donnée. A 100% d'humidité, l'évaporation ne peut avoir lieu et la WBT est alors égale à la température de l'air.

Cet indicateur a l'avantage d'avoir été développé pour déterminer le degré d'activité physique possible en fonction des conditions de température et d'humidité ambiante. En effet, si les êtres humains peuvent endurer une importante activité physique en conditions thermiques difficiles plusieurs heures durant, une exposition sur le long terme ou un niveau d'activité inadapté à ces conditions thermiques peuvent avoir des effets délétères sur la santé. L'industrie et l'armée ont ainsi défini des seuils des niveaux d'activité à ne pas dépasser et de cycles travail/repos en fonction de WBGT, le seuil maximal étant de 32 °C au-delà duquel il est impératif de rester au repos.

Sur la base de ces recommandations, Dunne et al. (2013) ont proposé une équation reliant la capacité de travail à WBGT :

$$\text{Capacité de travail (\%)} = 100 - 25 \times \max(0, WBGT - 25)^{2/3}$$



Cette relation a été appliquée aux projections climatiques du modèle climatique global ESM2M pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 à horizon 2200, en utilisant les valeurs mensuelles débiaisées et pondérées par la population. Les résultats montrent une importante diminution de la capacité de travail durant les mois les plus chauds pour les basses et moyennes latitudes. Pour le RCP8.5, la capacité de travail en moyenne globale pondérée par la population durant le mois le plus chaud chuterait de 95 % actuellement à 80 % en 2050 et 60 % en 2100.

Pour le Maroc, les projections de cette étude à horizon 2100 indiquent des valeurs de WBGT entre 26 °C et 28 °C selon les endroits pour le mois le plus chaud par décennie, ce qui correspondrait à une capacité de travail réduite à 75 % ou 48 % respectivement.

Afin d'avoir un meilleur aperçu de l'évolution temporelle de WBGT au Maroc entre 2000 et 2100, nous avons adopté la même approche en utilisant les projections température de surface et d'humidité relative moyenne en août obtenues pour le Maroc avec le modèle ESM2M et la moyenne des modèles CMIP5, pour le scénario RCP8.5 (données disponibles sur <https://climexp.knmi.nl>).

La méthode de calcul de WBT utilisée dans Dunne et al. (2013) fait appel à la pression atmosphérique, variable à laquelle nous n'avons pas accès. Nous avons donc utilisé la formule alternative utilisée par Ahmadalipour et al. (2018)¹⁵:

$$WBT = T \times \text{atan}[0,151977(RH + 8,313659)^{0,5}] + \text{atan}(T + RH) \\ - \text{atan}(RH - 1,676331) + 0.00391838 \times RH^{\frac{2}{3}} \times \text{atan}(0,023101RH) \\ - 4,4686035$$

avec T la température de l'air (°C) et RH l'humidité relative (%) au mois d'août. Cette formule est valable pour T < 50 °C et 5 % < RH < 99 %. Pour le Maroc, la pondération par la population a peu d'impact sur les résultats, nous n'en avons donc pas tenu compte.

¹⁵ Dans la gamme de température et d'humidité relative simulées par les modèles CMIP5 pour le Maroc au cours du 21^{ème} siècle, l'écart entre les valeurs obtenues avec cette formule et celles obtenues avec la formule utilisée par Dunne et al. (2013) (en supposant une pression atmosphérique de 1013 hPa) est inférieure à 1°C.

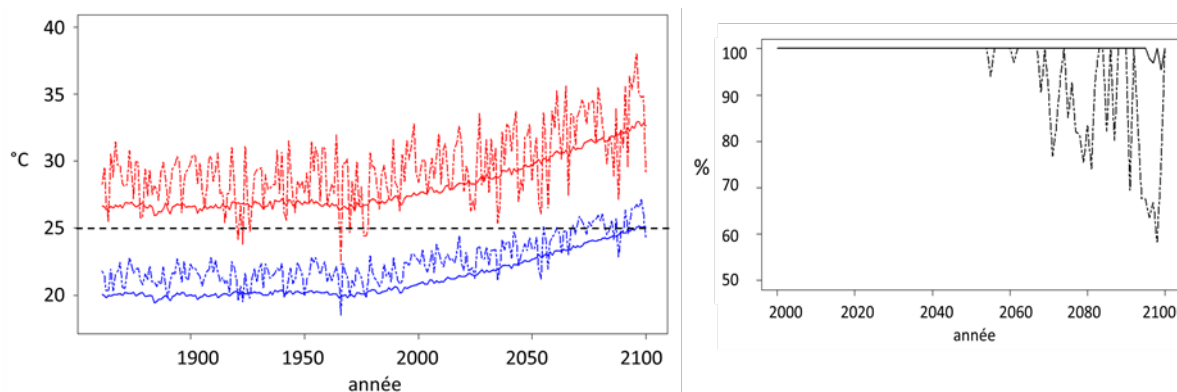


Figure A.3. Gauche : Evolution de la température moyenne de surface (rouge) et de la WBGT (bleu) au mois d'août au Maroc, simulée par le modèle ESM2M (pointillés) et par la moyenne des modèles CMIP5 (traits plein) sur la période historique et pour le scénario RCP8.5. Le trait horizontal en pointillé indique le seuil de WBGT=25 °C au-delà duquel l'activité physique doit commencer à être limitée. Source des données climatiques: <https://climexp.knmi.nl>. Droite : Capacité de travail au mois d'août au Maroc ($capacité(\%) = 100 - 25 \cdot \max(0, WBGT)^{2/3}$) suivant les projections du modèle ESM2M (pointillés) et de la moyenne des modèles CMIP5 (trait plein).

Les résultats obtenus (Fig.A.3) montrent que le modèle ESM2M simule des températures plus élevées que la moyenne CMIP5, avec une importante variabilité interannuelle. Nous retrouvons l'ordre de grandeur des résultats de Dunne et al. (2013) malgré une formule de calcul de la WBGT différente et l'absence de correction de biais : le seuil de WBGT=25 °C n'est dépassé qu'au-delà de 2050, avec des valeurs de l'ordre de 26 °C vers 2100 (Fig.A.3). Cette augmentation est suffisante pour entraîner une diminution de la capacité de travail au mois d'août pouvant aller jusqu'à 40 %, avec une importante variabilité interannuelle (Fig.A.2). Les résultats obtenus en considérant la moyenne des modèles CMIP5 sont différents, puisque si la température moyenne au mois d'août augmente d'environ +5 °C au cours du 21^{ème} siècle, WBGT reste inférieure au seuil de 25 °C, il n'y a donc pas de perte de capacité de travail.

Selon le modèle ESM2M, l'impact du changement climatique sur la capacité de travail durant la période estivale au Maroc n'interviendrait donc que dans la seconde moitié du siècle. Il s'agit toutefois d'un modèle simulant des températures supérieure à celle de la moyenne CMIP5. Si l'on considère plutôt la moyenne des projections CMIP5, une diminution de la capacité de travail n'aurait pas lieu avant la fin du siècle.

Ces résultats présentent cependant plusieurs limitations qu'il convient de souligner :

- Contrairement à Dunne et al. (2013), nous n'avons pas effectué de correction de biais sur les projections des variables climatiques utilisées pour calculer la WBGT.
- La résolution spatiale des modèles est grossière (2.5° pour la moyenne CMIP5, soit environ 250 km). Le Maroc n'est représenté que par 6 points de la grille du modèle, ce qui ne permet pas de rendre compte finement des projections de température et d'humidité relative à l'échelle locale.
- Les calculs ont été effectués avec des valeurs mensuelles. Or le maximum journalier de WBGT est typiquement supérieur d'environ 2 °C au maximum mensuel. Les valeurs journalières de WBGT seraient donc supérieures à celles présentées ici.

- Les recommandations de niveau d'activité en fonction de la WBGT ont été établies pour l'armée, donc pour des hommes entraînés et en pleine santé.
- L'impact du rayonnement solaire direct est négligé, la température ressentie pour du travail de plein air en journée est donc sous-estimée.

Glossaire

AgMIP	Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project, qui fait partie du projet ISI-MIP
CMIP5	Climate Model Intercomparison Project, Phase 5
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
ESCWA	United Nations Economic and Social Commission for Western Asia
GCM	Modèle de climat global
GIEC (ou IPCC)	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISI MIP	Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project
RCM	Model Climatique régional
RCP	Représentative concentration pathway
RICCAR	Regional Initiative for the Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources and Socio-Economic Vulnerability in the Arab Region