

Remerciement

C'est avec un plaisir non boudé que je rédige ces quelques lignes de remerciements. Elles sont primordiales, car de nombreuses personnes m'ont accompagné et soutenu durant ces années de thèse.

Je tiens à exprimer l'expression de ma plus profonde reconnaissance et de considération à Monsieur **Ahmed BOUKDIR** qui fût un parfait directeur de thèse pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'accueillant au sein de son laboratoire pendant ces années de recherche, merci pour le soutien et les conseils surtout dans les moments difficiles. Un grand merci de m'avoir donné la chance de faire cette thèse. Merci pour la disponibilité, et pour la bienveillance.

Je souhaite exprimer ma plus profonde gratitude à Monsieur **Abdellah El MAHBOUL**, le Président du Conseil général de l'Équipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau, qui m'a proposé ce sujet de thèse, Merci pour ses conseils et ses encouragements qui ont été pour moi un grand soutien moral.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur **Abdellah BOURAK**, le Directeur de l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia, mes vifs remerciements à l'ensemble du corps de l'agence de l'Oum Er Rbia de Béni-Mellal.

Je dois également remercier les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir juger ce travail, et d'assister à la soutenance de ma thèse. Je tiens tout d'abord à remercier Pr. **Mohamed El Baghdadi**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal, d'avoir accepté de présider le jury. Je remercie également Pr. **Abdellah Lakhouili**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, Pr. **Ahmed Akhssas**, Professeur à l'École Mohammadia d'ingénieurs de Rabat, Pr. **Abderrahmene El Ghmari**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Béni Mellal, d'avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteurs. Je tiens à remercier également Pr. **Soumia Amir**, Professeur à la Faculté Polydisciplinaire Béni Mellal, d'avoir accepté examiner ce travail.

Merci pour votre temps, pour vos commentaires pertinents et constructifs, Merci pour la discussion très enrichissante, et pour la valeur ajoutée certaine à mon travail.

J'adresse également mes profonds remerciements, à mes collègues Mlle. Loubna ELHAJJI, Mlle. Soukaina SOUFIANI, Mlle. Aicha AKOUZ, pour leurs conseils, leurs remarques objectives et leurs orientations scientifiques, leurs relectures et corrections de cette thèse.

En outre, la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral et affectif de ma mère et ma sœur. Je les remercie pour leur appui et leur dévotion durant toutes ces années. Je remercie ainsi tous les membres de ma famille qui ont su me comprendre dans les moments les plus difficiles lors de mes déplacements et mes absences.

Mes plus vifs remerciements vont à mon équipe de travail pour la disponibilité, le soutien et l'aide au cours de toute la période de thèse.

Je remercie toutes celles et ceux qui m'ont aidé ou soutenu durant ma thèse et que j'aurais oublié de citer....

Merci

AVANT PROPOS

- ❑ **Nom et Prénom** : Zhour ECHAKRAOUI
- ❑ **Directeur de thèse** : Mr Ahmed BOUKDIR, Professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences et techniques Beni Mellal.
- ❑ **Intitulé de l'étude** : Les changements climatiques dans le bassin de l'Oum Er Rabia : identification, scénarios du futur et stratégie d'adaptation
- ❑ **Laboratoire où l'étude a été réalisée** : Laboratoire de Génie industrielle de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal.
- ❑ **Cadre de l'étude** : cette étude a été réalisée dans le cadre de la coopération scientifique entre la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal et l'agence du bassin de l'Oum Er Rbia.
- ❑ **Principaux organismes participants à la réalisation de ce travail** :
 - La Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal ;
 - L'Agence du bassin hydraulique de l'Oum Er R'Bia de Béni Mellal ;
 - La Faculté des Sciences de Porto-Portugal
 - L'école d'ingénierie agricole et forestière de Léon – Espagne.
- ❑ **Date de démarrage de l'étude** : 2015
- ❑ **Critères de choix du sujet** :

Le changement climatique, qui pendant plusieurs années avait fait l'objet de controverse, est aujourd'hui une réalité incontestable et perceptible partout à travers le monde. En effet, on assiste de plus en plus à d'intenses canicules, d'inhabituelles inondations, des sécheresses plus marquées, l'élévation du niveau des mers, des migrations exceptionnelles d'espèces animales.(Zeino-mahmalat & Bennis, 2012)

Le changement climatique perturbe plusieurs secteurs et affecte pas mal de ressources naturelles parmi lesquelles se distingue l'eau. Le rapport de Cap-Net(CAP-NET, 2006) signale que 1,1 milliard de personnes n'ont toujours pas accès à l'eau potable tandis que deux millions de tonnes de déchets humains sont rejetés chaque jour dans les cours d'eau et que 90% de catastrophes naturelles dans les années 90 étaient liées à l'eau.

L'eau au Maroc est un bien précieux. Si les apports pluviométriques sur l'ensemble du territoire sont en moyenne annuelle de l'ordre de 130 milliards de m³, le pays ne dispose que de 22 milliards de m³ d'eau renouvelable (Laouina, 2006) . Les ressources superficielles actuellement mobilisées atteignent 11 milliards de m³, les eaux souterraines quant à elles représentent 4 milliards mobilisables dont 2,6 sont déjà utilisés (Allain-El Mansouri, 2001). Alors que le Maroc, à l'instar des autres pays de la Méditerranée, n'est pas à l'abri des effets du changement climatique sur ces ressources en eau. les changements climatiques attendus pour le Maroc, auraient des conséquences néfastes directes et indirectes sur le potentiel en ressources en eau, tant du point de vue quantité que qualité, sur les besoins en eau et sur l'efficience d'utilisation de cette ressource pour les différents usages. Ce qui place ce pays parmi ceux qui doivent impérativement adopter une stratégie d'adaptation à ces changements.(Alibou, 2002)

Le bassin de l'Oum Er Rbia, l'un des plus grands bassins du pays, s'étend sur une superficie de 35 000 km² avec un allongement de 550 km. Le cours d'eau d'Oum Er-Rbia prend son origine au Moyen Atlas à 1 800 m d'altitude, traverse la chaîne du Moyen Atlas, la plaine du Tadla et la Meseta côtière et se jette dans l'Océan Atlantique, près de la ville d'Azemmour, à environ 16 km au Nord de la ville d'El Jadida (PDAIRE, 2010) .

Le climat y est semi-aride à aride et les précipitations sont faibles et caractérisées par une grande variabilité spatio-temporelle. L'agence du bassin hydraulique d'Oum ER rabia précise que les ressources en eau du bassin sont irrégulières et inégalement réparties. Elle signale aussi que le bilan hydraulique des nappes est globalement déficitaire dénotant d'une surexploitation dangereuse des eaux souterraines. Ainsi, on constate que dans un contexte de raréfaction de la ressource en eau, la demande ne cesse d'augmenter. Cela témoigne de la nécessité de procéder à une stratégie d'adaptation aux changements climatiques.

□ Contenu du rapport :

Le rapport relatif à ce travail s'articule comme suit :

- Tout d'abord une introduction générale où sont présentés la problématique, la démarche méthodologique et les objectifs de cette étude ;
- Une première partie qui, en premier lieu dévoile une présentation générale de la science du changement climatique et la modélisation du climat, en second lieu cherche à définir les changements climatiques au Maroc pour la période 1970/2000 et de préciser avec autant de précisions que possibles l'évolution du climat au Maroc d'ici 2060.
- La seconde partie cherche à identifier les changements climatiques dans le bassin de l'Oum Er Rabia et à quantifier l'impact possible de ce changement climatique sur les ressources en eau et sur les ruissellements pour proposer par la suite une stratégie d'adaptation aux changements climatiques dans le bassin.
- En fin, une conclusion générale et des recommandations permettant de mettre l'accent sur les axes et volets à développer en termes de recherche et d'étude sur ce bassin afin de mieux s'adapter aux changements climatiques.

□ Liste des articles publiés

1) **Zhour Echakraoui**, Ahmed. Boukdir, Olaide. Aderoju, El Hassan Ben – Saïd, Abdelhamid. Zitouni, Rachid El maslouhi and António Guerner Dias: « **The climate changes in the sub-basin of the Oum Er rbia central and the impact on the surface waters** ». *Journal of Environment, Energy and Earth Sciences*, Vol 37, 2018.

2) **Zhour Echakraoui**, A. Boukdir, E. Ben-said, A. Zitouni, O. Aderoju, H. Ikhmerdi, M. R. Meslouhi: « **Impact study of climate change on water resources in the Tessaout basin (morocco)** ». *Journal of Water Sciences and Environment Technologies*.

3) Olaide M. Aderoju, Guerner A. Dias et Zhour **Echakraoui**: « **An assessment of renewable energy sources & municipal solid waste for sustainable power generation in Nigeria** » *International Journal of Environment and Earth Science*.

4) A. Zitouni, A. Boukdir, V.R. Ekouele Mbaki, **Z. Echakraoui**, W.Baite, H. Ben Said, E. Sabri, A. Elissami et M.R. El Masouhi: « **Application of electrical geophysics to the release of water resources, case of Ain Leuh (Morocco)** » *Journal of Environment, Energy and Earth Sciences*, Vol 37, 2018.

5) A. Zitouni, A. Boukdir, V.R. Ekouele Mbaki, Z. Echakraoui, W.Baite, H. Ben Said, E. Sabri, A. Elissami et M.R. El Masouhi : « **Contribution of the method of the electric resistivities in the gratitude (recongnition) of the aquifer turonien in the plain of Tadla and the tray of phosphates (Morocco)** ». *JOWSET*, 2017 (03), N°01, 88-94.

6) El Mouatassime Sabri, A. Boukdir, R. Meslouhi, M. Mabrouki, A. Mahboul, V.R. Mbaki, A.Zitouni, W.Baite, **Z.Echakraoui**: « **Predicting Soil Erosion and Sediment Yield in Oued El Abid Watershed, Morocco** », *Athens Journal of Sciences*, Vol. 4, No. 3, 2017.

7) Elhassan Ben-said, Ahmed Boukdir, A.Mahboub , K. El Mouqaddam, Abdelhamid Zitouni, **Z. Echakraoui** et H. Ikhmerdi: «**State of the quality of waters in the quaternary water table of Tafilalet (Morocco)** ». *JOWSET*, 2017 (02), N°02, 241-246

□ Communications internationales et nationales

- **ZHOUR.ECHAKRAOUI**, A. BOUKDIR, A. ZITOUNI, W. BAITE, S. EL MOUATASSIME, V.R. EKOUELE MBAKI, H. IKHMERDI, E.BEN-SAID, L. ALILI, A. EL MAHBOUL, R. EL MESLOUHI (2016) : *Les changements climatiques et les mesures d'adaptation au Maroc*, Le colloque international « Migrations Climatiques : tendances et enjeux » à Rabat le 20 Mai 2016, Résumé.
- **ZHOUR.ECHAKRAOUI**, A. BOUKDIR, A. ZITOUNI, W. BAITE, S. EL MOUATASSIME, V.R. EKOUELE MBAKI, H. IKHMERDI, E.BEN-SAID, L. ALILI (2016) : *Stratégie d'adaptation de la gestion des ressources en eau dans le Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia au changement climatique*, CI3E à Al Hoceima le 21-22 Avril 2016, pp.90, Résumé.
- **ZHOUR. ECHAKRAOUI**, A. BOUKDIR, A. CHAOUNI, W. BAITE, A. ZITOUNI, S. EL MOUATASSIME, V.R. EKOUELE MBAKI, H. IKHMERDI, E.BEN-SAID, L. ALILI (2016) : *Maîtrise Et optimisation de la station de traitement des eaux usées de Khouribga*, CI3E à Al Hoceima le 21-22 Avril 2016, pp.91, Résumé.

- **ZHOUR ECHAKRAOUI**, A. BOUKDIR, W. BAITE, A. ZITOUNI, S. EL MOUATASSIME, VIVIEN R. EKOUELE MBAKI, M. BADDI et A. EL KASRI SRIE (2015), *Etude de l'impact de la décharge publique de caïdat Ait Attab sur les ressources en eau*, FP Er-Rachidia, May 2015, pp. 41, Résumé.
- **ZHOUR.ECHAKRAOUI**, A. BOUKDIR, W. BAITE, A. ZITOUNI, S. EL MOUATASSIME, M. BADDI A. EL KASRI *La station d'épuration et le développement durable* 1^{er} Congrès International Polydisciplinaire (2015), FP Beni Mellal, Juin 2015, pp. 75, Résumé.
- **ZHOUR.ECHAKRAOUI**, A. BOUKDIR, A. ZITOUNI, W. BAITE, S. EL MOUATASSIME, V.R. EKOUELE MBAKI, I. BOUTIRAME *Les changements climatiques et les mesures d'adaptation : Gestion Intégrée des Ressources Eaux (GIRE) Application Des Technologies Géospatiales En Géosciences* (2015), FP Taza, Octobre 2015, pp. 91, Résumé.
- ABDELHAMID ZITOUNI, A. BOUKDIR, **Z. ECHAKRAOUI**, W. BAITE, V.R. EKOUELE MBAKI, et S. EL MOUATASSIME (2015) : *apport de la méthode des résistivités électriques au dégagement des ressources en eaux souterraines dans la plaine du Tadla et plateau des phosphates (MAROC)*, EDE5 a Settata le 24-25-26 Novembre 2015, pp.27, Résumé.
- ABDELHAMID ZITOUNI, A. BOUKDIR, W. BAITE, S. EL MOUATASSIME, **Z. ECHAKRAOUI** et V.R. EKOUELE MBAKI. (2015) : *Evolution des teneurs en nitrates de la nappe phréatique de la plaine du Tadla état des lieux, foyers de pollution et risque sur la sante de la population*, EDE5 a SETTAT le 24-25-26 novembre 2015, Résumé.
- ABDELHAMID ZITOUNI, A. BOUKDIR, W. BAITE, **Z. ECHAKRAOUI**, S. EL MOUATASSIME, V.R. EKOUELE MBAKI. (2015) : *choix de site pour la mise en place d'un centre de transfert des déchets pour le groupement des communes : kasba Tadla, el Ksiba, Zawiat Chikh, application des technologies géospatiales en géosciences* (2015), FP Taza, Octobre 2015, pp. 76-77, Résumé.
- ABDELHAMID ZITOUNI, A. BOUKDIR, R. HASSAN, W. BAITE, **Z. ECHAKRAOUI**, V.R. EKOUELE MBAKI, M. BADI, S. EL MOUATASSIME et A. EL KASRI. (2015) : *les systèmes d'information géographique (SIG) et choix de site pour la mise en place d'une station d'épuration des eaux usées pour la ville de Kasba Tadla*. SRIE (2015), FP Er-Rachidia, May 2015, pp.

- *EL MOUATASSIME.SABRI, A. BOUKDIR, A. EL MAHBOUL, M. BAIRISE, R.M. EL MESLOUHI, A. ETTAQY, A. ZITOUNI, W. BAITE, Z. ECHAKRAOUI, A. BADDI, A. EL KASRI, V.R. EKOUELE MBAKI (2015) : Analyse de l'érosion des sols par géomatique, SRIE (2015), FP Er-Rachidia, May 2015, pp. 35, résumé.*
- *EL MOUATASSIME. SABRI, A. BOUKDIR, A. EL MAHBOUL, M. BAIRISE, R.M. EL MESLOUHI, A. ETTAQY, A.ZITOUNI, W.BAITE, Z.ECHAKRAOUI, A.BADDI, A.EL KASRI, V.R. EKOUELE MBAKI (2015) :évaluation de l'érosion et sédimentation des sols dans le bassin versant d'oued el Abid région Tadla Azilal, en Maroc, à l'aide d'USLE, SIG, et SDR , 1^{er} Congrès International Polydisciplinaire (2015) , FP Beni Mellal, Juin 2015,pp. 67-68,Résumé.*
- *EL MOUATASSIME. SABRI, A. BOUKDIR, A. EL MAHBOUL, M. BAIRISE, R.M. EL MESLOUHI, A. ETTAQY, A. ZITOUNI, W. BAITE, Z. ECHAKRAOUI, A. BADDI, A. EL KASRI, V.R. EKOUELE MBAKI (2015) : Erosion hydrique dans le bassin versant d'oued el Abid région Beni Mellal-Khenifra, en Maroc. Application Des Technologies Géospaciales En Géosciences (2015), FP Taza, Octobre 2015, pp. 216-217, Résumé.*
- *Wissal BAITE, A. BOUKDIR, Z. ECHAKRAOUI, A. ZITOUNI, E. SABRI et V.R. EKOUELE MBAKI. (2015). L'application du SIG a l'élaboration d'un programme de recharge artificielle de la nappe de chtouka. Congrès International sur l'application des technologies Géospaciales en Géosciences. Taza, Octobre 2015, pp 130. Résumé*
- *Wissal BAITE, A. BOUKDIR, A. TSOULI FAROUKH, A. GHAFIRI, S. EL MOUTAKI, M. HAKDAOUI, A. ZITOUNI, Z. ECHAKRAOUI, E. SABRI, V. R. EKOUELE MBAKI. (2015). LE DEVELOPPEMENT DURABLE DE LA FORET DE BENSLIMANE. Congrès International Polydisciplinaire sur les enjeux stratégiques du développement durable intégré en Afrique. Béni Mellal, Juin 2015, pp 129. Résumé*
- *Wissal BAITE, A. BOUKDIR, A. ZITOUNI, Z. ECHAKRAOUI, E. SABRI, V. R. EKOUELE MBAKI, M. R. EL MESLOUHI (2015). Extraction du réseau hydrographique et délimitation du bassin versant de Souss massa. Workshop national sur le système d'information régional sur l'eau. Errachidia, Mai 2015, pp 46. Résumé*
- *Wissal BAITE, A. BOUKDIR, A. GHAFIRI, S. EL MOUTAKI, M. HAKDAOUI, A. TSOULI FAROUKH, A. ZITOUNI, Z. ECHAKRAOUI, E. SABRI, V. R. EKOUELE MBAKI. (2015) Cartographie et étude diachronique de la forêt de Benslimane par les outils SIG et télédétection. Les 1ères Journées des Jeunes Chercheurs en Géosciences. Bouznika, Mars 2015, pp 2. Résumé*

- *Wissal BAITE, AHMED BOUKDIR, ZHOUR ECHAKRAOUI, ABDELHAMID ZITOUNI, EL MOUATASSIME SABRI, V. R. EKOUELE MBAKI, MED RACHID EL MESLOUHI MOHAMED EL AFI ET MOHAMED BADI. (2015). Etude de l'impact de la décharge publique de la ville de Kasba Tadla sur les ressources en eau de la région. 1er Colloque National Climat, Eau et Société. Béni Mellal, mars 2015, pp 37. Résumé*
- *EKOUELE MBAKI Vivien Romaric, BOUKDIR Ahmed, EL MAHBOUL A., EL ISSAMI A., ZITOUNI Abdelhamid, BAITE Wissal, SABRI El Mouatassime, ECHAKRAOUI Zhour (2015), Géomorphologie dynamique du Sahel – Doukkala. Apport à la gestion des eaux de la région, 1^{er} Congrès international Polydisciplinaire, Juin 2015, Béni Mellal p51*
- *EKOUELE MBAKI Vivien Romaric, BOUKDIR Ahmed, HILALI Mohamed, EL ISSAMI A., MABROUKI Mustapha, ZITOUNI Abdelhamid, SABRI El Mouatassime, BAITE Wissal, ECHAKRAOUI Zhour (2015), Caractérisation hydrogéomorphologie de la région du Sahel-Doukkala : Apport à la recharge artificielle des nappes de la région, 5^e édition du congrès international : Eaux, Déchets et Environnement, Novembre 2015, Settat*
- *EL HASSAN BEN-SAID, AHMED BOUKDIR, LAHCEN ALILI HASSAN IKHMERDI, ABDELHAMID ZITOUNI, ZHOUR ECHAKRAOUI, IKRAME BOUTIRAME, WISSAL BAITE, (2016) : Gestion intégrée des ressources en eau dans la nappe des Ouled Abdoun (Khouribga, Maroc). Premier Congrès International des Etudes sur l'Eau et l'Environnement (CI3E 2016), ENSA ELHOCEIMA, Avril2016, Résumé*
- *EL HASSAN BEN-SAID, AHMED BOUKDIR, HASSAN IKHMERDI, LAHCEN ALILI, ABDELHAMID ZITOUNI, WISSAL BAITE, ZHOUR ECHAKRAOUI, IKRAME BOUTIRAME, (2016): Choix de site pour la mise en place d'une décharge contrôlée dans la ville de Zaouit Cheikh. Première Edition des journées,FSM MEKNES Juin2016, Résumé*

❑ Formations et stages

- Participation à une formation dans le domaine de «**la géomatique appliquée à la gestion des ressources naturelles** » au sein de l'école d'ingénierie agricole et forestière de Léon-Espagne (10 mois)
- Participation à la formation intitulée : **Le modèle agro-hydrologique SWAT**, à Faculté des lettres et des sciences humaines, Béni-Mellal, le 27 et 28 Juin 2019.

- Participation à la formation intitulé « **Analyse de données avec SPSS : Nettoyage des données, tests d'hypothèse et AFE** », à Rabat, le 27 et 28 Avril 2019.

- Participation à la formation sur « **la géophysique et l'hydrogéologie pour une meilleure gestion des ressources en eau souterraines du bassin de l'Oum Er Rbia** » au sein de l'ABHOER à Béni Mellal-Maroc.

- Participation à une formation en **Anglais** (10 mois) à la faculté des lettres de Porto-Portugal dans le cadre du programme Erasmus.

- Participation à une formation dans le domaine « **des Stratégies d'adaptation au changement climatique** » au sein de la faculté des Sciences de Porto-Portugal dans le cadre du programme Erasmus.

- Participation à l'organisation de la sixième Edition du congrès international : **Eaux, Déchets, Environnement** du 12 au 14 Décembre 2017.

Résumé

Le bassin de l'Oum Er Rbia subit fortement, à l'image des autres bassins du Maroc, les effets directs et indirects des changements climatiques en premier lieu sur ses ressources en eau hautement stratégiques pour la région et pour le pays. Cela se retrouve au niveau des températures moyennes de l'air en croissance continue et aussi au niveau des précipitations avec un potentiel moyen en eau du bassin en décroissance significative depuis une quarantaine d'années.

Cette étude entre dans le but de préciser les scénarios d'évolution possibles future du climat du bassin OER, de quantifier l'impact possible de ces changements climatiques sur les ressources en eau pour dégager une stratégie d'adaptation de la gestion des ressources.

Les résultats des simulations effectuées avec le modèle BCC_CSM1.1 prévoit un réchauffement dans le bassin OER entre 0.07 °C et 1 °C à l'horizon 2050, une diminution des précipitations de 0.01 à 0.3 mm par jour par décennie à l'horizon 2050., on peut dire que le bassin connaîtrait une variation des précipitations moyennes annuelles située entre une diminution de l'ordre de 200 mm (probabilité 2/3) et une augmentation de l'ordre de 60 mm (probabilité 1/3) pour 2050. donc pour faire face à ces changements climatiques on fait appel à une stratégie d'adaptation .

La méthode utilisée pour élaborer cette stratégie est une démarche participative, associant les différents acteurs du bassin concernés par le secteur eau, utilisant l'outil stratégique Climate Proofing For Development (CP4Dev) conçu par la GIZ pour ce type de travaux.

Cinq axes stratégiques d'adaptation ont été identifiés pour réduire les impacts des changements climatiques sur la gestion des ressources en eau du bassin OER : Gestion et développement de l'offre pour répondre aux besoins futurs en eau du bassin OER ,Optimisation de la demande en eau ,préservation des ressources en eau et lutte contre la pollution de l'eau dans le bassin en particulier durant les périodes de sécheresse, de vagues de chaleur et d'inondations, prévention et réduction des risques hydro- climatiques, amélioration de la gouvernance au niveau de la gestion des ressources en eau .

Mots-clés : Changements climatiques, stratégie d'adaptation, Impact, modèle, scénarios.

Abstract

The Oum Er Rbia basin, like other basins in Morocco, is strongly affected by the direct and indirect effects of climate change, first and foremost on its highly strategic water resources for the region and for the country. This can be seen in the level of average air temperatures in continuous growth and also in the level of rainfall with an average water potential of the basin in significant decline over the last forty years.

This study aims at specifying the possible future climate change scenarios of the OER basin, quantifying the possible impact of climate change on water resources in order to identify a strategy for adapting resource management.

The results of the simulations carried out with the BCC_CSM1.1 model predict a warming in the OER basin between 0.07°C and 1°C by 2050, a decrease in precipitation of 0.01 to 0.3 mm per day per decade by 2050. If we take into account the climate change, we can say that the basin would experience a variation in average annual precipitation between a decrease of about 200 mm (probability 2/3) and an increase of about 60 mm (probability 1/3) for 2050.

The method used to develop this strategy is a participatory approach, associating the different actors of the basin concerned by the water sector, using the strategic tool Climate Proofing for Development (CP4Dev) designed by the GIZ for this type of work.

Five strategic areas of adaptation have been identified to reduce the impacts of climate change on the management of water resources in the OER basin: Management and development of supply to meet future water needs of the OER basin, optimization of water demand, preservation of water resources and fight against water pollution in the basin especially during periods of drought, heat waves and floods, prevention and reduction of hydro-climatic risks, improvement of governance at the level of water resources management.

Keywords: Climate change, adaptation strategy, Impact, model, scenarios.

ملخص

تأثر حوض أم الربيع كباقي الأحواض المائية الأخرى في المغرب بالآثار المباشرة وغير المباشرة للتغيرات المناخية، حيث تعاني في المقام الأول الموارد المائية . و يمكن تحديد هذه التغيرات المناخية على مستوى متوسط درجات حرارة الهواء المتزايدة باستمرار وأيضاً على مستوى هطول الأمطار الذي يعاني من انخفاض كبير لمدة أربعين عاماً تقريباً.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد سيناريوهات التطور المستقبلية المحتملة لمناخ الحوض ، و التأثير المحتمل لهذه التغيرات المناخية على الموارد المائية من أجل وضع استراتيجية للحد من هذه التغيرات والتكيف معها.

تتنبأ نتائج عمليات المحاكاة التي تم إجراؤها باستخدام نموذج BCC_CSM1.1 بارتفاع درجة حرارة الحوض بين 0.07 درجة مئوية و 1 درجة مئوية بحلول عام 2050 ، وانخفاض في هطول الأمطار من 0.01 إلى 0.3 ملم يومياً لكل عقد بحلول عام 2050. ، يمكننا القول أن الحوض سيشهد تبايناً في متوسط هطول الأمطار السنوي بين انخفاض يبلغ حوالي 200 ملم وزيادة بنحو 60 ملم لعام 2050. للتعامل مع هذه التغيرات المناخية ، يتم استخدام استراتيجية التكيف.

الطريقة المستخدمة لتطوير هذه الاستراتيجية هي نهج تشاركي ، يربط مختلف الجهات الفاعلة المعنية بقطاع المياه في الحوض ، باستخدام الأداة الإستراتيجية المناخية من أجل التنمية .

تم تحديد خمسة محاور تكيف استراتيجية للحد من آثار تغير المناخ على الموارد المائية : إدارة وتطوير الإمداد لتلبية الاحتياجات المائية المستقبلية للحوض ، والحفاظ على الموارد المائية ومكافحة تلوث المياه في الحوض خاصة أثناء فترات الجفاف وموجات الحرارة والفيضانات ، ومنع وتقليل المخاطر المائية المناخية ، وتحسين الحكامة في مستوى إدارة الموارد المائية.

Table des matières

Remerciement.....	A
AVANT PROPOS.....	B
Résumé.....	C
Abstract.....	D
ملخص.....	E
Table des matières	F
Liste des figures.....	G
Liste des tableaux	H
Liste alphabétique	I
Introduction générale	1
Partie I : Synthèse bibliographique et changements climatiques au Maroc	3
Chapitre I : Synthèse bibliographique	4
1. Le cycle hydrologique.....	4
1.1. Le bilan hydrologique à l'échelle globale à l'échelle du bassin versant.....	4
2. La science des changements climatiques	7
2.1. La différence entre Climat et Temps.....	8
2.2. Le système climatique	9
2.3. Les facteurs qui influencent le climat « Les forçages climatique »	12
2.4. Fluctuations climatiques naturelles exemple : La Niña et El Niño	13
2.5. L'évolution du climat	14
2.6. Les causes de changements du climat.....	16
2.7. Réchauffement planétaire et changement climatique.....	16
2.8. Historique de la science des changements climatiques.....	18
2.9. Instruments pour Prévoir et projeter les changements climatiques.....	20
2.10. Les répercussions des changements climatiques	22
2.11. Les avantages de la science du changement climatique.....	22
2.12. L'importation de la science des changements climatiques.....	23
3. Facteurs anthropiques des changements climatiques	24
3.1. Les principaux gaz à effet de serre	24

3.1.1.	Le dioxyde de carbone (CO ₂) :	25
3.1.2.	Le méthane (CH ₄)	28
3.1.3.	Carbone	31
3.1.4.	Le protoxyde d'azote.....	32
3.1.5.	Les gaz fluorés	34
3.1.6.	La vapeur d'eau	36
4.	La modélisation du climat.....	36
4.1.	Les scénarios d'émission.....	38
4.1.1.	Les scénarios SRES.....	38
4.2.	Les modèles climatiques.....	42
4.3.	Projet d'intercomparaison de modèles couplés Phase 5(CMIP5).....	43
Chapitre II : Les changements climatiques à l'échelle du monde		46
1.	Introduction	46
2.	Les changements climatiques observées à l'échelle du monde.....	46
2.1.	Anomalies observées des températures en surface (1850-2012).....	46
2.2.	Changements observés concernant les précipitations annuelles sur les terres émergées	47
2.3.	Le réchauffement observe des océans (1950-2010).....	48
2.4.	Acidification observée des océans.....	49
2.5.	Élévation observée du niveau des mers (de 1900 à 2010)	50
2.6.	Observation du recul des glaces dans les mers de l'Arctique (1900-2010)	50
2.7.	Changements observés dans les systèmes physiques et biologiques	51
3.	Evolutions projetées et conséquences des changements climatiques.....	52
3.1.	Profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP)	52
3.2.	Changement projeté de la température moyenne à la surface	53
3.3.	Changement projeté concernant les précipitations moyennes	54
3.4.	Changement projeté du pH de la surface des océans.....	55
3.5.	Élévation projetée du niveau des mers	56
3.6.	Etendue de la banquise dans l'hémisphère Nord en septembre	57
3.7.	Effets projetés des changements climatiques en Afrique.....	58
3.8.	Effets projetés des changements climatiques sur les petites îles	59

3.9. Réchauffement planétaire d'ici 2100 et au-delà : une fonction des émissions de CO2 cumulés	60
Chapitre III : les changements climatiques au Maroc.....	62
1. Introduction	62
2. La géographie du Maroc	62
3. Le climat du Maroc	64
3.1 Indice d'aridité.....	64
4. L'évolution des émissions nationales de GES (inventaire national des émissions/ absorptions).....	67
4.1. Le secteur Energie.....	68
4.2. Le secteur Procédés Industriels participe	69
4.3. Le secteur Agriculture	69
4.4. Le secteur UTCATF	69
4.5. Le secteur Déchets	70
5. Tendances climatiques observées au Maroc.....	73
5.1. Distribution des températures mensuelles (1970-2000).....	76
5.2. Distribution des températures mensuelles maximale (1970-2000).....	77
5.3. Différence entre les valeurs extrêmes et les température mensuelles (1970-2000)	78
5.4. L'amplitude thermique.....	79
5.5. Distribution des précipitations mensuelles moyennes (1970-2000)	80
6. Evolutions projetées et conséquences des changements climatiques.....	82
6.1. Changement projeté des températures mensuelles (2021-2040)	82
6.2. Changement projeté des températures mensuelles (2041-2060)	86
6.3. Changement projeté des précipitations mensuelles (2021-2040).....	88
6.4. Changement projeté concernant des précipitations mensuelles (2041-2060).....	91
Partie II : Identification des changements climatiques dans le bassin OER et élaboration de la stratégie d'adaptation	96
Chapitre I : Présentation du bassin de l'Oum Er Rbia	97
1. Introduction	97
2. Le climat du bassin	98
3. Démographie, villes et centres.....	101

4. Géologie.....	102
5. Ressources en eaux souterraines.....	104
6. Hydrologie.....	107
Chapitre II : Identification du stockage du carbone dans le bassin de l'Oum Er Rbia par le modèle InVEST.....	
1. Introduction	109
2. Le modèle InVEST	109
3. Modélisation des changements de couverture terrestre	110
4. Modèle de fonction de stockage du carbone et son changement.....	115
Chapitre III : Identification des changements climatiques dans le bassin de l'Oum Er Rbia	
1. Tendances climatiques observées dans le bassin de l'Oum Er Rbia.....	118
1.1. La variabilité des précipitations de 1970 à 2000	118
1.2. Analyse statistique des précipitations	120
1.2.1. Introduction.....	120
1.2.2. Étapes pour l'extraction des sub bassin du bassin d'Oum Er Rbia.....	121
1.2.3. Oum Er Rbia central et Tessaout.....	123
1.2.3.1. Calcul et complètemnt des données mensuelles.....	123
1.2.3.2. Calcul des pluies annuelles	126
1.3. La variabilité des températures de 1970 à 2000	128
1.4. Evolutions projetées et conséquences des changements climatiques.....	129
1.4.1. Choix du modèle.....	129
1.4.2. Projection des températures moyennes et des précipitations selon le modèle BCC_CSM1.1 a l'horizon 2050.....	130
Chapitre IV : l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia.....	
1. Etat des lieux des ressources en eau	133
1.1. Bilan global.....	133
1.2. Les barrages.....	134
1.3. Les apports d'eau annuels.....	135
1.4. Bilans des nappes d'eaux souterraines.....	136
1.5. Utilisation de l'eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia.....	138

2. L'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia.....	138
2.1. Impacts sur les réserves de barrages.....	139
2.2. Impacts sur l'AEP.....	139
2.3. Impacts sur l'eau d'irrigation.....	140
2.4. Impacts sur les eaux souterraines.....	140
2.5. Bilan des simulations réalisées.....	141
Chapitre V : Stratégie d'Adaptation de la Gestion des Ressources en Eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia.....	142
1. Introduction.....	142
2. Objectif.....	144
3. Les Principes de la stratégie.....	144
4. Démarche adoptée pour élaborer la Stratégie d'Adaptation.....	145
4.1. Phase 1 : La phase préliminaire.....	146
4.2. Phase 2 : Analyse de la vulnérabilité.....	146
4.3. Phase 3 : Actions d'Adaptation.....	146
4.4. Phase 4 : Choix et Intégration des actions d'adaptation adéquates.....	147
5. Encadré 1 : Climate Proofing for Developemnt.....	147
6. Encadré 2 : Bilan hydrique du Bassin OER et changement climatique.....	148
7. Application de la démarche.....	149
7.1. Phase 1 : Préliminaire.....	149
7.2. Phase 2 : Analyse de la vulnérabilité.....	150
7.3. Phase 3 : Actions d'Adaptation.....	154
7.4. Phase 4 : Choix et Intégration des actions d'adaptation adéquates.....	157
7.5. Hiérarchisation des actions identifiées.....	168
Conclusion et perspectives.....	173
Bibliographie.....	175
Annexe 1.....	182
Annexe 2.....	183
Annexe 3.....	184

Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique du cycle de l'eau (GIEC 2007)	5
Figure 2: Répartition inégale des ressources en eaux	5
Figure 3: Différence entre climat et temps	8
Figure 4:Le système climatique Source : GIEC 2007, p102.....	10
Figure 5 : Les énergies du système climatique	11
Figure 6 : la concentration atmosphérique en CO2 depuis 1750	12
Figure 7 : Les oscillations du système climatique	13
Figure 8: Changements climatiques entre 2 milliards d'années et aujourd'hui	14
Figure 9: la transition de l'évolution du climat.....	15
Figure 10: Réchauffement planétaire et changement climatique	17
Figure 11:Evolution de la température à la surface (1901-2012), GIEC 2013, p.6	18
Figure 12:Changement projeté de la température moyenne à la surface entre 1986-2005 et 2081-2100	21
Figure 13:Les répercussions des changements climatiques	22
Figure 14:Les modèles du climat.....	24
Figure 15:Les caractéristiques du CO2	27
Figure 16: Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de la fraction molaire du CO2 pendant la période comprise entre 1984 et 2017	27
Figure 17: Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe du taux d'accroissement du CO2 pendant la période comprise entre 1984 et 2017	28
Figure 18: Les caractéristiques du méthane.....	29
Figure 19: Evolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de la fraction molaire du CH ₄ entre 1984 et 2017.....	30
Figure 20: Evolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe du taux d'accroissement pendant la période comprise entre 1984 et 2017	30
Figure 21:Le cycle du Carbone	31
Figure 22: Les caractéristiques du protoxyde d'azote	32
Figure 23: Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de la fraction molaire du N ₂ O entre 1984 et 2017.....	33
Figure 24: Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de du taux d'accroissement du N ₂ O pendant la période comprise entre 1984 et 2017	33
Figure 25: Les caractéristiques des gaz fluorés.....	34
Figure 26: Évolution de la fraction molaire mensuelle moyenne du SF ₆ et des principaux halocarbures.....	35
Figure 27:Anomalies observées de températures moyennes en surface, combinant les terres émergées et les océans (Source : GIEC 2013, p.6)	46
Figure 28:Changements observés concernant les précipitations annuelles sur les terres émergées	48

Figure 29: Evolution de la moyenne globale du contenu thermique de l'océan superficielle	49
Figure 30: CO ₂ et pH a la surface de l'océan (Source : GIEC 2013, p.10)	49
Figure 31: Evolution du niveau moyen des mers	50
Figure 32: Etendu de la banquise arctique en été	51
Figure 33 : Changements observés dans les systèmes physiques et biologiques	52
Figure 34: Evolution de la température moyenne à la surface du globe	54
Figure 35: Changement projeté concernant les précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100	55
Figure 36: Changement projeté du pH de la surface des océans entre 1986-2005 et 2081-2100	56
Figure 37 : L'élévation moyenne du niveau des mers au long du XXI ^e siècle.	57
Figure 38: Etendue de la banquise dans l'hémisphère Nord en septembre Moyennes pour 2081-2100	58
Figure 39 : Effets projetés des changements climatiques en Afrique	59
Figure 40: les émissions de CO ₂ anthropiques cumulées et les hausses de température moyenne à la surface du globe	61
Figure 41: La situation géographique du Maroc	63
Figure 42: Climat du Maroc	66
Figure 43: Distribution des températures mensuelles (1970-2000)	76
Figure 44: Distribution des températures moyennes maximale (1970-2000)	77
Figure 45: La différence entre les valeurs extrêmes et les températures mensuelles (1970-2000)	78
Figure 46: L'amplitude thermique(1970-2000)	79
Figure 47 : Distribution des précipitations mensuelles (1970-2000)	81
Figure 48: Les scénarios de projection des températures moyennes mensuelles selon le modèle	83
Figure 49: Les scénarios de projection des températures moyennes mensuelles selon le modèle	85
Figure 50: Les scénarios de projection des températures moyennes selon le modèle	86
Figure 51: Les scénarios de projection des températures moyennes selon le modèle	87
Figure 52: Les scénarios de projection des précipitations moyennes selon le modèle	89
Figure 53: Les scénarios de projection des précipitations moyennes selon le modèle	91
Figure 54: Les scénarios de projection des précipitations moyennes selon le modèle	92
Figure 55: Les scénarios de projection des précipitations moyennes selon le modèle	93
Figure 56 : La situation géographique du bassin de l'Oum Er Rbia	97
Figure 57: Le climat du bassin de l'Oum Er Rbia	99
Figure 58: La géologie du bassin de l'Oum Er Rbia(Légende :Annex 1)	103
Figure 59: Les nappes du bassin de l'Oum Er Rbia	106
Figure 60: Le réseau hydrographique d'Oued Oum Er Rbia	108

figure 61:Organigramme de la procédure de classification des données MODIS.....	111
Figure 62:La carte de l'occupation du sol du bassin de l'Oum Er Rbia pour l'année 2009 ...	112
Figure 63:La carte de l'occupation du sol du bassin de l'Oum Er Rbia pour l'année 2018 ...	113
Figure 64:Evolution de la valeur du carbone totale entre 20009 et 2018.....	116
Figure 65:La quantité du Carbone totale dans le bassin de l'Oum Er Rbia pour l'année 2009 et 2018	117
Figure 66: Distribution des précipitations mensuelles dans le bassin de l'Oum Er Rbia (1970-2000).....	119
Figure 67:La démarche de l'étude statistique des précipitations	120
Figure 68:Les étapes d'extraire les sub bassins	121
Figure 69:les sous bassins de l'Oum Er Rbia	122
Figure 70:localisation des stations climatiques dans le sous bassin Oum Er Rbia central ...	123
Figure 71: localisation des stations climatiques dans le sous bassin Tessaout.....	124
Figure 72: Moyennes mensuelles brutes des stations pluviométriques du sous bassins Tessaout (1932-2015).....	125
Figure 73: Moyennes mensuelles brutes des stations pluviométriques du sous bassins Oum Er Rbia Central (1932-2015)	125
Figure 74: La pluviométrie interannuelle sur la période de 1935 à 2015(Oum Er Rbia central)	127
Figure 75: La pluviométrie interannuelle sur la période de 1935 à 2015 (Tessaout).....	127
figure 76:	127
Figure 77: Distribution des températures moyenne dans le bassin OER (1970-2000).....	128
Figure 78:Tendances des précipitations en °C à l'horizon 2050 selon le modèle BCC_CSM1.1 tourné avec le scénario RCP 2.6	130
Figure 79:Tendances des températures en °C à l'horizon 2050 selon le modèle BCC_CSM1.1 tourné avec le scénario RCP 2.6	131
Figure 80:: Bilan global des ressources en eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia.....	133
Figure 81:Les grands barrages du bassin de l'Oum Er Rbia	134
Figure 82: La démarche d'élaboration de la stratégie d'adaptation	146

Liste des tableaux

Tableau 1: Historique de la science des changements climatiques.....	19
Tableau 2: Principaux gaz à effet de serre.....	25
Tableau 3: Concentration de N ₂ O augmenté entre 1750 et 2017	34
Tableau 4:La classification de l'indice d'aridité (UNEP, 1997)	65
Tableau 5:Evolution des émissions des GES par secteur de gaz entre 2010 et 2014	71
Tableau 6: Réchauffements prévus au Maroc en relation avec les Changements Climatiques	88
Tableau 7: Diminution des précipitations prévues au Maroc en relation avec les Changements Climatiques.....	95
Tableau 8: Démographie du bassin Oum Er Rbia (2014)	101
Tableau 9: L'occupation du sol dans le bassin d'Oum Er Rbia en 2009 et 2018 (unité : ha)	114
Tableau 10:La valeur du carbone totale pour l'année 2009 et 2018.....	116
Tableau 11:les sous bassins de l'Oum Er Rbia	122
Tableau 12: Evolution des apports d'eau annuels	135
Tableau 13: Bilans moyens (Mm ³ /an) des nappes du bassin de l'Oum Er Rbia.....	137
Tableau 14: Les changements dans la réserve de fin d'année dans différents barrages selon le modèle BCC_CSM1.1	139
Tableau 15:Pénurie maximale annuelle en Mm ³ d'eau potable	139
Tableau 16:Pourcentage de réduction des eaux allouées à l'irrigation par rapport à l'offre 2010-demande 2030 (pour une probabilité de 50%)	140
Tableau 17:Profondeur de la nappe (en m) sous l'hypothèse de l'offre 2010-demande 2030 (pour une probabilité de 50%)	140
Tableau 18:Effets biophysiques et socio-économiques possibles de ces tendances climatiques sur les unités exposées du PDAIRE.....	151
Tableau 19:Les axes stratégiques d'adaptation	154
Tableau 20: Critères de notation utilisés pour hiérarchiser les actions d'adaptation	156

Liste alphabétique

- ABHOER : agence de bassin hydraulique d'Oum ER-Rbia.
- AEPI : Alimentation en eau potable et industrielle, I : Irrigation.
- CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.
- GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.
- COP : Conférence des Parties.
- CO₂ : Le dioxyde de carbone.
- CH₄ : Le méthane.
- N₂O : Le protoxyde d'azote.
- OER: Ouad Oum ER-Rbia.
- PDAIRE : Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau.
- DMN : direction de la météorologie nationale.
- °C : degré Celsius.
- °F : Fahrenheit.
- GIEC : le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
- TS : Oued Tessaout
- AB : Oued El Abid
- HO : Haut Oum Er Rbia
- CO : Oum Er Rbia central
- COP : La Conférence des Parties
- CC : Changement Climatique
- CP4Dev : Climate Proofing For Development
- DCO : Demande Chimique en Oxygène
- DMN : Direction de la Météorologie Nationale
- GES : Gaz à Effet de Serre
- GIZ : Société Allemande de Coopération Internationale
- Mm³ : Millions mètre cube
- OER : Oum Er-Rbia
- PA : Plan d'Aménagement
- PDAIRE : Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau
- PDAR : Plan Directeur d'Aménagement Régional
- PNAL : Plan National d'Assainissement Liquide
- PNDM : Plan National des Déchets Ménagers
- PNLCRC : Plan National de Lutte Contre le Réchauffement Climatique
- SDAU : Schéma Directeur d'Aménagement Urbain
- SNCC : Stratégie Nationale sur les Changements Climatiques
- SNDD : Stratégie Nationale pour un Développement Durable
- SNE : Stratégie Nationale de l'Eau

Introduction générale

Les changements climatiques se sont imposés progressivement depuis la conférence tenue à Rio en 1992 où les différents pays de la planète avaient reconnu ce danger. Dans la convention cadre des nations unies sur le climat lancé lors de cette conférence, ces pays s'étaient engagés à faire face à ce changement climatique à travers l'atténuation des émissions en GES et aussi une adaptation des politiques et programmes de développement en vue d'en limiter les impacts négatifs pouvant résulter du réchauffement climatique.(Aykut & Dahan, 2014)

Plus de trente années après, le changement du climat se confirme avec des impacts notables notamment sur le cycle de l'eau. Cela se retrouve en particulier autour de la méditerranée et en Afrique où ce réchauffement est important et où l'impact sur les ressources en eau accentue et accélère le déficit offre-demande qu'un grand nombre de pays de la région allait connaître logiquement avec la forte croissance de la demande et les pressions de toutes sortes auxquelles les ressources de ces pays ont été soumises ces dernières décennies. (Driouech, 2010)

Les observations et les résultats des modèles indiquent que les tendances climatiques en Afrique du Nord montrent à la fois un assèchement et un réchauffement de la planète au cours des dernières décennies, Selon le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2013a), le climat de la région devrait devenir encore plus chaud et plus sec au cours du prochain siècle, ce qui exposera des millions de personnes supplémentaires à un stress hydrique supplémentaire. Il est prévu que le changement climatique augmenterait probablement la pression sur la surface déjà surexploitée et les ressources en eaux souterraines. Avec la complexité accrue de la croissance démographique, de la croissance économique, de là la possibilité d'augmenter la fréquence des vagues de chaleur et de diminuer le manteau neigeux, la pénurie d'eau va augmenter plus en plus .

Au Maroc, la tendance au réchauffement du climat s'est confirmée avec aussi une irrégularité intra-annuelle et interannuelle des précipitations qui s'est installée depuis les années 70 : plus d'événements extrêmes, un dérèglement du cycle saisonnier. Pour faire face à cette situation et son impact sur le secteur eau au Maroc, des efforts louables ont été consentis avec en particulier une politique de barrages renforcée, une planification de la gestion des eaux

structurée et organisée et aussi des mesures et actions adaptatives mais qui ont été plus réactives qu'anticipatives.

Aujourd'hui, 30 années après les premiers signes forts annonçant cette problématique hydro-climatique vécus lors des sécheresses des années 80, cette instabilité/irrégularité du climat a atteint un seuil dont l'impact sur la gestion des ressources en eau ne permet plus de la considérer sans une véritable anticipation et une planification adéquate. Il y a un besoin évident d'intégrer de façon structurelle ce changement du climat et ses effets possibles sur la gestion des eaux dans le pays tant au niveau des choix politiques d'utilisation des eaux qu'au niveau de la mise en œuvre de ces politiques.

Le bassin de l'OER a été le premier bassin au niveau des aménagements. Cette zone se caractérise aussi par sa solidarité avec les autres zones hydrauliques et cela se retrouve au niveau des transferts d'eaux qu'elle assure vers le centre et le sud du Maroc depuis des années.

Cette étude entre dans le cadre d'anticiper les effets possibles du changement climatique sur la gestion de l'eau dans le bassin de l'Oum Er Rabia, donc l'objectif de ce travail est d'identifier les changements climatiques dans le bassin, déterminer les scénarios du futur de ces changements et de proposer une stratégie d'adaptation dans le bassin pour diminuer les impacts de ces changements climatiques.

Ce travail sera donc axé sur l'étude de deux parties :

Une première partie qui dévoile en premier lieu une présentation générale de la science du changement climatique et la modélisation du climat, en second lieu qui a cherché à définir les changements climatiques au Maroc pour la période 1970/2000 et de préciser avec autant de précisions que possibles l'évolution du climat au Maroc d'ici 2060.

Une deuxième partie qui a cherché à identifier les changements climatiques dans le bassin de l'Oum Er Rabia et de quantifier l'impact possible de ces changements climatiques sur les ressources en eau et sur les ruissellements et à la fin de poser une stratégie d'adaptation aux changements climatiques dans le bassin

Partie I : Synthèse bibliographique et changements climatiques au Maroc

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Chapitre II : Les changements climatiques à l'échelle du monde

Chapitre III : les changements climatiques au Maroc

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1. Le cycle hydrologique

Avec des réseaux de mesures météorologiques plus développés, des capacités de calculs en plein essor, des physiciens qui s'emparent des problématiques météorologiques, la science du climat est passée d'une science "intuitive" (à guessing science) vers une discipline de plus en plus sophistiquée (Brulebois, 2016). De son côté, l'hydrologie est perçue comme une science en devenir. Elle est soumise à des exigences de plus en plus fortes, pour répondre aux problématiques d'aménagement, de protection des activités humaines (Roche et al., 2012). Ces deux sciences sont intimement liées dans ce qu'on appelle l'hydro-climatologie. Des travaux de plus en plus nombreux sont réalisés à l'interface de ces disciplines, afin d'étudier les relations entre le cycle de l'eau et le climat. (Roche et al., 2012)

1.1. Le bilan hydrologique à l'échelle globale à l'échelle du bassin versant

La planète Terre est la seule du système solaire à posséder de l'eau sous ses trois formes physiques (liquide, solide et gazeuse) en quantité suffisante pour permettre à la vie de se développer (André Musy, 2014).

La majeure partie se trouve dans les océans (97,4 %), le reste est présent sur les continents sous forme liquide (souterraine ou en surface), de neige ou de glace (DE MARSILY, 2006)

A l'échelle globale, l'énergie fournie par le rayonnement solaire évapore l'eau à la surface des océans et des continents. Cette vapeur d'eau se condense, puis précipite sous forme liquide ou solide. Au-dessus des continents, le surplus de précipitations par rapport à la quantité évaporée crée des écoulements, formant rivières et fleuves, permettant le retour de l'eau aux océans.

Une quantité marginale de cette eau participe au cycle de l'eau. Ce dernier, qui correspond aux échanges entre l'atmosphère, le sol, le sous-sol et les océans, constitue le cadre général d'étude des sciences de l'eau. Le cycle de l'eau peut être appréhendé à différentes échelles. (Figure 1)

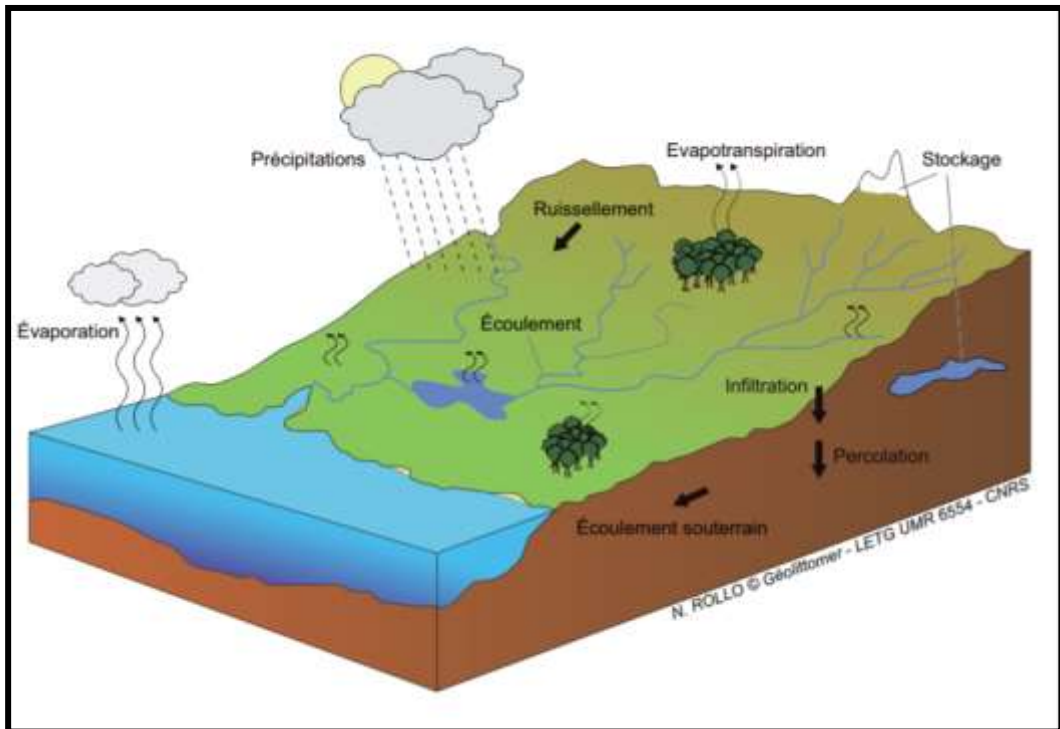


Figure 1 : Représentation schématique du cycle de l'eau (GIEC 2007)

La quantité d'eau présente à la surface du globe est constante. Ainsi, on ne peut pas parler de "consommation" de la ressource, mais plutôt de son "utilisation" (Cosandey, Claude, 2012) , Mais la répartition de cette ressource est inégale (figure 2)(Kettab et al., 2008)

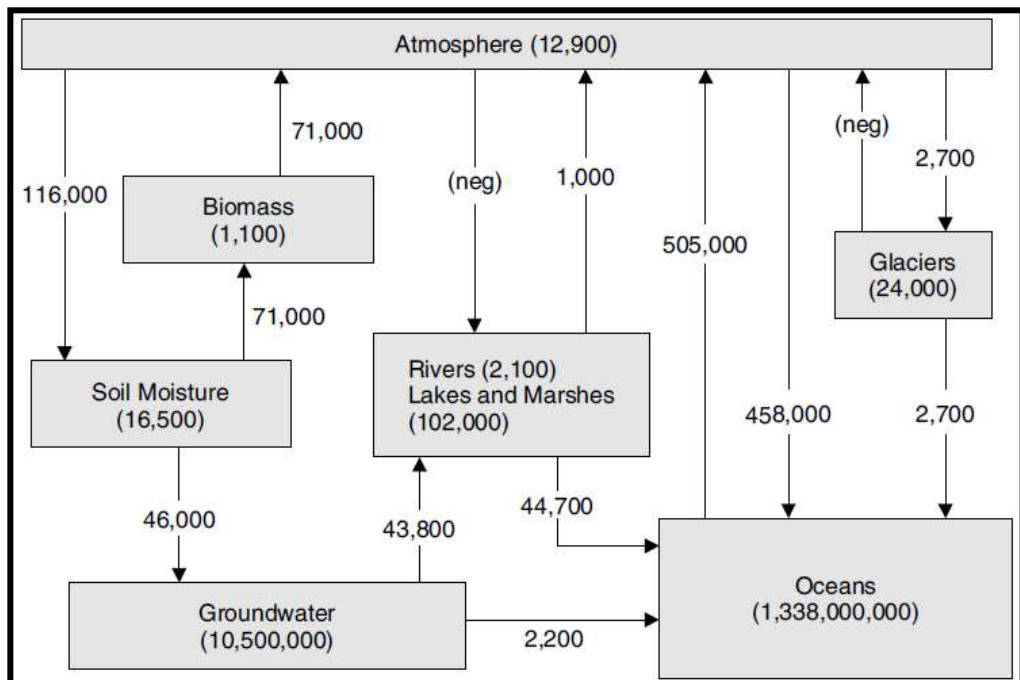


Figure 2: Répartition inégale des ressources en eau

Le cycle hydrologique est le mécanisme de purification de base de l'eau sur Terre car tous les constituants de l'eau sont laissés derrière pendant le changement de phase de l'eau liquide à la vapeur d'eau.

Pendant des milliards d'années, ce processus a fourni à la surface terrestre de l'eau douce, qui a été et est la base de la vie. L'eau précipitée a dissous les minéraux sur son chemin à travers les compartiments hydrologiques aux océans et a ainsi progressivement augmenté la salinité des océans. Un approvisionnement fiable et adéquat en eau douce propre est essentiel à la survie de l'humanité ainsi qu'au maintien des systèmes biotiques terrestres dans le monde entier. Toutefois, la croissance rapide de la population humaine met de plus en plus l'accent sur les ressources en eau (Ferguson & Maxwell, n.d.)

Le cycle de l'eau décrit comment l'eau est échangé à travers la terre, l'océan et l'atmosphère. L'eau existe toujours dans les trois endroits, et sous de nombreuses formes comme les lacs et les rivières, les glaciers et les calottes glaciaires, les océans et les mers, les aquifères souterrains, et la vapeur dans l'air et les nuages.

Le cycle de l'eau se compose de trois processus majeurs : l'évaporation, la condensation et les précipitations

➤ Évaporation

L'évaporation est le processus de la surface d'un liquide qui se transforme en gaz. Dans le cycle de l'eau, l'eau liquide (dans l'océan, les lacs, ou les rivières) s'évapore et devient la vapeur d'eau, vapeur d'eau nous entoure, comme une partie importante de l'air que nous respirons. La vapeur d'eau est également un important green house gas. Les gaz à effet de serre tels que la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone isolent la Terre et maintiennent la planète suffisamment au chaud pour maintenir la vie telle que nous la connaissons.

Le processus d'évaporation du cycle de l'eau est entraîné par le soleil. Comme le soleil interagit avec l'eau liquide à la surface de l'océan, l'eau devient un gaz invisible (vapeur d'eau). L'évaporation est également influencée par le vent, la température et la densité du plan d'eau.

➤ Condensation

La condensation est le processus d'un gaz qui se transforme en liquide. Dans le cycle de l'eau, la vapeur d'eau dans l'atmosphère se condense et devient liquide, la condensation peut se produire haut dans l'atmosphère ou au niveau du sol. Les nuages se forment à mesure que la vapeur d'eau se condense, ou devient plus concentrée (dense). La vapeur d'eau se condense autour de minuscules particules appelées noyaux de condensation des nuages (CCN). Le CCN peut être des taches de poussière, de sel ou de polluants. Les nuages au niveau du sol sont appelés brouillard ou brume. Comme l'évaporation, la condensation est également influencée par le soleil. Comme la vapeur d'eau se refroidit, il atteint sa limite de saturation, ou point de rosée. La pression de l'air est également une influence importante sur le point de rosée d'une zone.

➤ Précipitation

Contrairement à l'évaporation et à la condensation, les précipitations ne sont pas un processus. Les précipitations décrivent toute eau liquide ou solide qui tombe sur Terre à la suite de la condensation dans l'atmosphère. Les précipitations comprennent la pluie, la neige et la grêle, le brouillard n'est pas des précipitations. L'eau dans le brouillard ne se condense pas suffisamment pour précipiter, ou liquéfier et tomber sur Terre. Le brouillard et la brume font partie du cycle de l'eau appelé suspensions : Ils sont de l'eau liquide suspendue dans l'atmosphère, précipitations est l'une des nombreuses façons dont l'eau est parcourue de l'atmosphère à la Terre ou l'océan.

L'évaporation, la condensation et les précipitations sont des parties importantes du cycle de l'eau.

2. La science des changements climatiques

Cette partie propose une introduction aux concepts de base relatifs à la science du changement climatique, tels que le temps, le climat, l'effet de serre, les forçages climatiques et les fluctuations climatiques naturelles. Elle traite ensuite des principaux éléments anthropiques (provoqués par l'homme) à l'origine de changements climatiques, notamment des modifications observées et projetées de température à la surface. Cette partie s'achève par

quelques explications sur la science des changements climatiques, son importance et son développement au cours de l'histoire.

2.1. La différence entre Climat et Temps

Il est important de comprendre la différence entre « temps » et « climat » (Figure 3), Ce qui se passe dans l'atmosphère à un moment donné correspond au « temps » (par exemple, la vitesse et la direction des vents, les précipitations, la pression atmosphérique, les températures et le taux d'humidité), Le temps connaît des modifications à court terme (par exemple, au cours de la journée, de la semaine, du mois). (Eldin, 1971)

Le climat indique les conditions météorologiques moyennes sur une période plus longue (sur 30 ans, par exemple). La confusion entre temps et climat est fréquente, en particulier lorsqu'on demande aux scientifiques comment ils peuvent prédire le climat qu'il fera dans 50 ans alors qu'ils sont incapables de prévoir le temps qu'il fera dans les prochaines semaines. (Ciesla, 1997)

En effet, la nature chaotique du temps le rend imprévisible au-delà de quelques jours. La question de prédire les changements climatiques (moyenne météorologique à long terme, par exemple) liés à des modifications des constituants atmosphériques ou à d'autres facteurs, est bien différente et beaucoup plus maîtrisable. Pour proposer une analogie, alors qu'il est impossible de connaître à l'avance la date de décès d'un homme en particulier, nous pouvons en revanche affirmer que l'espérance de vie des hommes, dans les pays industrialisés, est en moyenne de 75 ans. (Beniston, 2009)

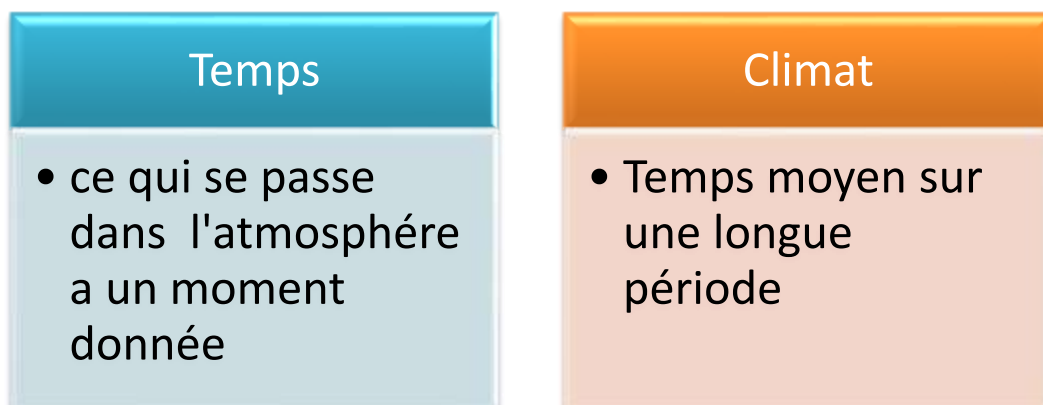


Figure 3: Différence entre climat et temps

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) définit le climat de la manière suivante : « Au sens étroit du terme, le climat désigne en général le temps moyen ou, plus précisément, se réfère à une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années (la période type, définie par l'Organisation météorologique mondiale, est de 30 ans). Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, la hauteur de précipitation et le vent. Dans un sens plus large, le climat désigne l'état du système climatique, y compris sa description statistique. » (Pachauri & Reisinger, 2007)

Au sens strict, le climat est souvent défini comme les « conditions météorologiques moyennes », ou plus précisément, la description statistique en termes de moyenne et de variabilité des quantités pertinentes sur une période de temps allant de quelques mois à des milliers ou millions d'années.(Organisation météorologique mondiale, 2019)

2.2. Le système climatique

2.2.1. Définition

Au sens large, le climat correspond à l'état du système climatique comprenant :

- L'atmosphère : correspond à l'enveloppe gazeuse de la Terre
- L'hydrosphère : est la composante du système climatique qui contient de l'eau à l'état liquide sur ou sous la surface de la Terre (par exemple, les océans, les rivières, les lacs...)
- La cryosphère : contient de l'eau à l'état solide (par exemple, les glaciers, la neige, la glace...)
- La lithosphère de surface : est la couche supérieure de la Terre, tant continentale qu'océanique, connaissant une activité volcanique qui a une influence sur le climat
- La biosphère : contient tous les organismes vivants et écosystèmes présents sur la terre et dans les océans.

Tous ces éléments définissent l'état et les changements du climat de la Terre.(Ipcc, 2007)

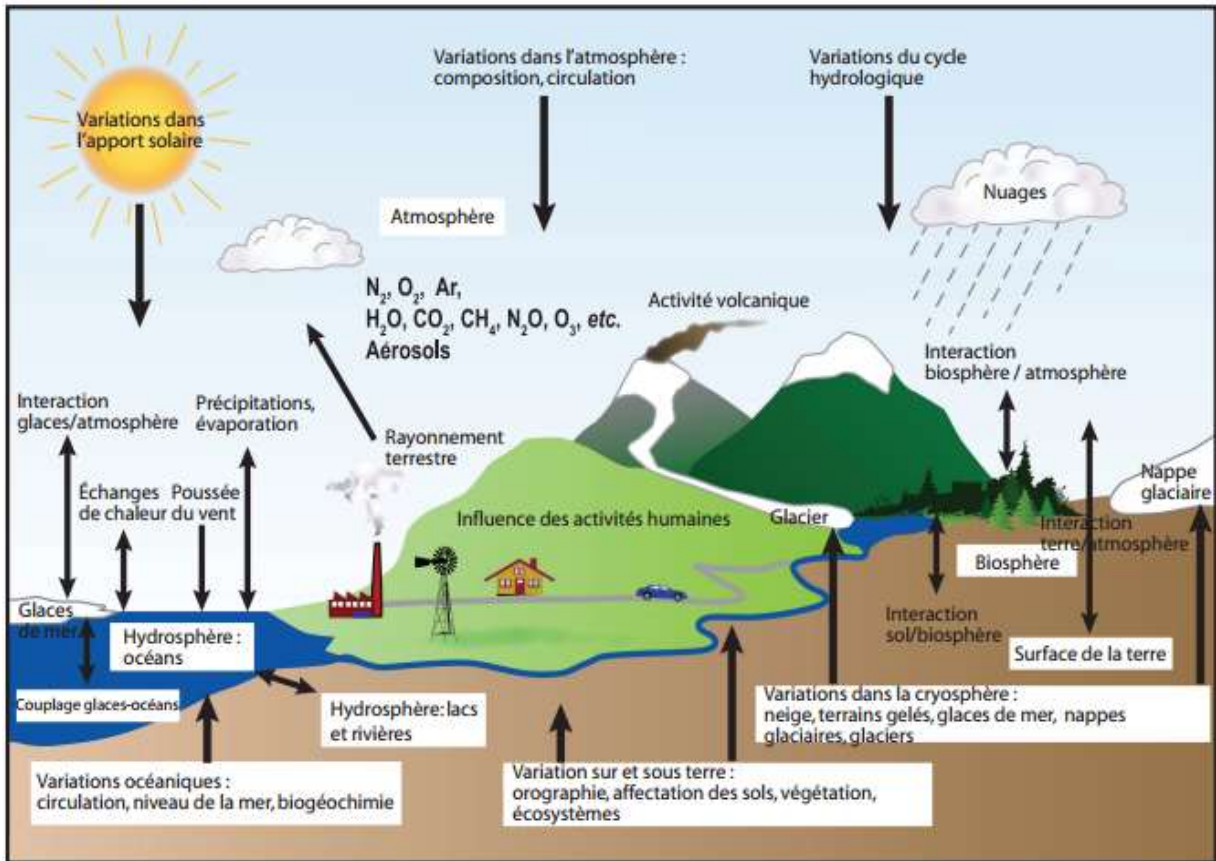


Figure 4:Le système climatique Source : GIEC 2007, p102

2.2.2. Le système climatique est le résultat d'un délicat équilibre d'énergies.

La figure (5) illustre plusieurs énergies qui maintien l'équilibre dans le système climatique :

⇒ *Energie entrante*

Le soleil est la seule et la plus importante source d'énergie de la terre, les températures sur notre planète sont dues à l'équilibre entre l'énergie émise par le soleil (rayons solaires) qui arrive sur la terre, et l'énergie réfléchies depuis la terre vers l'espace (équilibre d'énergie), environ 343 watts par m² atteignent la planète, mais seuls 240 Watt par m² traversent l'atmosphère .(Albédo, 2019)

⇒ **Energie sortante**

Près de la moitié du rayonnement qui touche la terre et son atmosphère est absorbée par la surface, l'autre moitié est absorbée par l'atmosphère ou à nouveau réfléchi vers l'espace par les nuages, les particules de l'atmosphère, la neige, la glace et les déserts sur la surface de la terre, une partie de l'énergie absorbée à la surface de la terre est réfléchi (ou réabsorbée) vers l'atmosphère et l'espace sous forme de chaleur ou d'énergie (thermique).(Albédo, 2019)

⇒ **Energie absorbée**

L'Energie solaire est absorbée par la surface de la terre et la réchauffe, La transformation de cette énergie en chaleur provoque l'émission de rayons à longues ondes (infrarouges) vers l'atmosphère, mais tous les rayons ne repartent pas dans l'espace certains sont capturés par les nuages et les gaz à effet de serre, et sont à nouveau réfléchis vers la surface de la terre.(Albédo, 2019)

Les températures ressenties sont l'équilibre de l'énergie de la chaleur capturée sur terre par l'atmosphère de la planète, les radiations thermiques absorbées et réfléchies sur la surface de la terre par les molécules des gaz à effet de serre (GES) et les nuages permettent ainsi une température moyenne sur terre d'environ 14°C bien au-dessus des -19°C que l'on ressentirait sans l'effet naturel de serre (GIEC, 2013b)

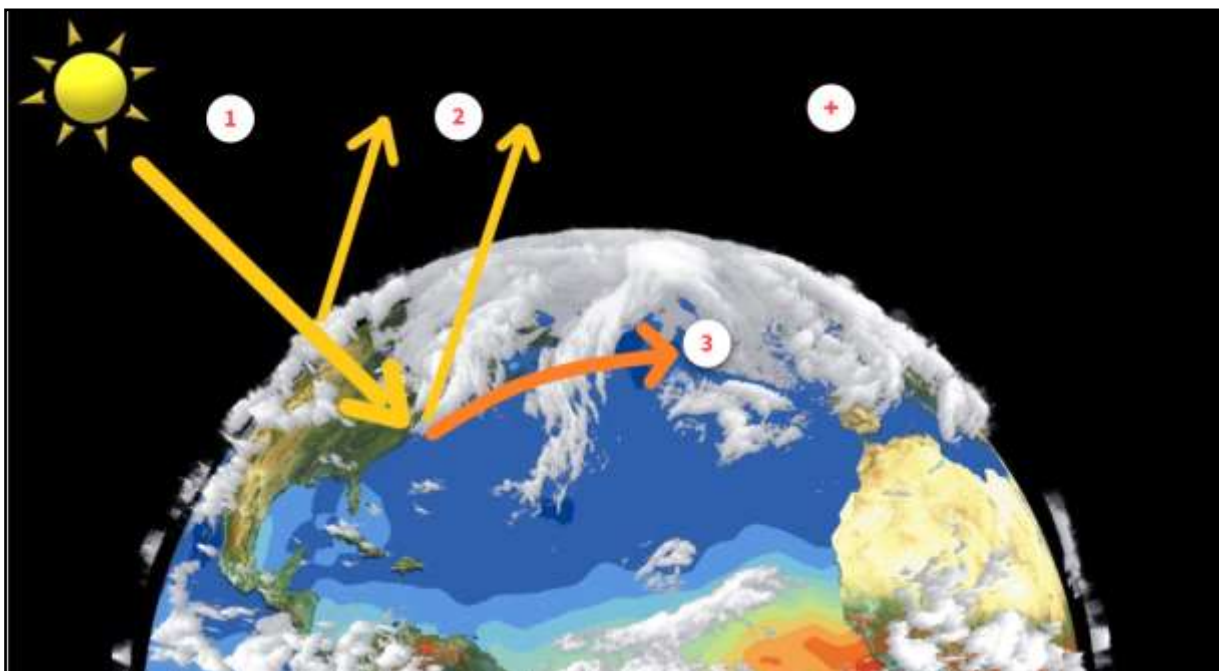


Figure 5 : Les énergies du système climatique

2.3. Les facteurs qui influencent le climat « Les forçages climatique »

L'effet de serre naturel fait partie d'un système équilibré de transfert et de transformation d'énergie au sein de l'atmosphère, à la surface de la Terre et dans les océans. Le climat de la Terre reste dans l'ensemble stable du fait que l'énergie reçue est équivalente à celle qui est perdue (le bilan radiatif est équilibré).

Cependant, certains facteurs ont entraîné des modifications majeures au sein du système climatique. Etant donné que ces facteurs conduisent ou « forcent » le système à changer, nous les appelons des « forçages ».

Les changements de flux énergétiques générés par ces facteurs sont qualifiés de « forçages radiatifs » (FR). Les FR positifs mènent au réchauffement de la surface, tandis que les FR négatifs conduisent à son refroidissement.

Au cours du dernier millénaire, les modifications relatives à la production de l'énergie solaire, aux éruptions volcaniques et à la concentration accrue de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont constitué les « forçages » les plus importants. Les forçages radiatifs totaux ont été positifs et ont conduit à une assimilation d'énergie par le système climatique .(GIEC, 2013a)

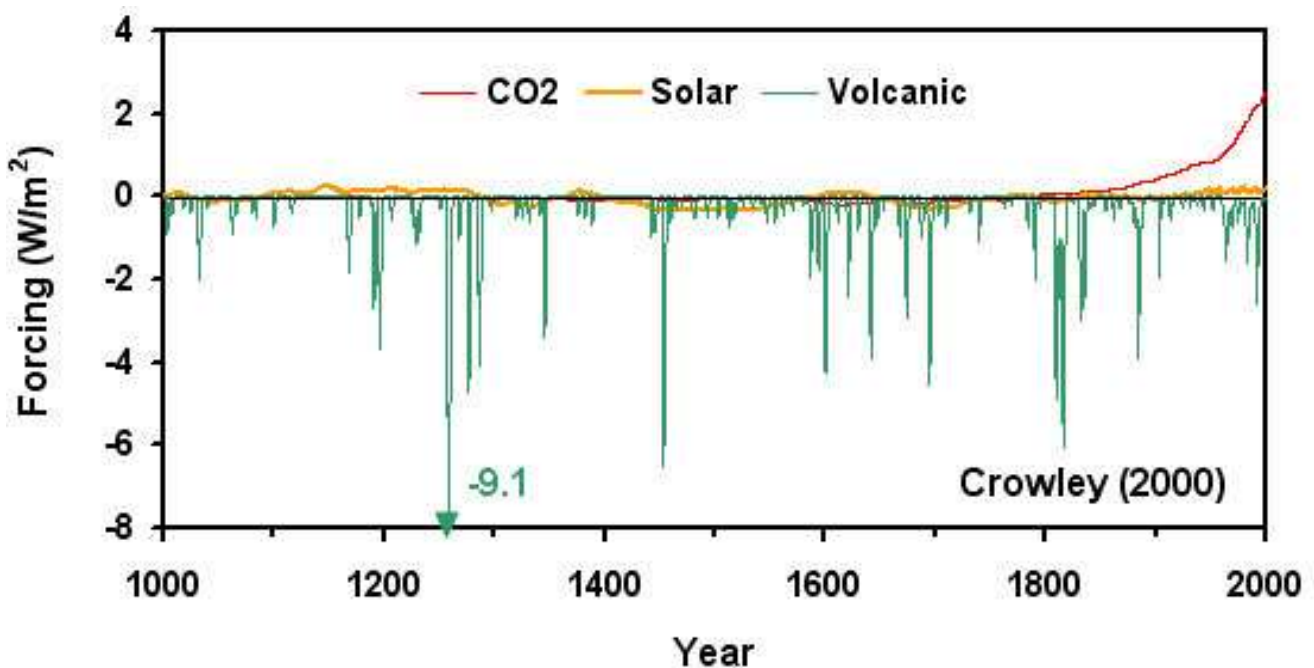


Figure 6 : la concentration atmosphérique en CO2 depuis 1750

La figure (6) montre que l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO2 depuis 1750 est ce qui a principalement contribué au forçage radiatif total (GIEC , 2013).

2.4. Fluctuations climatiques naturelles exemple : La Niña et El Niño

Les modifications du système climatique résultant des forçages climatiques ne doivent pas être confondues avec les fluctuations naturelles du climat. En effet, même au cours d'une période relativement stable, le système qui constitue et influence le climat global connaît toujours des fluctuations naturelles. Ces fluctuations, souvent appelées « oscillations » (du fait qu'elles oscillent entre deux états principaux) peuvent avoir une grande incidence sur le climat, que ce soit à une échelle locale ou mondiale.

El Niño, La Niña et El Niño-oscillation australe (ENSO) en constituent un exemple. ENSO est un phénomène climatique qui se produit en moyenne tous les cinq ans dans l'océan Pacifique tropical.

El Niño (terme espagnol désignant un petit garçon) décrit un réchauffement important à la surface de l'océan Pacifique occidental et équatorial central qui dure trois saisons ou plus (voir la zone en rouge près de l'équateur sur le globe de gauche figure (7)).

Lorsque cette région océanique retrouve des températures normales plus froides, le phénomène est appelé La Niña, terme espagnol désignant une petite fille (voir zone en bleu près de l'équateur sur le globe de droite figure (7)).

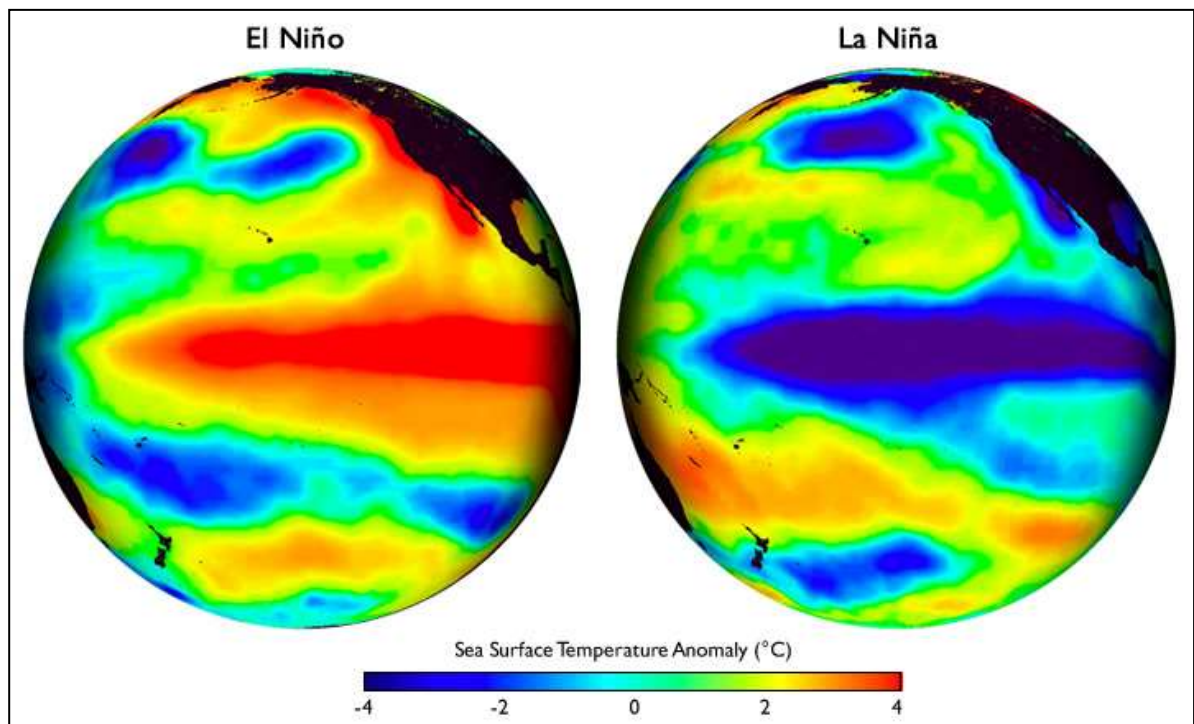


Figure 7 : Les oscillations du système climatique

2.5. L'évolution du climat

2.5.1. Deux milliards d'année :

Au cours des deux derniers milliards d'années, le climat de la Terre a alterné entre des périodes de « chambre froide » glaciale et de « serre » étouffante, comme à l'époque des dinosaures. Pendant la période de « serre », l'eau à l'état liquide était bien plus présente sur Terre, tandis que pendant la période « chambre froide », le climat était suffisamment froid pour permettre la formation de nappes entières de glace, couvrant parfois la totalité de la planète. (Tickell, 1996)

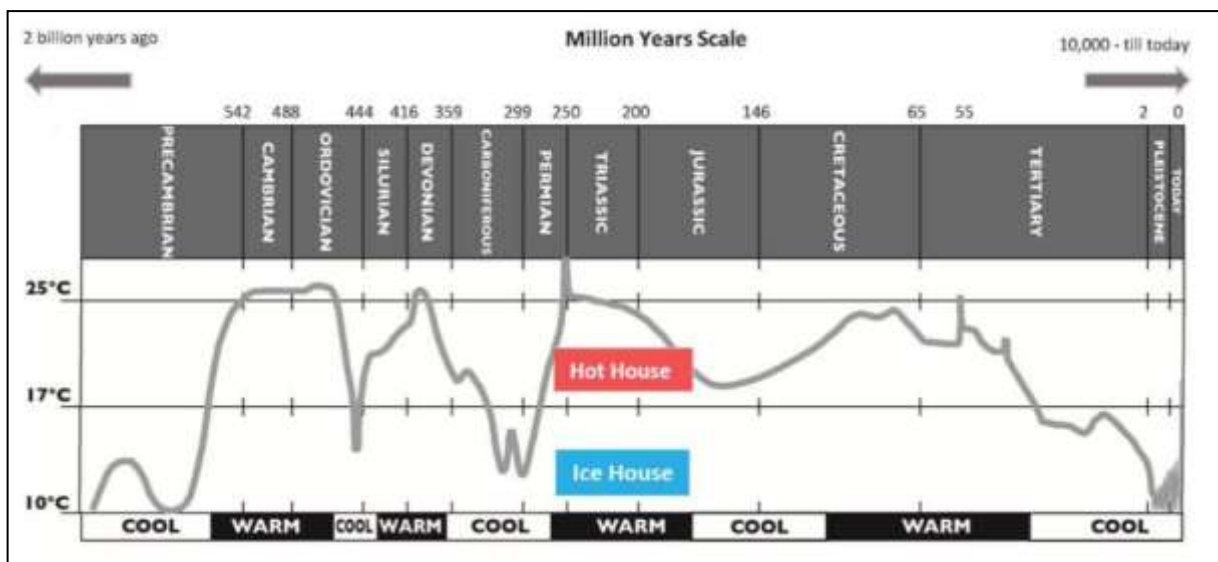


Figure 8: Changements climatiques entre 2 milliards d'années et aujourd'hui

Selon la figure (8) les Changements climatiques entre 2 milliards d'années et aujourd'hui sont caractérisée par une température supérieure à 17 degrés indique un « âge chaud » et inférieure à 17 degrés - un « âge glaciaire »

2.5.2. 55 millions d'années

La transition la plus récente entre ces phases date d'il y a environ 55 millions d'années, lorsque les températures ont atteint une maximale thermique, suivie par une longue période de refroidissement, que nous connaissons actuellement. (Figure 9)

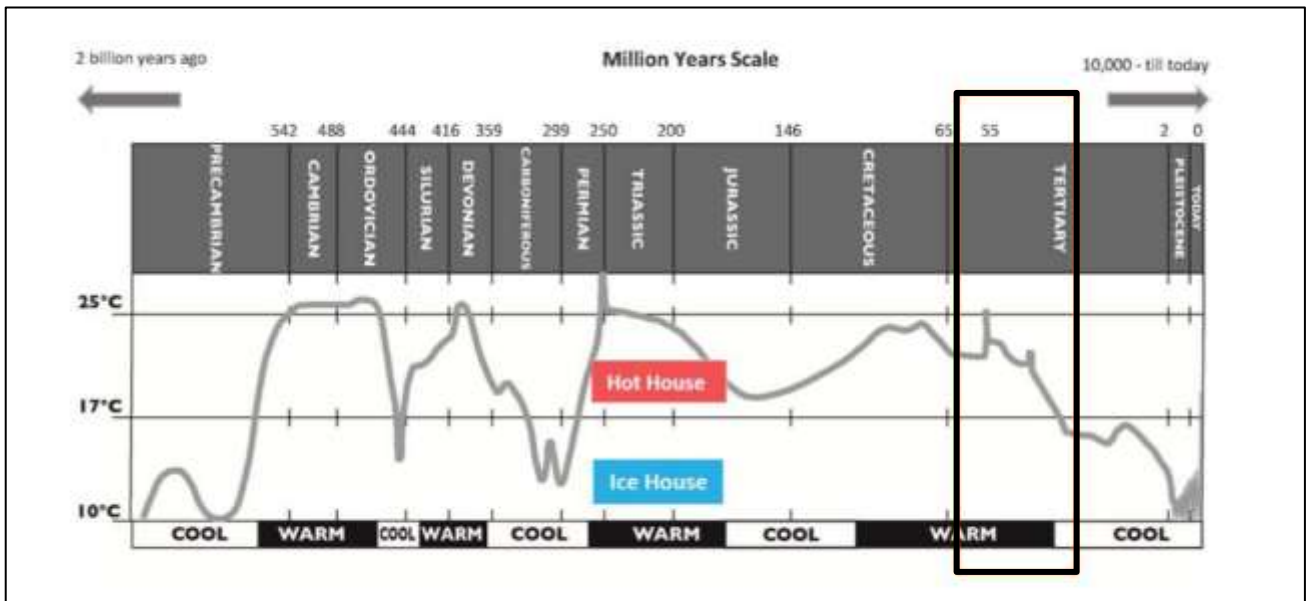


Figure 9: la transition du l'évolution du climat

2.5.3. 500 000 et 100 000 ans

Il y a entre 500 000 et 100 000 ans, une période de fluctuations de chaleur et de froid est survenue. Des échantillons des glaces de l'Arctique ont montré que sur une période de plusieurs centaines de milliers d'années, les grandes nappes glacières qui couvrent le nord de l'Amérique et de l'Europe ont fondu suite à une série de montée des températures, chacune d'une durée approximative de 100 000 ans. Cela nous mène aux 10 000 dernières années.(Brucker et al., 2014)

2.5.4. De 10 000 années a aujourd'hui

Ces dernières 10 000 années sont ce qu'on appelle l'Holocène. Une période exceptionnellement stable et chaude. Le niveau de la mer s'est stabilisé à son niveau actuel il y a environ 7 000 ans. Cela a permis à la civilisation humaine de se développer.(Brondizio et al., 2016)

Même si les températures étaient relativement stables par rapport aux périodes précédentes, de légères variations climatiques sont malgré tout survenues dans l'histoire climatique récente, tel qu'une chute des températures entre 1600 et 1850, connue comme le Petit Âge glaciaire.(Biermann et al., 2016)

2.6. Les causes de changements du climat

Le climat terrestre ne change pas sans raisons. De nombreux facteurs peuvent l'influencer sur de longues périodes de temps. Ces facteurs sont connus sous le nom de « forçage radiatif ». Les 3 principaux déterminants climatiques :

- ↻ Variabilité solaire,
- ↻ Activité volcanique
- ↻ Changements dans le cycle du carbone.

2.6.1. Variabilité solaire

La variation solaire, les changements de quantité de rayons émis par le soleil, ou les petits changements dans la rotation de l'orbite de la terre peuvent modifier la quantité d'énergie reçue depuis le soleil. Toutefois, au cours des 140 dernières années, nous avons connu une faible variabilité solaire (Christoforou & Hameed, 1997)

2.6.2. Activité volcanique

Des éruptions volcaniques imprévisibles peuvent également provoquer un dérèglement du climat, de grandes éruptions éjectent des aérosols dans l'atmosphère, ce qui refroidit la surface de la terre. Par exemple, une éruption semblable à celle du Mont Pinatubo en 1991, peut refroidir la surface d'environ 0,1°C à 0,3 °C pendant jusqu'à trois ans. (Geoscience, 2015)

2.6.3. Changements dans le cycle du carbone.

Tout au long de l'histoire de son climat, la terre a connu de nombreux échanges entre l'oxygène, crée par les plantes et consommée par les animaux et le dioxyde de carbone, émis par les animaux et utilisée par les plantes. Quand la quantité de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère augmente, cela a un effet direct sur le climat (GIEC, 2013)

2.7. Réchauffement planétaire et changement climatique

Depuis le début du XXe siècle, les scientifiques ont observé une modification du climat qui ne peut être attribuée entièrement à une quelconque influence « naturelle » du passé. Ce changement du climat, également connu sous l'appellation réchauffement planétaire, s'effectue beaucoup plus rapidement que tout autre changement climatique relevé par les humains. (Dauphiné & Provitolo, 2013)

La concentration accrue des gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle, à la fin du XVIIIe siècle, constitue la principale source du réchauffement planétaire. L'augmentation des gaz qui absorbent et renvoient un rayonnement thermique a conduit directement à ce qu'une plus grande quantité de chaleur soit retenue dans l'atmosphère, d'où la hausse générale des températures moyennes à la surface du globe. Cette augmentation des températures entraîne aussi d'autres effets sur le système climatique. (Organisation météorologique mondiale, 2019)

L'ensemble de ces effets est connu sous la dénomination de changement climatique anthropique (provoqué par les humains).

L'ajout dans l'atmosphère d'un gaz à effet de serre, tel que le CO₂, intensifie l'effet de serre et, par conséquent, le réchauffement climatique de la Terre. Le réchauffement dépend de divers mécanismes rétroactifs. Par exemple, alors que l'atmosphère se réchauffe en raison de l'augmentation des niveaux de gaz à effet de serre, sa concentration en vapeur d'eau augmente, ce qui intensifie l'effet de serre. A son tour, ce dernier va créer plus de chaleur, ce qui va entraîner une augmentation supplémentaire de la vapeur d'eau, et ainsi de suite. Cet effet rétroactif de la vapeur d'eau peut être suffisamment fort pour multiplier à peu près par deux l'augmentation de l'effet de serre dû au seul ajout de CO₂. (Pnue, 2007)

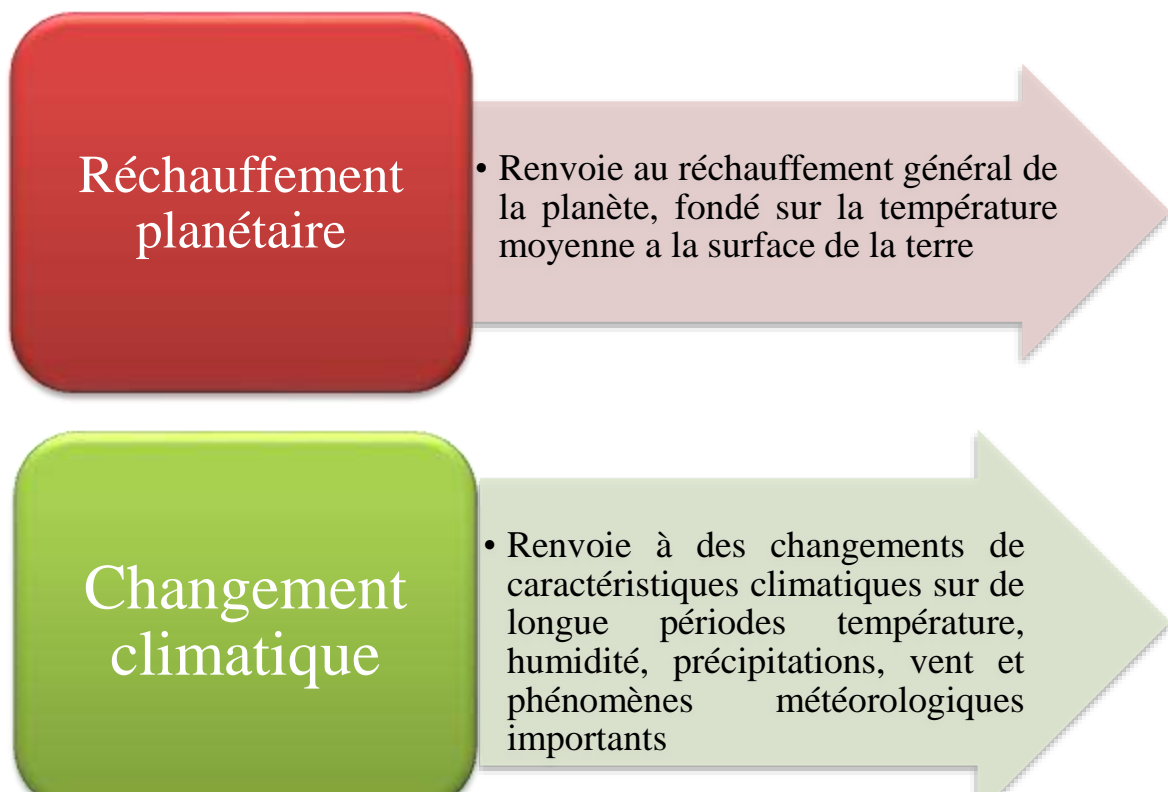


Figure 10: Réchauffement planétaire et changement climatique

D'après le GIEC, la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0,85°C sur la période allant de 1880 à 2012.

Ce diagramme illustre l'observation du changement de température moyenne à la surface de la Terre entre 1901 et 2012. Il montre que la quasi-totalité de la surface du globe se réchauffe. (GIEC, 2013a)

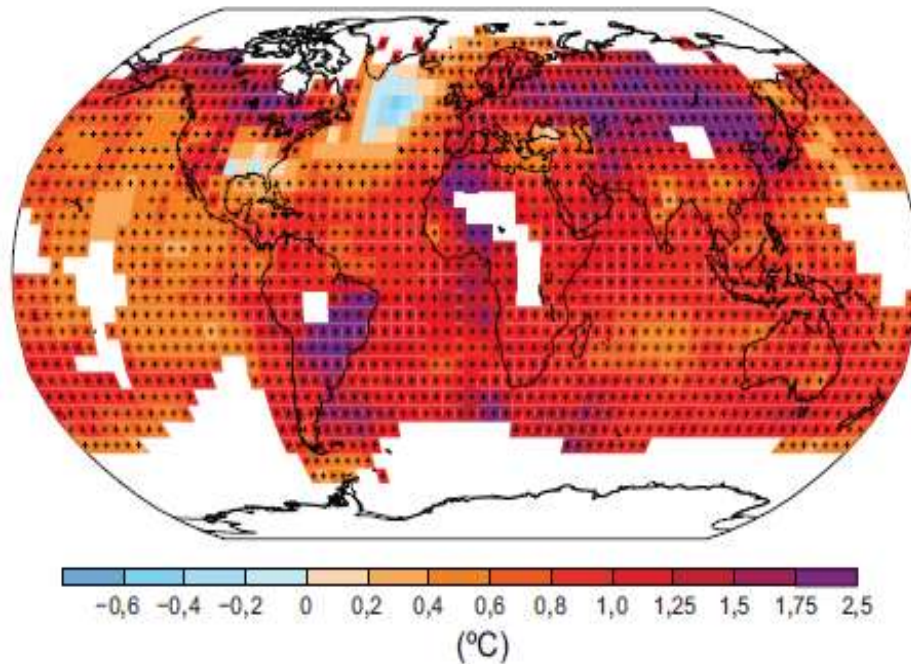


Figure 11: Evolution de la température à la surface (1901–2012), GIEC 2013, p.6

2.8. Historique de la science des changements climatiques

Dès 1824, le physicien français Joseph Fourier est le premier à décrire « l'effet de serre naturel » de la Terre. En 1861, le physicien irlandais John Tyndall montre que le CO₂ et l'H₂O peuvent être à l'origine de changements climatiques.

En 1895, le chimiste suédois Svante Arrhenius parvient à la conclusion que la combustion du charbon de l'ère industrielle favorisera l'effet de serre naturel. En 1938, l'ingénieur britannique Guy Callendar démontre que les températures ont augmenté par rapport au siècle précédent en raison des concentrations accrues de CO₂, mais « l'effet Callendar » est rejeté massivement. En 1958, le géochimiste Charles David Keeling a pour tâche de contrôler en continu la teneur de l'atmosphère en CO₂, et montre ainsi, au bout de deux ans seulement,

que le dioxyde de carbone augmente en Antarctique. (*A Brief History of Climate Change - BBC News*)

Dans les années 1970, d'autres gaz parmi lesquels le CH₄, le N₂O et des CFC ont été largement reconnus comme étant d'importants gaz à effet de serre d'origine anthropique. La première Conférence mondiale sur le climat s'est tenue en 1979 à Genève, conduisant à l'établissement du Programme climatologique mondial. C'est en 1988 que l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) ont créé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) qui, en 1990, a remis son premier Rapport d'évaluation sur l'état des changements climatiques, prévoyant une hausse de 0,3°C tous les dix ans au XXI^e siècle (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014)

Tableau 1: Historique de la science des changements climatiques

1824	Débat sur le fait que la température de la terre peut augmenter en cas de modification de l'atmosphère
1861	Observation du fait que le CO ₂ et le H ₂ O peuvent provoquer des changements climatiques
1895	Première hypothèse d'un effet de serre anthropique
1938	Preuve que la multiplication par deux de la concentration de CO ₂ dans l'atmosphère implique une hausse de la température moyenne mondiale de 2°C
1950	Début des recherches interdisciplinaire sur le cycle de carbone
1958	Mesure des hautes précisions des concentrations de CO ₂ dans l'atmosphère
1970	Découverte d'autre gaz à effet de serre
1979	Première conférence mondiale sur le climat à Genève
1988	Formation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)
1990	Premier rapport du GIEC

2.9. Instruments pour Prévoir et projeter les changements climatiques

En plus de l'observation des changements climatiques passés, les scientifiques essaient d'analyser les possibles changements à venir. A cette fin, ils ont développé un certain nombre d'instruments. A l'image d'un architecte qui construit la maquette d'un bâtiment afin de comprendre et prévoir son fonctionnement, les scientifiques du climat peuvent élaborer un modèle informatique du système climatique pour comprendre et prévoir son comportement. Les scénarios d'émissions constituent l'une des données utilisées pour construire un modèle de climat ; scénarios qui estiment les rejets futurs de gaz à effet de serre et d'aérosols dans l'atmosphère en s'appuyant sur des hypothèses concernant, par exemple, certains développements socioéconomiques et technologiques. La création de modèles de climat donne lieu à une projection climatique, par exemple, la réponse simulée du système climatique à un scénario d'émissions spécifique. Les projections de climat dépendent des scénarios d'émissions, ce qui les différencie des prédictions climatiques, lesquelles se fondent sur des conditions actuelles connues et sur des hypothèses concernant les processus physiques qui entraîneront des changements futurs.(Organisation météorologique mondiale, 2019)

2.9.1. Prévision Climatique

Une prévision climatique a pour objectifs de fournir une estimation dans le futur à partir de l'évolution actuelle.(Choukri et al., 2016)

2.9.2. Scénarios d'émission

Décrivent les rejets futurs dans l'atmosphère des gaz à effet de serre, des aérosols et autre polluant, en se fondant sur les informations relatives à l'utilisation des terres et la couverture des sols, Ils fournissent des données pour les modèles de climat.(IPCC, 2013)

2.9.3. Modèle climatique

Représentation numérique qui explique certains des propriétés communes du système climatique, en se fondant sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ces composants, sur leurs interactions et leurs processus rétroactifs.(Beniston, 2009)

2.9.4. Projection climatique

Généralement établie après utilisation de modèle climatique, une projection climatique c'est la réponse simulée du système climatique aux scénarios d'émission futurs ou de concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols(GIEC, 2013a).

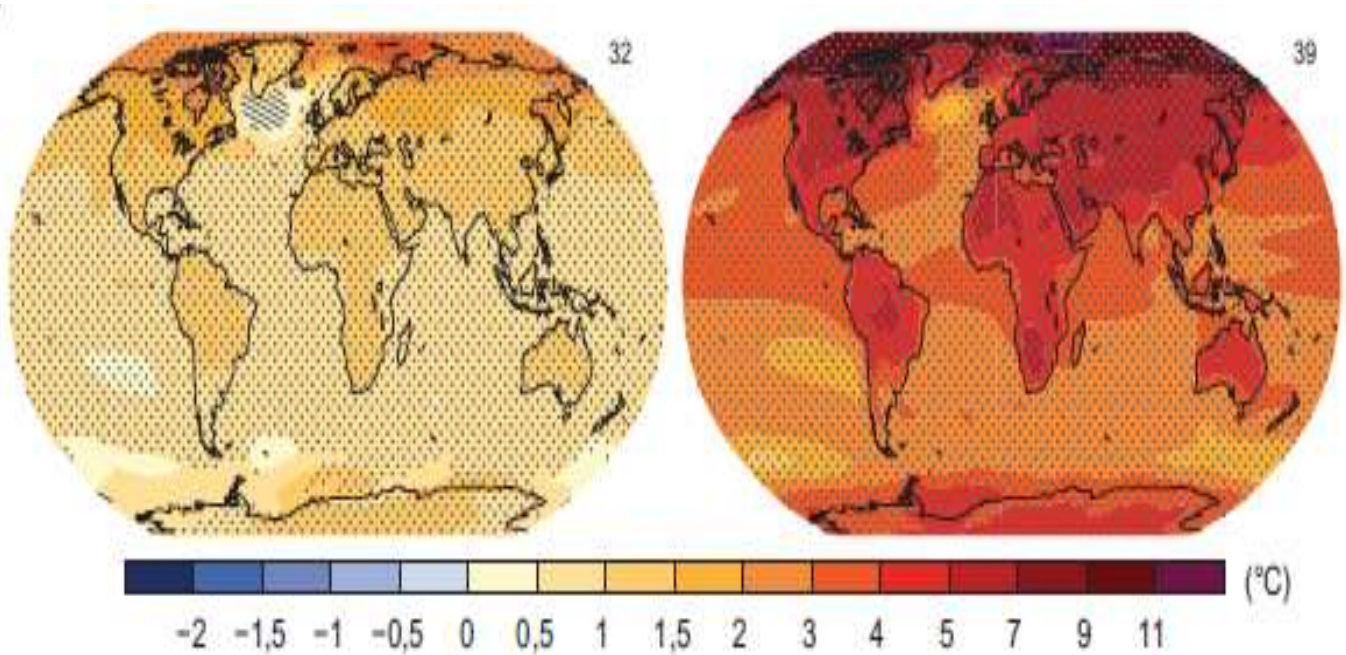


Figure 12: Changement projeté de la température moyenne à la surface entre 1986-2005 et 2081-2100

La figure (12) illustre les changements projetés (dans le futur) de la température moyenne à la surface selon deux scénarios différents. Ces projections visent la fin du XXI^e siècle (2081-2100) et ont été établies d'après les données de 1986-2005.

La projection de gauche s'appuie sur un scénario qui limite relativement les émissions de gaz à effet de serre (RCP 2,6), alors que la projection de droite se fonde sur un scénario qui envisage des taux très élevés d'émissions de gaz à effet de serre (RCP 8,5). Le RCP 2,6 projette une augmentation comprise entre 0,3 et 1,7°C de la température à la surface par rapport à l'époque préindustrielle, tandis que le RCP 8,5 projette une augmentation de 2,6 à 4,8°C d'ici 2081-2100.(GIEC, 2013b)

Les projections relatives aux changements du système climatique se fondent sur une hiérarchie de modèles de climat : ils vont des modèles simples à des modèles complets de climat, en passant par des modèles de complexité intermédiaire, ainsi qu'à des modèles de système de la Terre.

S'appuyant sur une série de scénarios de forçages anthropiques, les modèles simulent des changements. Les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) constituent une nouvelle série de scénarios utilisés dans le 5^e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC et al., 2013)

2.10. Les répercussions des changements climatiques

Les changements climatiques ont des répercussions sur presque tous les aspects de notre vie. Nos écosystèmes souffrent d'une perte de la biodiversité et de l'habitat naturel. Le changement climatique aura des effets néfastes pour les humains, sur leur santé notamment, en étendant les vecteurs de maladie, comme les moustiques. Il nous oblige également à repenser nos activités urbaines (par exemple, les transports et les infrastructures) et nos activités commerciales (en particulier, le développement de l'économie verte). Les conséquences des changements climatiques peuvent aussi se traduire par de nouveaux conflits ou obliger des populations à émigrer (en quittant, par exemple, les zones très basses de littoral).

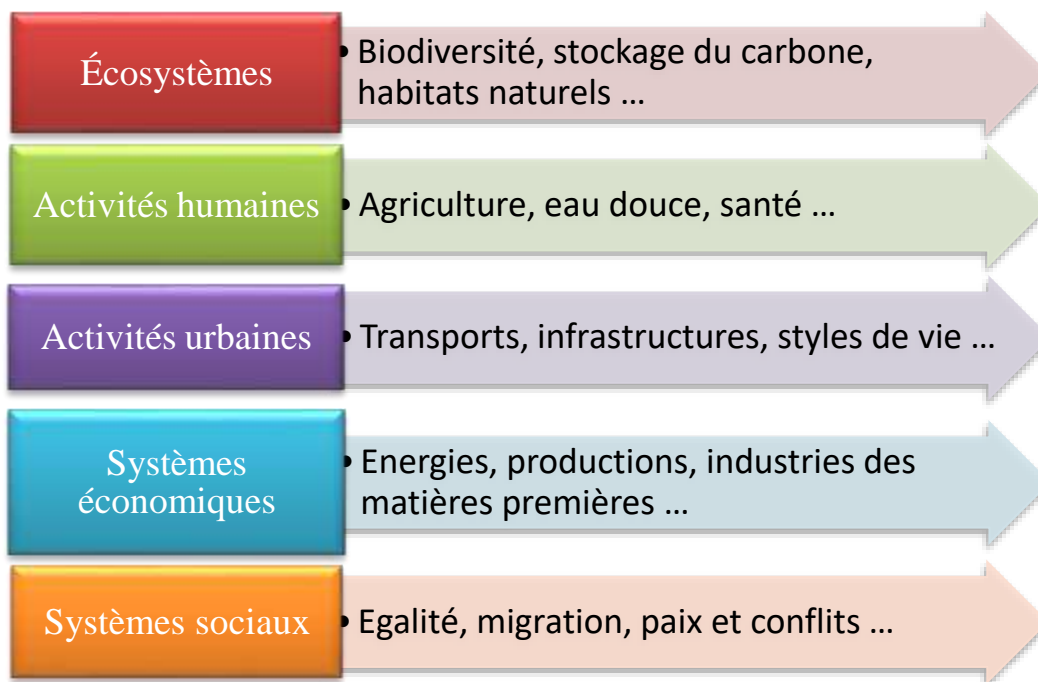


Figure 13: Les répercussions des changements climatiques

2.11. Les avantages de la science du changement climatique

Les scientifiques du monde entier tentent de mieux comprendre les mécanismes des changements climatiques, les changements auxquels on peut s'attendre dans le futur, ainsi que le rôle joué par les activités humaines. Bien que la probabilité et les causes de certains changements fassent débat, la plupart des scientifiques s'accordent sur le fait que :

- Le réchauffement du système climatique est incontestable
- L'influence humaine est évidente.

Selon le rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) (GIEC, 2013)

La science des changements climatiques nous permet :

- De comprendre comment et pourquoi le climat change
- D'évaluer l'influence des humains sur le climat
- De projeter de possibles changements
- D'encourager les politiques / prises de décision et les changements de comportement

2.12. L'importation de la science des changements climatiques

Les recherches scientifiques sur les changements climatiques fournissent d'importantes informations utiles à différents niveaux dans l'élaboration de décisions à prendre. Par exemple, l'analyse des données et des prévisions météorologiques peut nous aider à déterminer la meilleure période pour les récoltes. Elle peut aussi nous aider à prendre des mesures d'urgence appropriées en cas de catastrophes naturelles, telles que les cyclones. Les modèles de climat aident à prévoir des scénarios climatiques à long terme et sont importants pour une planification capable d'anticiper.

- L'analyse des données et des prévisions météorologiques est importante pour :
 - Planifier à court terme
 - Prendre des mesures en cas d'urgence
- Les modèles de climat permettent de prévoir des scénarios climatiques à long terme
- Données importantes pour l'évaluation des vulnérabilités et la planification des adaptations
- Promouvoir le développement de la résilience face aux changements climatiques et éviter une mauvaise adaptation

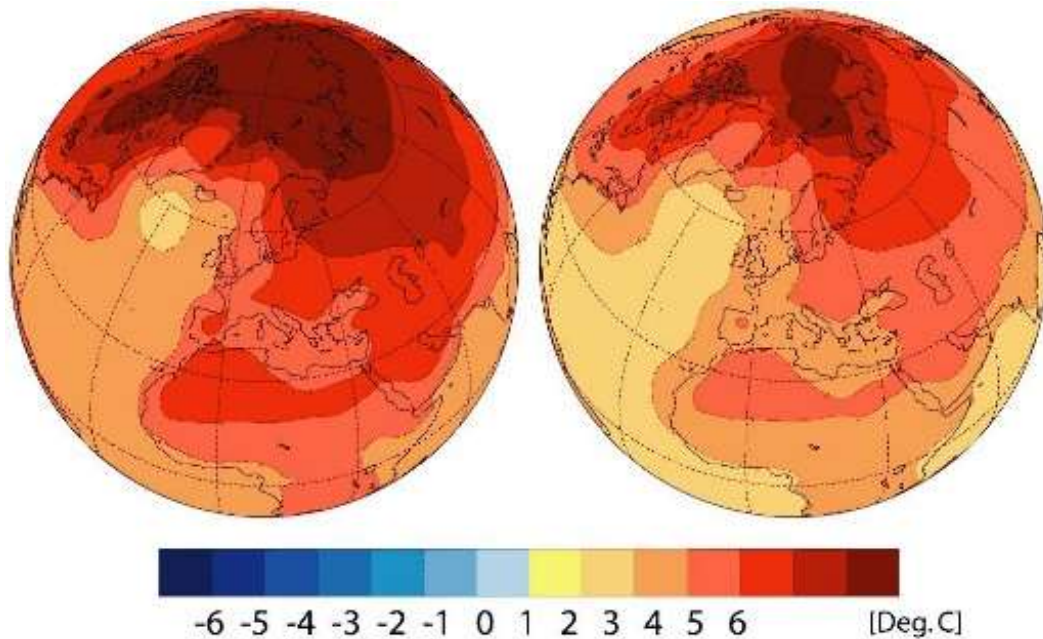


Figure 14: Les modèles du climat

3. Facteurs anthropiques des changements climatiques

Cette partie traite des principaux facteurs anthropiques à l'origine du changement climatique, comme la concentration accrue de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Elle commence par une présentation des gaz à effet de serre les plus importants émis par les humains. Elle aborde ensuite plus en détail chaque gaz, en se concentrant sur l'importance de chaque gaz en termes de réchauffement planétaire et les raisons de la hausse de leur concentration dans l'atmosphère au fil du temps. Cette partie s'achève par un diagramme représentant l'étendue de l'influence humaine sur le système climatique.

3.1. Les principaux gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre (GES) sont des gaz à l'état de trace dans l'atmosphère qui absorbent et émettent un rayonnement de grande longueur d'onde. Ils enveloppent naturellement la Terre, permettant de conserver une température d'environ 33°C plus chaude qu'en leur absence dans l'atmosphère.

Le tableau (2) présente les sept plus importants gaz à effet de serre réglementés par le Protocole de Kyoto, Chacun de ces gaz à une capacité particulière pour conserver la chaleur dans l'atmosphère, ce qu'on appelle le « potentiel de réchauffement global » (PRG).

Ils appartiennent tous au groupe des gaz à effet de serre persistants (GESp), ils sont chimiquement stables et demeurent dans l'atmosphère pendant des décennies, voire des siècles ou davantage ; leurs émissions exercent des influences à long terme sur le climat. Certains des GESp se forment naturellement (par exemple, le CO₂, le CH₄ et le N₂O), mais leurs concentrations atmosphériques au cours des 250 dernières années ont augmenté principalement à cause des activités humaines. D'autres gaz à effet de serre résultent entièrement des activités humaines (par exemple, les HFC, les PFC, le SF₆ et le NF₃). (UNEP, 2012)

Tableau 2: Principaux gaz à effet de serre

Gaz à effet de serre	Potentiel de réchauffement global (PRG) (sur 100 ans)	% Total des émissions anthropiques de GES (2010)
Dioxyde de carbone (CO₂)	1	76%
Méthane (CH₄)	25	16%
Oxyde nitreux(N₂O)	298	6%
Hydrofluorocarbures (HFC)	124-14 800	<2%
Hydrocarbures perfluorée (PFC)	7 390-12 200	<2%
Hexafluorure de soufre (SF₆)	22 800	<2%
Trifluorure d'azote	17 200	<2%

3.1.1. Le dioxyde de carbone (CO₂) :

Le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre d'origine humaine le plus abondant dans l'atmosphère, puisqu'il contribue pour quelque 66% au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. Il est à l'origine de l'augmentation de ce forçage à hauteur de 82 %4) environ depuis une décennie de même que sur les cinq dernières années. La fraction molaire préindustrielle, de 278 ppm, représentait une situation d'équilibre des flux entre l'atmosphère, les océans et la biosphère terrestre. (UNEP, 2012)

En 2017, la teneur de l'atmosphère en CO₂ s'établissait à 146 % de ce qu'elle était à l'époque préindustrielle, essentiellement à cause des émissions liées à l'exploitation des combustibles fossiles et à la production de ciment (celles-ci ont atteint 9,9±0,5 PgC₅) en 2016

(Le Quéré et al., 2018), au déboisement et aux autres changements d'affectation des sols ($1,3 \pm 0,7$ PgC en moyenne pour la période 2007–2016). Sur le total du CO₂ émis par les activités humaines entre 2007 et 2016, 44 % environ se sont accumulés dans l'atmosphère, 22 % dans les océans et 28 % dans la biosphère terrestre ; le solde non attribué est de 5 % .(Le Quéré et al., 2018)

En 2017, la fraction molaire du CO₂ moyennée à l'échelle du globe s'est établie à $405,5 \pm 0,1$ ppm (figure 4). L'augmentation de la moyenne annuelle – 2,2 ppm entre 2016 et 2017 – est inférieure à la hausse survenue entre 2015 et 2016 (3,2 ppm) et pratiquement égale au taux d'accroissement moyen sur les dix dernières années (2,24 ppm/an). L'accélération du rythme d'accroissement en 2015 et 2016 par comparaison avec les années précédentes et avec la hausse survenue entre 2016 et 2017 est due en partie à l'augmentation des émissions naturelles de CO₂ dans le sillage du dernier épisode El Niño, comme c'est expliqué dans la douzième édition du Bulletin de l'OMM sur les gaz à effet de serre. (Organisation météorologique mondiale, 2013)

Le retirer de manière significative de l'atmosphère implique un ensemble de processus qui s'échelonnent à divers intervalles de temps. L'émission de CO₂ résulte de la combustion de combustibles fossiles, de la déforestation ou de la dégradation des forêts, et aussi de la production du fer et de l'acier. Agissant comme un entonnoir qui absorbe le CO₂ de l'atmosphère, les océans et les forêts permettent en grande partie d'emprisonner le carbone. Le dioxyde de carbone est le gaz auquel on compare tous les autres lorsqu'on parle de Potentiel de réchauffement global. Les émissions d'autres gaz à effet de serre peuvent être converties en émissions équivalentes de CO₂.

La contribution de chaque gaz à effet de serre au forçage radiatif est déterminée par son potentiel de réchauffement global et par la modification de sa concentration dans l'atmosphère au fil du temps.

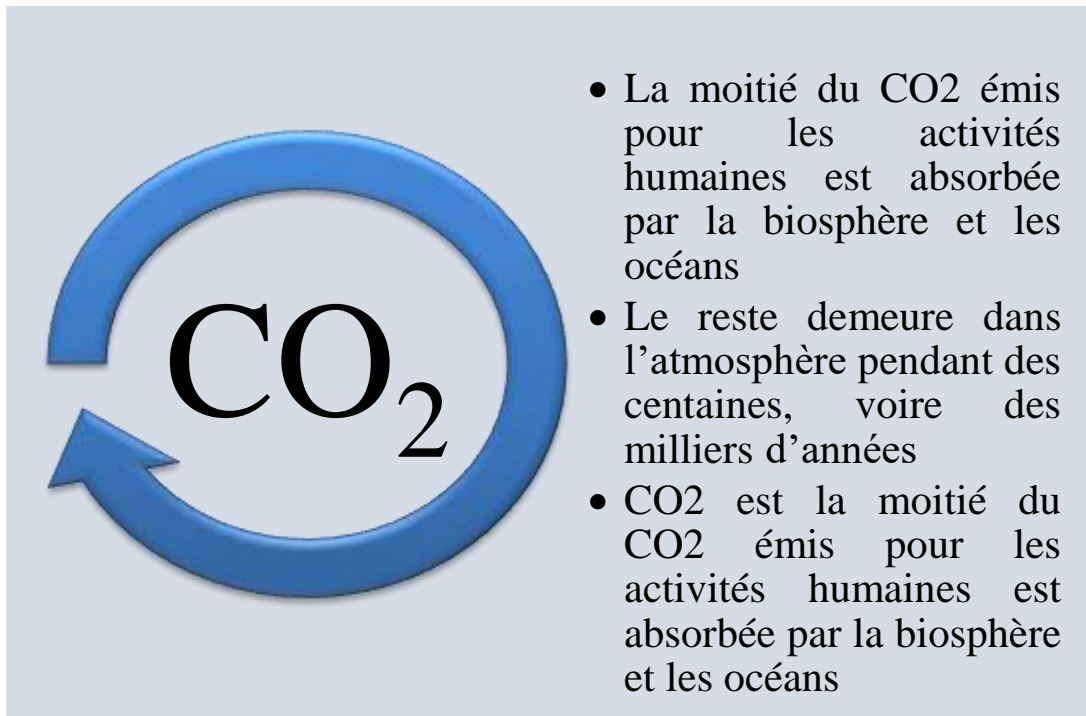


Figure 15: Les caractéristiques du CO₂

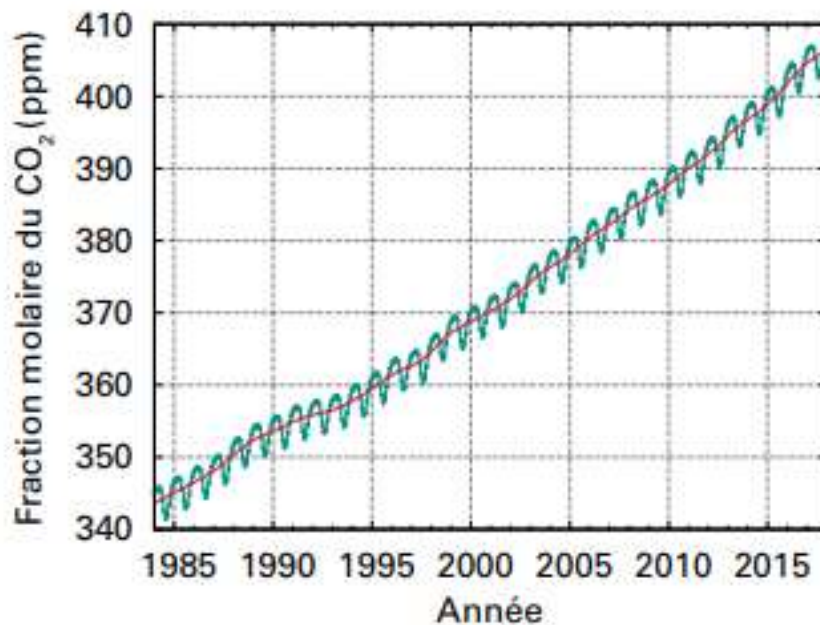


Figure 16: Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de la fraction molaire du CO₂ pendant la période comprise entre 1984 et 2017

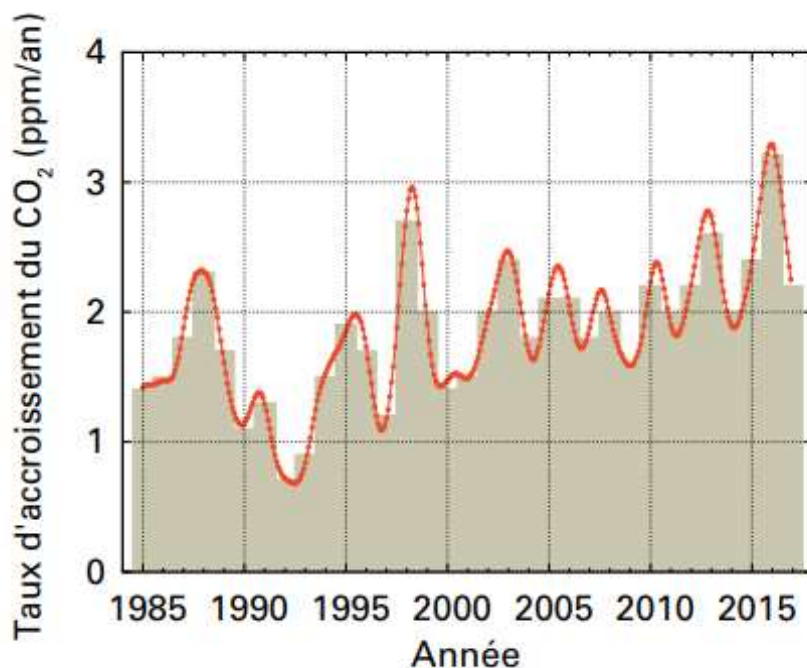


Figure 17: Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe du taux d'accroissement du CO₂ pendant la période comprise entre 1984 et 2017

Les niveaux de CO₂ dans l'atmosphère ont augmenté régulièrement au cours des 200 dernières années en raison de l'utilisation accrue des combustibles fossiles et de la déforestation, ces deux pratiques dégageant de grandes quantités de CO₂ dans l'atmosphère. On pense que la concentration actuelle de CO₂ est la plus élevée des 800 000 dernières années. A partir des figures (15) et (16) on peut conclure que les concentrations de CO₂ ont augmenté d'environ 100 ppm (partie par million) depuis la révolution industrielle ; elles ont franchi le seuil symbolique de 400 ppm sur plusieurs stations d'observation de l'atmosphère en 2017. (Organisation météorologique mondiale, 2018)

3.1.2. Le méthane (CH₄)

Le méthane est le deuxième GES anthropique et le plus important, le méthane (CH₄) contribue à environ 18 % du forçage radiatif total provoqué par les GESp. Environ 40 % du méthane sont rejetés dans l'atmosphère par des sources naturelles (zones humides et termites, par exemple), tandis qu'environ 60 % proviennent d'activités humaines (par exemple, élevage de bétails, rizières, exploitation des combustibles fossiles, ensevelissement des déchets et combustion de la biomasse). Grâce à des réactions chimiques principalement, le méthane est éliminé de l'atmosphère au bout d'une douzaine d'années. Il s'agit par conséquent d'un gaz à effet de serre important, mais dont l'effet est de courte durée. (GIEC, 2007)

Le méthane contribue pour quelque 17 % Au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. Environ 40 % des rejets de méthane dans l'atmosphère sont d'origine naturelle (zones humides, termites, etc.) et 60 % d'origine humaine (élevage de ruminants, riziculture, exploitation de combustibles fossiles, décharges, combustion de biomasse, etc.). (Butler & Montzka, 2018)

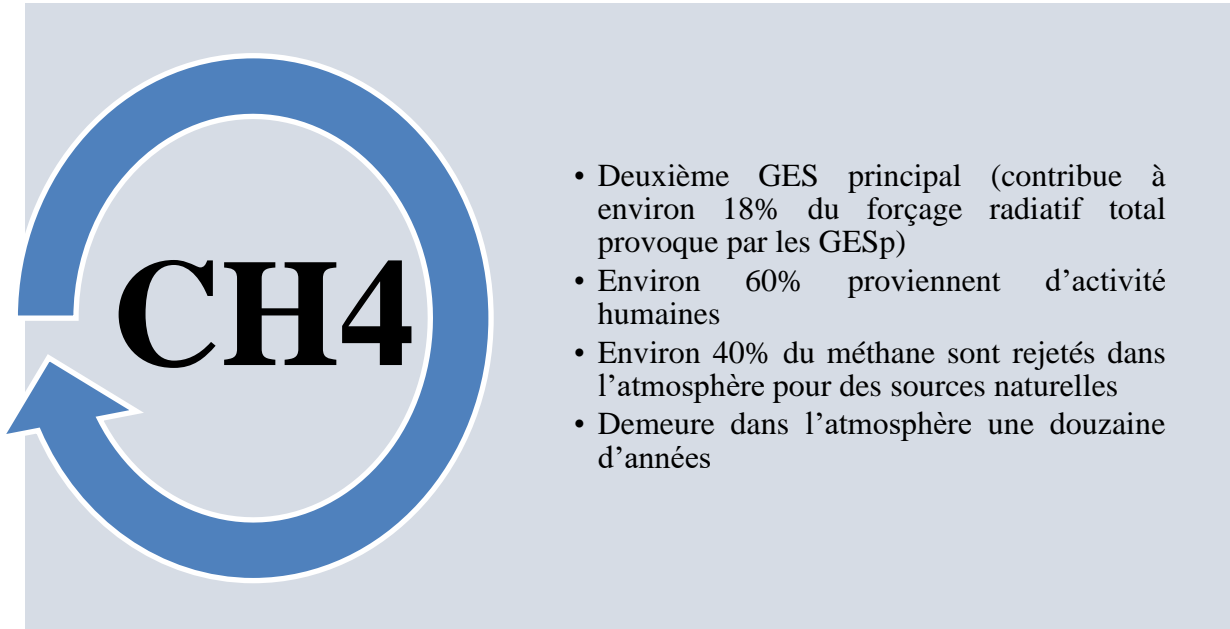


Figure 18: Les caractéristiques du méthane

Le CH₄ atmosphérique a atteint en 2015 257 % du niveau qu'il avait à l'époque préindustrielle (environ 722 ppb) du fait de l'accroissement des émissions anthropiques. Moyennée à l'échelle du globe, la teneur de l'atmosphère en CH₄, calculée à partir d'observations in situ, a atteint un nouveau pic en 2017 – 1 859 2 ppb – soit une augmentation de 7 ppb par rapport à l'année précédent). Cette hausse est inférieure à celle survenue entre 2015 et 2016 mais pratiquement égale au taux d'accroissement moyen sur les dix dernières années. Après avoir atteint quelque 12 ppb par an à la fin des années 80, le taux d'accroissement annuel moyen du CH₄ atmosphérique a diminué pour se stabiliser à une valeur proche de zéro entre 1999 et 2006. Depuis 2007, la teneur de l'atmosphère en méthane est à nouveau en hausse. Les mesures du CH₄ effectuées dans le cadre de la VAG donnent à penser que cette récente augmentation est probablement due à une hausse des émissions de méthane provenant des terres humides des régions tropicales ainsi que de sources anthropiques aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord.

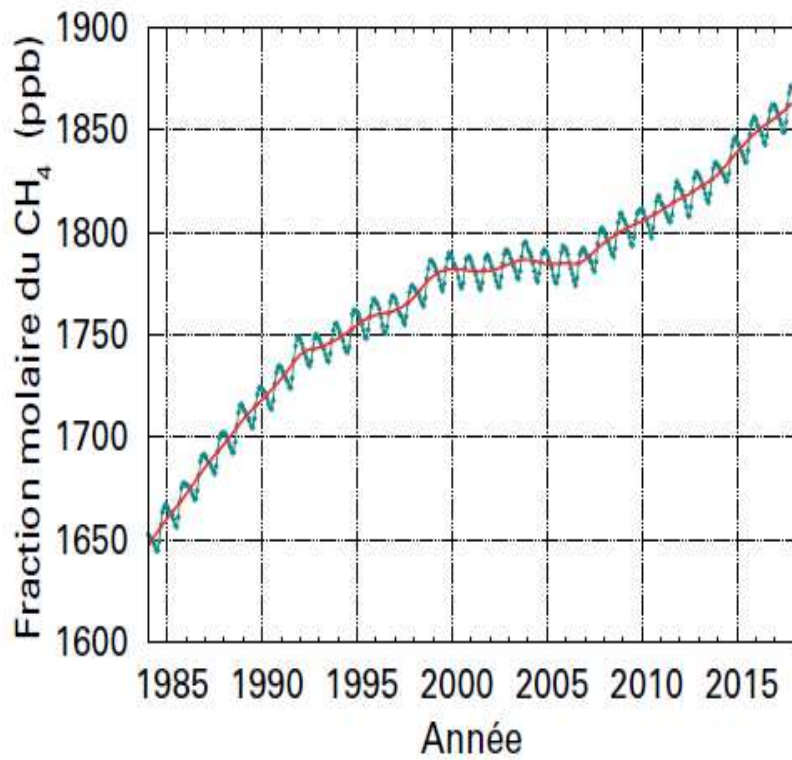


Figure 19: Evolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de la fraction molaire du CH₄ entre 1984 et 2017

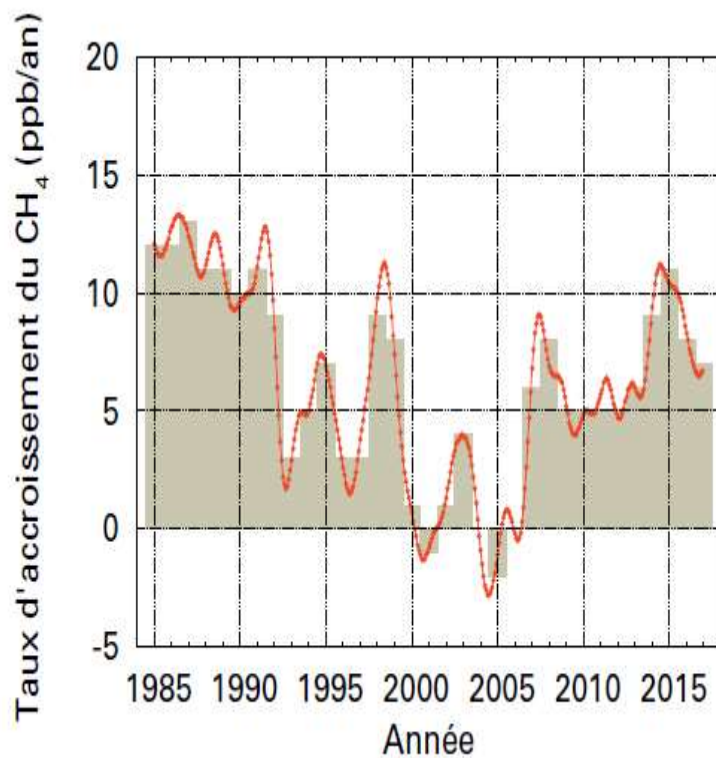


Figure 20: Evolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe du taux d'accroissement pendant la période comprise entre 1984 et 2017

3.1.3. Carbone

Le carbone, sous ses diverses formes (comme le CO₂ et le CH₄), est continuellement recyclé par la Terre, et n'est jamais détruit. Le diagramme illustre les nombreuses formes sous lesquelles le carbone est rejeté et stocké dans l'environnement. Le stockage du carbone peut se faire sur des périodes relativement courtes dans des organismes vivants (plantes et animaux, par exemple) ou pendant des centaines d'années dans les océans. Il peut aussi être emprisonné pendant des millions d'années dans de la roche et des fossiles. Le diagramme montre également comment les humains interviennent dans le cycle du carbone. Avant que les humains n'utilisent les combustibles fossiles comme énergie, le cycle du carbone était relativement équilibré (par exemple, la quantité totale de carbone dans l'atmosphère restait constante). En extrayant du sol le carbone longtemps stocké (pétrole, gaz, etc.) et en le rejetant dans l'atmosphère, les humains ont rompu l'équilibre du cycle du carbone qui, en retour, affecte le climat mondial. La déforestation, autre forme de déstockage du carbone, renforce encore davantage ce processus.

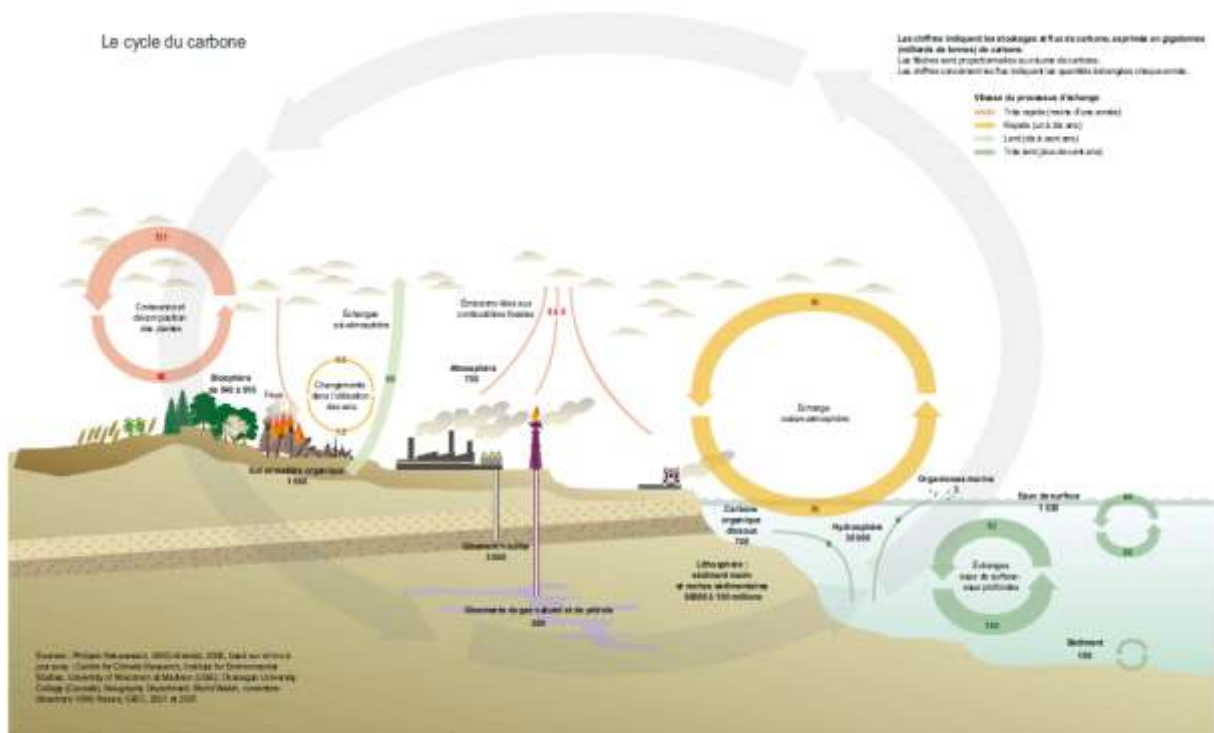


Figure 21:Le cycle du Carbone

3.1.4. Le protoxyde d'azote

L'oxyde nitreux (N₂O) constitue le troisième GES le plus important, contribuant à environ 6 % du forçage radiatif total provoqué par les GESp. La première source anthropique du N₂O provient de la production d'engrais et de son utilisation dans l'agriculture et au cours de divers processus industriels.(GIEC, 2013a)

On estime que le N₂O reste dans l'atmosphère environ 114 ans. Son incidence sur le climat, pour une période de 100 ans, est 298 fois plus élevée que celui d'émissions équivalentes de dioxyde de carbone. Il joue aussi un rôle important dans la destruction de la couche d'ozone stratosphérique qui nous protège des rayons ultraviolets nocifs du soleil. (Organisation météorologique mondiale, 2013)

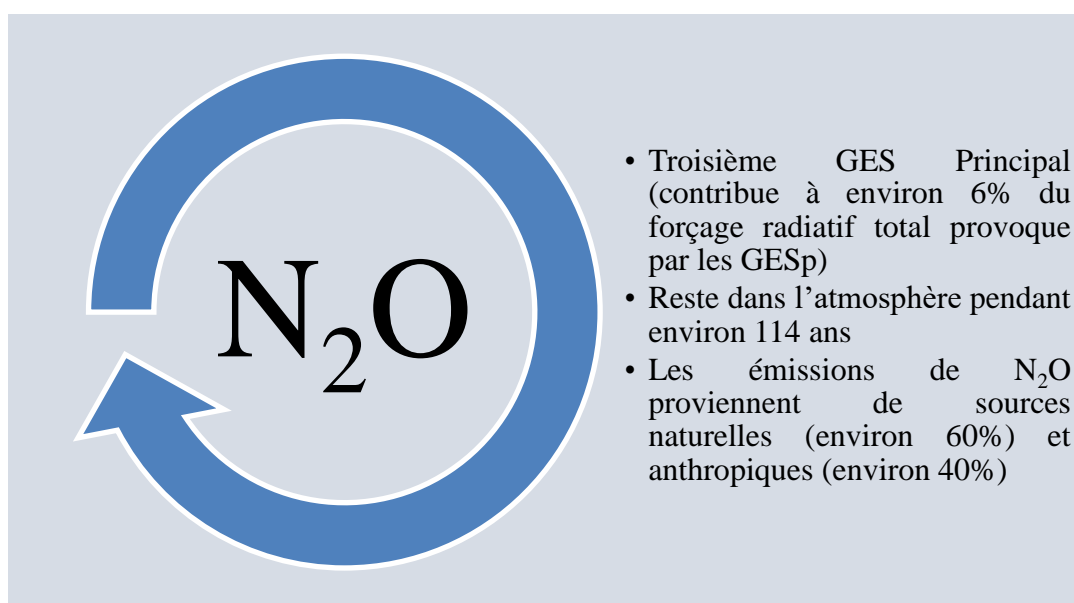


Figure 22: Les caractéristiques du protoxyde d'azote

Le protoxyde d'azote contribue pour quelque 6 % (Butler & Montzka, 2018) au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants, ce qui le place au troisième rang des agents en cause. Les émissions de N₂O dans l'atmosphère proviennent à la fois de sources naturelles (environ 60 %) et de sources anthropiques (environ 40 %), et notamment des océans, des sols, de la combustion de biomasse, des engrais et de divers processus industriels.

La fraction molaire du N₂O moyennée à l'échelle du globe a atteint 329,9±0,1 ppb en 2017, soit 0,9 ppb de plus que l'année précédente (figure 22) et 122 % du niveau qu'elle avait à l'époque préindustrielle (270 ppb).

La hausse enregistrée entre 2016 et 2017 est supérieure à celle survenue entre 2015 et 2016 et pratiquement égale à la moyenne annuelle calculée sur les dix dernières années (0,93 ppb/an). (Figure 23)

L'accroissement du N₂O atmosphérique est probablement dû à un plus grand recours aux engrais dans le contexte de l'agriculture, à quoi s'ajoute l'augmentation des émissions de ce gaz par les sols en raison des dépôts d'azote liés à la pollution de l'air.

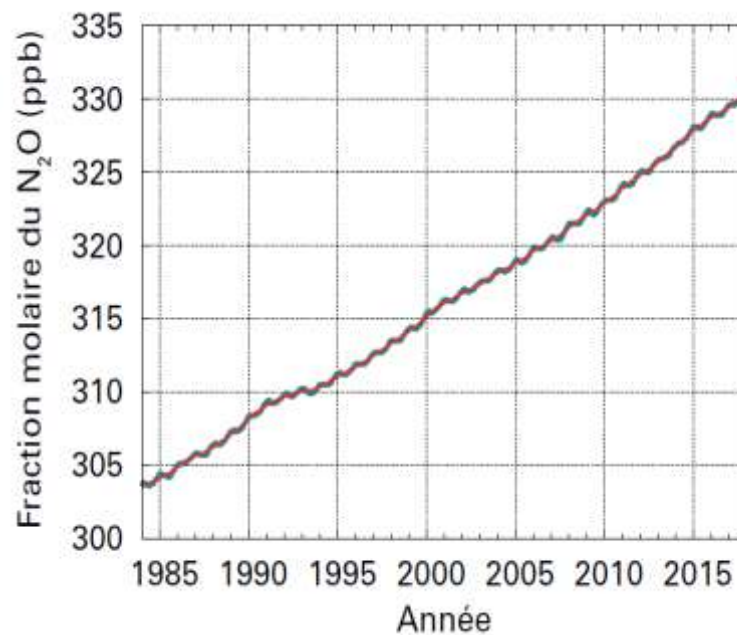


Figure 23: Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de la fraction molaire du N₂O entre 1984 et 2017

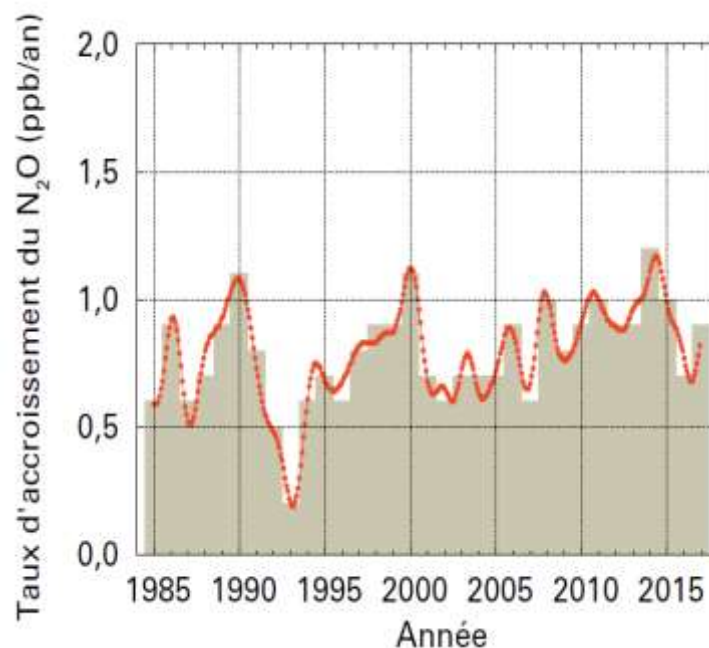


Figure 24: Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de du taux d'accroissement du N₂O pendant la période comprise entre 1984 et 2017

La concentration de N₂O a constamment augmenté depuis 1750. En 2017, sa concentration dans l'atmosphère était d'environ 329 ppm, soit 22% plus élevée que celle de l'époque préindustrielle (270ppm).

Tableau 3: Concentration de N2O augmenté entre 1750 et 2017

Année	1750	2012	2017
Concentration N2O	270	325 ,1	329

3.1.5. Les gaz fluorés

Les gaz fluorés appartiennent à la famille des gaz fabriqués par les humains et utilisés dans de nombreuses activités industrielles. Ils trouvent leur origine dans les réfrigérants, l'air conditionné, les solvants, les productions d'aluminium et de magnésium, etc. Plusieurs de ces gaz fluorés ont un potentiel de réchauffement global (PRG) très élevé par rapport aux autres gaz à effet de serre.

Cela signifie que de petites concentrations atmosphériques peuvent avoir de grandes répercussions sur les températures globales. Ces gaz peuvent aussi demeurer de longues périodes dans l'atmosphère, jusqu'à des milliers d'années dans certains cas. Les gaz fluorés ne peuvent disparaître de l'atmosphère que lorsqu'ils sont détruits par la lumière du soleil dans la couche la plus haute de l'atmosphère.



Figure 25: Les caractéristiques des gaz fluorés

De manière générale, les gaz fluorés constituent les gaz à effet de serre les plus puissants et les plus persistants émis par les activités humaines. Il existe trois catégories principales de gaz fluorés : les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆).

- Les hydrofluorocarbones (HFC) sont les gaz fluorés les plus communs. Ils sont utilisés dans différents secteurs et applications : comme réfrigérants dans la réfrigération, l'air conditionné et les équipements de pompes à chaleur, comme agents de gonflement pour les mousses, comme solvants, ainsi que dans les extincteurs et les sprays aérosols.
- Les hydrocarbures perfluorés (PFC) sont généralement employés dans le secteur électronique (par exemple, pour le nettoyage par plasma des galettes de silicium), ainsi que dans les industries cosmétiques et pharmaceutiques. Auparavant, les PFC étaient aussi utilisés dans les extincteurs, ils sont encore présents dans les systèmes anti-incendie les plus anciens.
- L'hexafluorure de soufre (SF₆) est principalement utilisé en tant que gaz isolant, dans les postes électriques à haute tension et dans la production du magnésium et de l'aluminium.

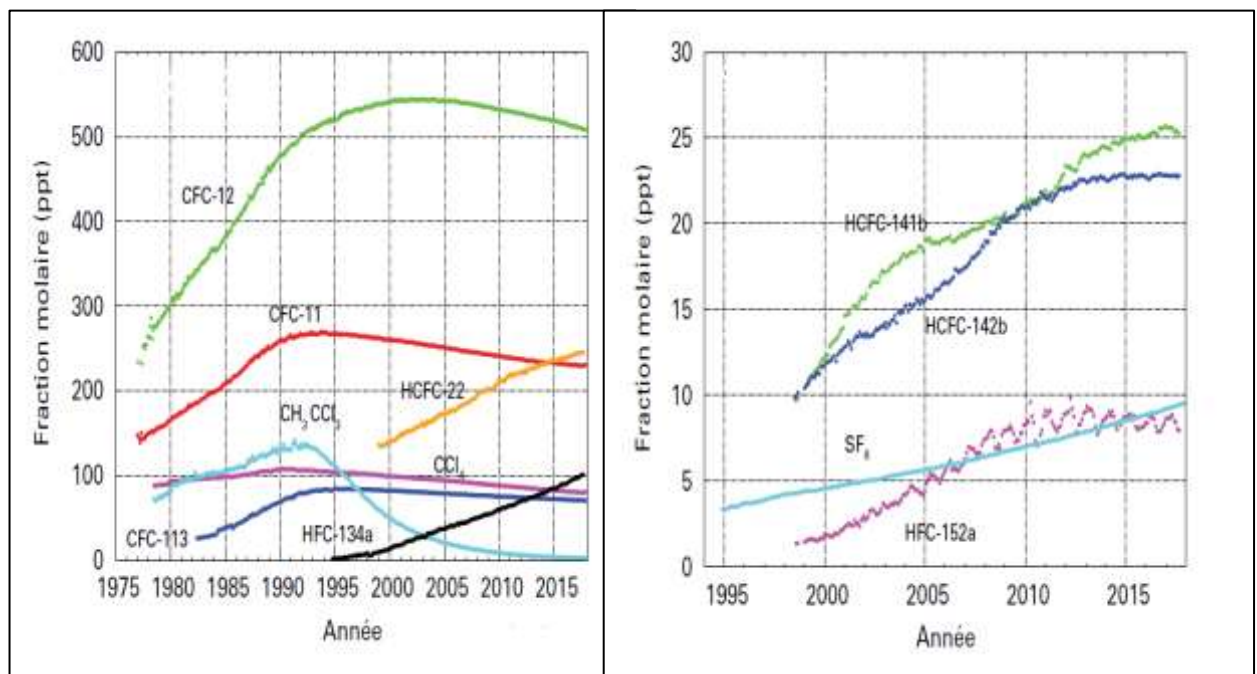


Figure 26: Évolution de la fraction molaire mensuelle moyenne du SF₆ et des principaux halocarbures

La figure 26 montre l'évolution des concentrations atmosphériques d'hexafluorure de soufre (SF₆) (graphique de gauche) et de plusieurs CFC et gaz fluorés (graphique de droite). Les concentrations de CFC, réglementées par le Protocole de Montréal, sont en baisse. Cependant, les hydro chlorofluorocarbones (HCFC) et les hydrofluorocarbures (HFC), importants gaz à effet de serre également, présentent des taux qui augmentent relativement vite.

3.1.6. La vapeur d'eau

La vapeur d'eau est le gaz-trace dans l'atmosphère dont l'effet de serre est le plus important (il est de l'ordre de deux fois celui du CO₂). Sa concentration (la vapeur d'eau est trois à trente fois plus abondante que le CO₂) n'est pas modifiée directement par les activités humaines, mais elle pourrait changer dans le futur comme conséquence indirecte de l'échauffement global. En effet, l'effet de serre, en élevant la température de l'eau de mer, accroît l'évaporation et cette vapeur d'eau crée un effet de serre additionnel qui accentue encore le phénomène. Mais, parallèlement, la couverture nuageuse qui en résulterait, de par l'effet albédo des nuages, va limiter cet effet de serre. Actuellement, au niveau de cette nébulosité, il existe une grande incertitude sur son rôle amplificateur ou réducteur du réchauffement. (Jean-Pierre Garrec, 2000)

4. La modélisation du climat

Les modèles climatiques ont progressé en même temps que la puissance des ordinateurs. Sur le premier ordinateur programmable existant, le mathématicien John von Neumann a conçu en 1950, avec d'autres scientifiques, un modèle de prévision météorologique.

En 1956, Norman Phillips et son équipe ont développé au Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, à Princeton, aux États-Unis, le premier modèle que l'on peut qualifier de climatique, car il a permis la simulation de la variabilité de l'atmosphère de l'hémisphère Nord sur une période de 31 jours. Ce modèle, dit de circulation générale, ne présentait aucune différence conceptuelle avec ses prédécesseurs appliqués à la prévision météorologique.

Plus tard, vers la fin des années 1960, sont apparus les premiers modèles couplant l'évolution de l'atmosphère et celle de l'océan. L'utilisation de ce type de modèle se généralise, notamment pour les besoins des études du changement climatique. Les océans jouent en effet un rôle essentiel dans la distribution géographique et le temps de mise à l'équilibre du système

climatique. Cela est dû à la fois à leur grande inertie thermique comparée à celle de l'atmosphère, et à la lenteur des processus de mélange vertical et de transport des eaux de surface vers l'océan profond.

Les climatologues ont progressivement introduit dans leurs modèles de nouveaux phénomènes. Aujourd'hui, ils considèrent l'atmosphère, les océans, les sols et la végétation, les banquises, les aérosols sulfatés, et dans certains cas l'hydrologie continentale, le cycle du carbone incluant la biosphère et les écosystèmes marins, ou encore l'ozone stratosphérique. Des progrès restent à accomplir dans la modélisation des différentes interactions du système climatique (couplage), la paramétrisation des nuages, l'augmentation de la résolution (et donc la description de processus de plus petite échelle).

Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, le GIEC utilise les modèles du système climatique et des études économiques et démographiques. Ils composent, non pas des prévisions, irréalisables à l'échelle de plusieurs décennies, mais des scénarios d'évolution du climat, supposés couvrir un large éventail d'évolutions possibles.

Les simulations climatiques sont réalisées à partir de modèles numériques appelés Modèles Atmosphériques de Circulation Générale (MACG; angl. GCM pour General Circulation Model). La principale différence par rapport à un modèle de prévision numérique du temps est la nécessité de forcer le modèle vers des valeurs climatologiques (ou leur évolution probable) pour éviter des dérives trop fortes du modèle. Ces valeurs climatologiques sont généralement des moyennes mensuelles permettant ainsi de prendre en compte le cycle annuel saisonnier. Les études climatiques classiques se font à partir de MACG qui couvrent l'ensemble du globe, représentent la dynamique de l'atmosphère et ses lois physiques. Pour étudier le climat global de la planète, les modèles atmosphériques sont couplés à des modèles représentant les autres parties du système terre : l'océan, la végétation, les fleuves, la biogéochimie marine, la chimie atmosphérique, les calottes polaires, le cycle du carbone. En particulier, les modèles atmosphériques globaux utilisés pour les simulations climatiques sont généralement couplés avec un modèle océanique, les températures de surface de l'océan étant calculées par le modèle océanique à partir des flux en surface (rayonnement, flux turbulents) fournis par le modèle atmosphérique. Les températures de surface de l'océan n'étant pas contraintes par les observations peuvent donc s'en écarter parfois assez fortement dans certaines régions.

- Les scénarios d'émission
- Les modèles climatiques

4.1. Les scénarios d'émission

Les implications du changement climatique pour l'environnement et la société dépendront non seulement de la réponse du système Terre aux changements de forçages radiatifs, mais également de la façon dont les changements socio-économiques (économie, technologie, mode de vie, politiques publiques) évolueront. Afin d'analyser l'évolution future du climat, le Groupe intergouvernemental GIEC a donc vite éprouvé le besoin de s'appuyer sur des scénarios socio-économiques d'émission de gaz à effet de serre.

Les scénarios socio-économiques consistent à faire diverses hypothèses sur le développement économique futur et ses conséquences sur l'environnement. Ces scénarios sont fournis par des modèles d'impact intégrés qui prennent en compte l'évolution de facteurs dont les principaux sont la population, l'économie, le développement industriel et agricole et, de façon assez simplifiée, la chimie atmosphérique et le changement climatique

Pour le premier et le deuxième rapport du GIEC les scénarios dits IS92 ont été utilisés. La seconde génération de scénarios dits SRES pour *Special Report on Emissions Scenario* a ensuite été utilisée jusqu'au quatrième rapport du GIEC (IPCC Fourth Assessment Report, AR4).

Ils furent définis à la fin des années 1990 et diffusés en 2000. Puis en raison de l'évolution de ces facteurs, les outils du GIEC se sont mis à jour pour les prendre en compte. Ainsi pour le dernier rapport du GIEC (rapport AR5), les scénarios dit RCP pour Radiative Concentration Pathway ont été développés puis utilisés depuis pour produire des projections climatiques.

- Les scénarios SRES
- Les scénarios RCP

4.1.1. Les scénarios SRES

- Les scénarios de référence :

Les scénarios de référence correspondent à des concentrations en gaz à effet de serre et en aérosols observées. Ils sont utilisés comme conditions initiales des modèles numériques, afin de simuler l'évolution récente du climat. Ces simulations couvrent la période 1860-2000. L'objectif de leur réalisation est triple :

- Comparer l'évolution du climat simulé par les modèles à celle observée depuis 140 ans ;
- Comparer les caractéristiques du climat simulé à celles observées ces dernières années ;
- Déterminer un état initial pour les simulations de changement climatique futur selon différents scénarios socio-économiques.

Ce dernier objectif introduit des difficultés particulières. En effet, pour bien simuler l'évolution récente du climat, il faut considérer tous les forçages, aussi bien naturels (éruptions volcaniques, variations de la constante solaire) que ceux dus aux activités humaines (émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols...). Mais ces forçages n'étant pas prévisibles, on ne sait pas comment les prendre en compte pour le futur.

Le forçage volcanique est aléatoire et toujours négatif : une partie des poussières émises lors des très grosses éruptions volcaniques reste plusieurs mois dans la basse stratosphère. Elles réfléchissent le rayonnement solaire, ce qui tend à refroidir la surface. Par conséquent, considérer le forçage volcanique pour le XXe siècle, mais pas pour le XXIe, introduit un biais, une erreur systématique.

Il y a alors deux solutions possibles : prendre en compte les forçages naturels observés au XXe siècle et générer de façon plus ou moins aléatoire ceux pour le XXIe siècle, ou, au contraire, ne les prendre en compte ni au XXe ni au XXIe siècle.

C'est cette deuxième solution qui a été retenue. Les simulations de 1860 à 2000 sont réalisées en ne considérant que les forçages dus aux activités humaines : accroissement des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés. L'évolution de la concentration des gaz à effet de serre distribués de manière homogène dans l'atmosphère, comme le CO₂ ou le CH₄, est bien connue. Elle est mesurée directement dans l'air depuis quelques dizaines d'années (depuis 1958 pour le CO₂) et dans les bulles d'air renfermées dans les glaciers pour les périodes antérieures.

Contrairement aux gaz bien répartis dans l'atmosphère, la concentration des aérosols sulfatés est très variable dans l'espace et dans le temps. À partir des mesures réalisées en différents sites, il n'est pas possible d'estimer directement la distribution géographique des aérosols et leur évolution temporelle. Il faut recourir à un modèle de chimie-transport. Les concentrations d'aérosols sulfatés calculées par Boucher et Pham (2002) et recommandées par le GIEC, ont été utilisées.

➤ Les scénarios socio-économiques :

Les scénarios socio-économiques consistent à faire diverses hypothèses sur le développement économique futur et ses conséquences sur l'environnement. Ces scénarios sont fournis par des modèles d'impact intégrés qui prennent en compte l'évolution de la population, l'économie, le développement industriel et agricole et, de façon assez simplifiée, la chimie atmosphérique et le changement climatique. Ces modèles d'impact intégrés fournissent des scénarios d'évolution des gaz à effet de serre et des aérosols qui sont introduits comme forçage dans les simulations couplées océan-atmosphère.

Nous sommes actuellement à la deuxième génération de scénarios dits SRES (Second Report on Emission Scenario). Auparavant, pour le premier et le deuxième rapport, les 6 scénarios IS92 (pour IPCC Scenarios) étaient utilisés. Le prochain rapport du GIEC, le cinquième, privilégiera une nouvelle famille de scénarios, appelés BCP (Benchmark Concentration Pathway). Ces derniers ne seront pas disponibles à l'ouverture du portail d'infos sur les futurs du climat.

Les différents scénarios du quatrième rapport du GIEC sont décrits dans le résumé à l'attention des décideurs du groupe de travail I.

Le graphique ci-dessous indique les principales hypothèses faites pour les différents scénarios :

Scénario	Population	Economie	Environ.	Equité	Technologie	Mondial.
A1FI						
A1B						
A1T						
B1						
A2						
B2						

⇒ La famille de scénarios A1 décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au

milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant.

- ⇒ La famille de scénarios A1 se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique :
 - Forte intensité de combustibles fossiles (A1FI),
 - Sources d'énergie autres que fossiles (A1T),
 - Equilibre entre les sources (A1B) (« équilibre » signifiant que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies d'approvisionnement énergétique et des utilisations finales).

- ⇒ La famille de scénarios A2 décrit un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

- ⇒ La famille de scénarios B1 décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

⇒ La famille de scénarios B2 décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas et les familles de scénarios B1 et A1. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

Tableau 4 : Concentration de N2O augmenté entre 1750 et 2017

<i>Scénarios</i>	<i>Utilité</i>
A1	Réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement économique sur le schéma actuel.
B1	Réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.
A2	Développement hétérogène avec un développement économique sur le schéma actuel.
B2	Développement hétérogène avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.

4.2. Les modèles climatiques

Les modèles climatiques présentent de nombreuses similitudes avec les modèles de prévision météorologique ; ils reposent sur des formulations et des méthodes de calcul proches, et partagent un certain nombre d'outils logiciels. Néanmoins, la première préoccupation des modèles de prévision est de « coller » au plus près avec l'état réel de l'atmosphère, à un instant

donné. À cette fin, de très importants travaux ont pour objectif d'utiliser au mieux le maximum d'observations. (Rabier et al., 2000)

Par rapport aux modèles de prévision, une spécificité essentielle des modèles climatiques est de ne pas être du tout rappelé vers des observations. Le système climatique évolue totalement librement. Il reçoit de l'énergie sous forme de rayonnement solaire et en perd sous forme de rayonnement infrarouge émis vers l'espace. Le climat simulé (vent, température, etc.) est le résultat de cet ajustement entre énergie reçue et énergie perdue. La conservation de l'énergie, et de façon plus générale les échanges d'énergie, sont donc fondamentaux pour un modèle climatique, et leur modélisation est la première préoccupation des climatologues. (DUFRESNE et al., 2006)

Pour pouvoir assurer cette cohérence énergétique, les modèles climatiques prennent en compte, avec des degrés d'approximation divers, l'ensemble des milieux intervenant dans le cycle énergétique et le cycle de l'eau (atmosphère, surface continentale, océan, glace de mer, glaciers et calotte polaire) ainsi que les échanges entre ces milieux (échange de chaleur, évaporation, précipitations, écoulement par les rivières, fonte des glaciers...). (DUFRESNE et al., 2006)

4.3. Projet d'intercomparaison de modèles couplés Phase 5 (CMIP5)

Lors d'une réunion de septembre 2008 impliquant 20 groupes de modélisation du climat du monde entier, le Groupe de travail sur la modélisation couplée (WGCM) du PMRC, avec la contribution du projet IGBP AIMES, a convenu de promouvoir un nouvel ensemble d'expériences coordonnées sur les modèles climatiques. Ces expériences constituent la cinquième phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5).

Le CMIP5 fournira notamment un contexte multimodèle pour :

- Évaluer les mécanismes responsables des différences de modèles dans les rétroactions mal comprises associées au cycle du carbone et aux nuages,
- Examiner la « prévisibilité » du climat et explorer la capacité des modèles à prédire le climat sur la décennie échelles de temps, et, plus généralement,

- Déterminer pourquoi les modèles forcés de la même manière produisent une gamme de réponses.

Il est prévu que certaines des questions scientifiques soulevées lors de la préparation du quatrième rapport d'évaluation (RE4) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) seront traitées par le CMIP5 à temps pour évaluation dans le cinquième rapport d'évaluation (RE5, dont la publication est prévue dans fin 2013). Le calendrier GIEC / CMIP5 (PDF) est maintenant disponible et les trois dates clés sont les suivantes :

- Février 2011 : la première sortie du modèle devrait être disponible pour analyse,
- 31 juillet 2012 : À cette date, les articles doivent être soumis pour publication pour être éligibles à l'évaluation par le WG1,
- 15 mars 2013 : À cette date, les articles cités par le WG1 doivent être publiés ou acceptés.

Le CMIP5 est censé fournir un cadre pour des expériences coordonnées sur le changement climatique pour les cinq prochaines années et comprend donc des simulations pour l'évaluation dans le RA5 ainsi que d'autres qui s'étendent au-delà du RE5. Cependant, CMIP5 ne se veut pas exhaustif ; il ne peut pas inclure toutes les différentes activités d'intercomparaison de modèles qui pourraient être utiles, et on s'attend à ce que divers groupes et parties intéressées développent des expériences supplémentaires qui pourraient s'appuyer sur et augmenter les expériences décrites ici.

CMIP5 promeut un ensemble standard de simulations de modèles afin de :

- Évaluer le degré de réalisme des modèles en simulant le passé récent
- Fournir des projections du changement climatique futur sur deux échelles de temps, à court terme (jusqu'en 2035 environ) et à long terme (jusqu'en 2100 et au-delà)
- Et de comprendre certains des facteurs responsables des différences dans les projections des modèles, y compris la quantification de certaines rétroactions clés telles que celles impliquant les nuages et le cycle du carbone

La conception de l'expérience CMIP5 (CMIP Phase 5) a été finalisée avec les suites d'expériences suivantes :

- Simulations Décennales Hindcasts et Prédictions,
- Simulations « à long terme »,
- Simulations « atmosphère seule » (SST prescrite) pour les modèles particulièrement exigeants en termes de calcul.

Chapitre II : Les changements climatiques à l'échelle du monde

1. Introduction

Cette partie aborde plusieurs des principaux changements du climat observés depuis la révolution industrielle, en ce qui concerne la température à la surface, les niveaux de précipitations, le réchauffement et l'acidification des océans, l'élévation du niveau des mers, l'étendue des mers de glace de l'Arctique, ainsi que les changements observés au sein de systèmes physiques et biologiques. Elle se termine par des explications sur le possible lien de cause à effet entre les changements climatiques de nature anthropique et les récents phénomènes climatiques extrêmes (comme les cyclones et les inondations).

2. Les changements climatiques observés à l'échelle du monde

2.1. Anomalies observées des températures en surface (1850-2012)

Au cours des trois dernières décennies, la température à la surface du globe a régulièrement augmenté, comme jamais cela n'avait été le cas depuis 1850.

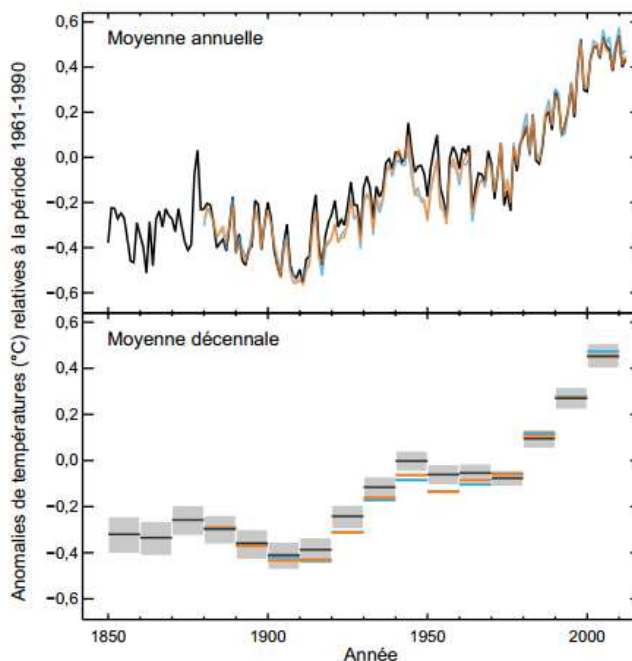


Figure 27: Anomalies observées des températures moyennes en surface, combinant les terres émergées et les océans (Source : GIEC 2013, p.6)

La figure (27) illustre les changements de la température moyenne à la surface des terres et des océans entre 1850 et 2012. La moyenne de la température annuelle a toujours connu des variations, alternant des périodes froides avec des périodes chaudes. Cependant, il apparaît clairement qu'au cours des trois dernières décennies, la surface de la Terre s'est réchauffée comme cela n'avait jamais été le cas au cours des décennies précédentes depuis 1850.

La hausse de la température est mondiale, bien qu'il y ait des variations importantes selon les régions. Les régions polaires septentrionales sont les plus touchées par le réchauffement. (GIEC, 2013b)

2.2. Changements observés concernant les précipitations annuelles sur les terres émergées

Les observations montrent que les changements affectent la quantité, l'intensité, la fréquence et le type de précipitations. On relève dans les caractéristiques de ces dernières une variation naturelle importante ; les fluctuations climatiques, telles que El Niño, entraînent des effets considérables. Cependant, au cours du siècle dernier, l'observation de la quantité de précipitations montre une évolution prononcée sur le long-terme : les régions de l'Amérique du nord-est et du sud, de l'Europe du nord et de l'Asie centrale et du nord sont devenues beaucoup plus humides, alors que celles du Sahel, de l'Afrique subsaharienne, de la Méditerranée et de l'Asie du sud sont devenues beaucoup plus sèches. De plus, une augmentation des phénomènes météorologiques marqués par de fortes précipitations a été observée, même dans les régions où la quantité totale de précipitations a diminué. Les deux cartes montrent les changements observés en termes de précipitations entre 1901 et 2010, et 1951 et 2010. (GIEC , 2013)

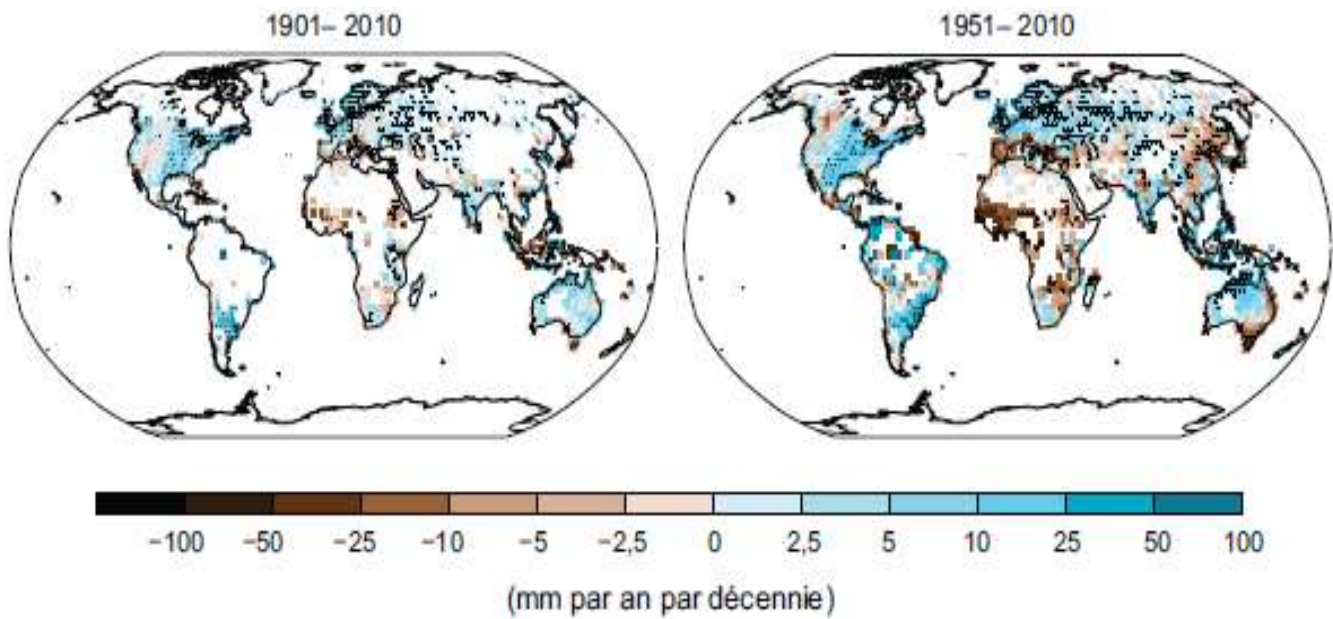


Figure 28: Changements observés concernant les précipitations annuelles sur les terres émergées

2.3. Le réchauffement observe des océans (1950-2010)

Le réchauffement des océans constitue le phénomène majeur qui découle de l'augmentation de l'énergie emmagasinée dans le système climatique. Les océans comptent plus de 90 % de l'énergie accumulée entre 1971 et 2010. 60 % de la hausse nette de l'énergie sont emmagasinés dans la couche supérieure des océans (entre 0 et 700 m de profondeur) et environ 30 % le sont dans la couche inférieure (plus de 700 m de profondeur). Par rapport au réchauffement observé à la surface, celui des océans est le plus important : entre 0 et 75 m de profondeur, la température a augmenté tous les dix ans de 0,11°C sur la période de 1971 à 2010.(Dufour, 2010)

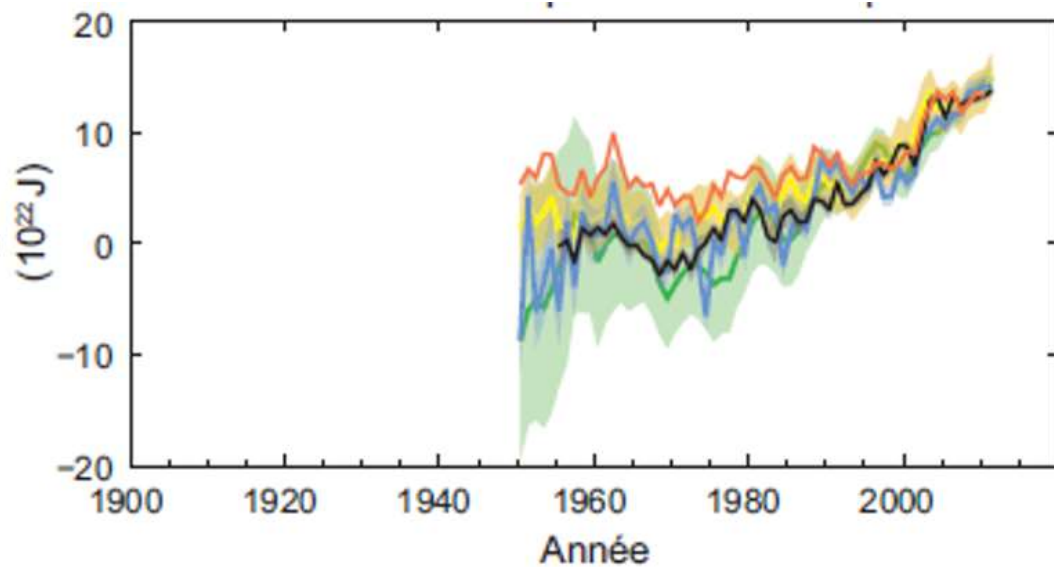


Figure 29: Evolution de la moyenne globale du contenu thermique de l'océan superficielle

La figure (28) montre plus de 60 % de la hausse énergétique nette au sein du système climatique est emmagasinée dans la couche supérieure de l'océan (période 1971-2010).

2.4. Acidification observée des océans

Les océans ont absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de CO₂, ce qui a entraîné leur acidification. La courbe en vert du graphique montre que le pH des eaux de surface baisse depuis la fin des années 1980. Selon le GIEC, le pH des eaux de surface a diminué de 0,1 depuis le début de l'ère industrielle. (Gérin et al., 2003)

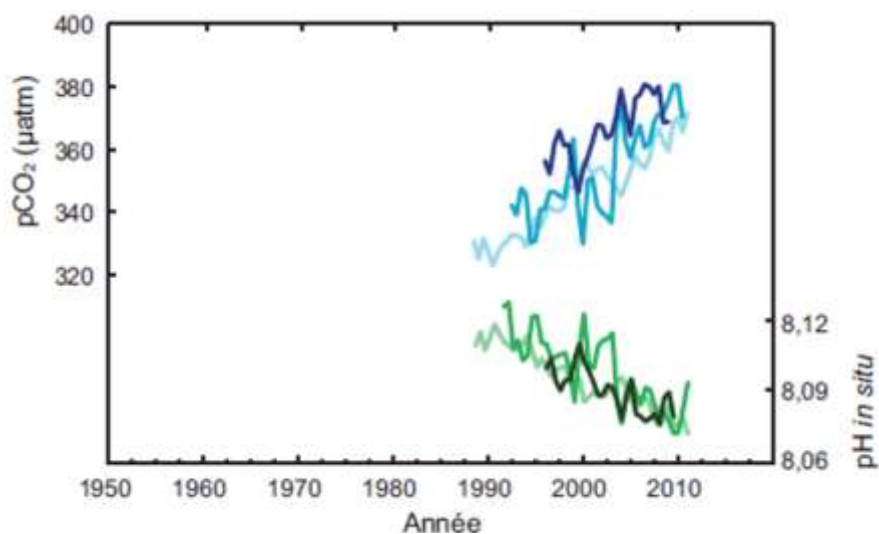


Figure 30: CO₂ et pH a la surface de l'océan (Source : GIEC 2013, p.10)

2.5. Elévation observée du niveau des mers (de 1900 à 2010)

Le taux d'élévation du niveau des mers depuis la moitié du XIXe siècle a dépassé le taux moyen des deux derniers millénaires. Au cours du siècle dernier, le niveau moyen des mers à l'échelle mondiale a augmenté de 0,19 m. La fonte des glaciers et la hausse de température des océans dus au réchauffement sont responsables de 75 % du taux moyen d'élévation du niveau des mers depuis le début des années 1970.

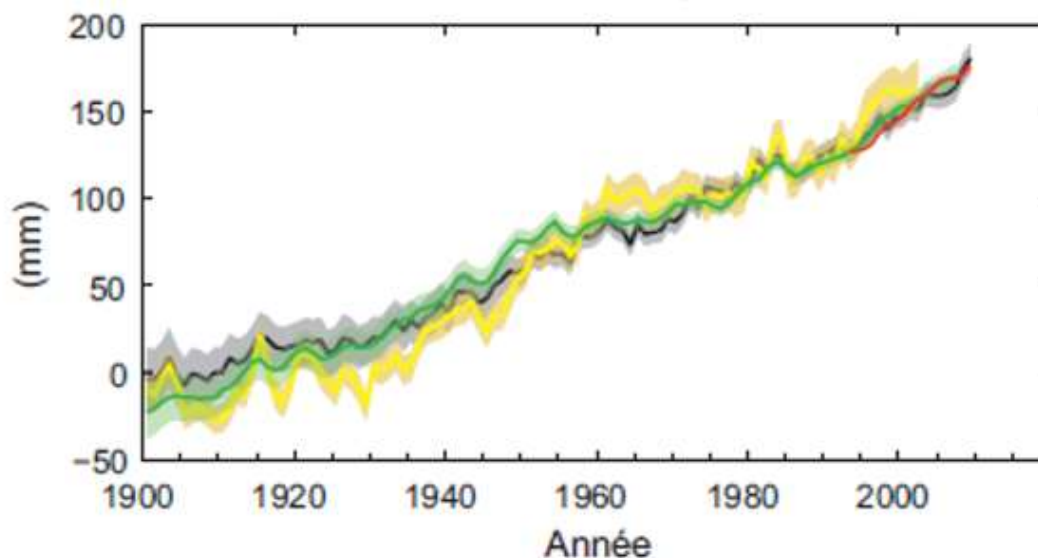


Figure 31: Evolution du niveau moyen des mers

La figure (30) montre qu'entre 1901 et 2010, le niveau moyen des mers à l'échelle mondiale a augmenté de 0,19 m.

2.6. Observation du recul des glaces dans les mers de l'Arctique (1900-2010)

Ces vingt dernières années, les nappes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique ont perdu de leur masse, presque tous les glaciers du monde se sont réduits et les mers de glace de l'Arctique ont continué de diminuer. Le graphique illustre la baisse en été de l'étendue des mers de l'Arctique entre 1900 et 2010. Leur superficie a diminué chaque saison depuis 1979.

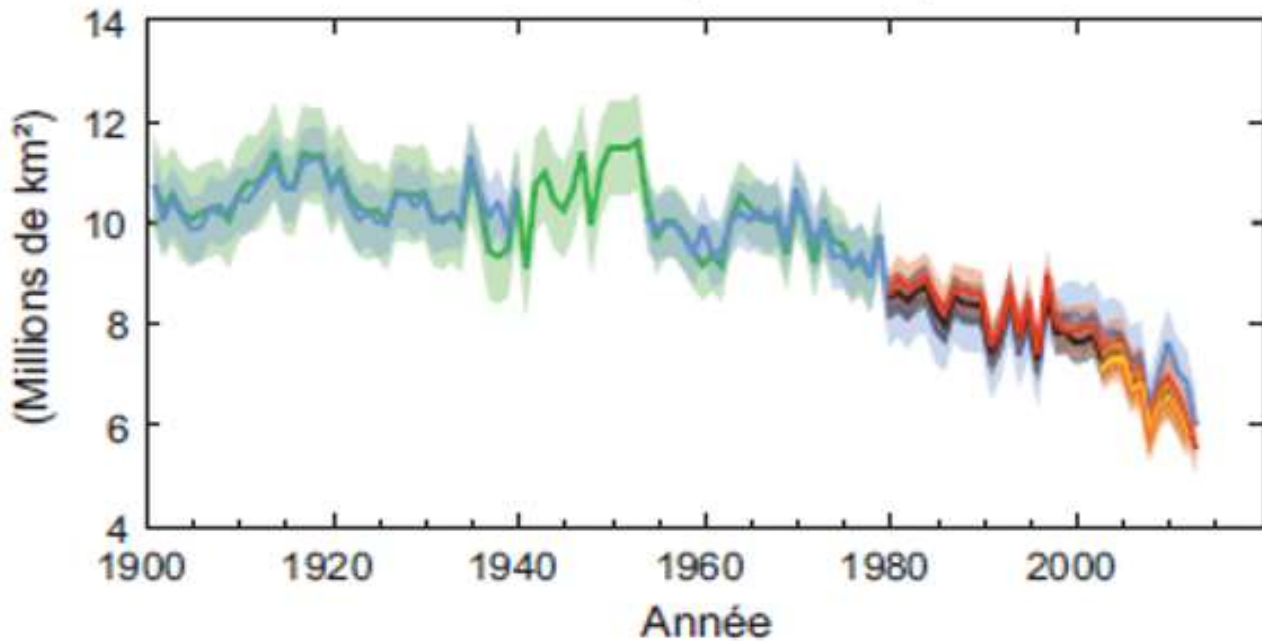


Figure 32: Etendu de la banquise arctique en été

2.7. Changements observés dans les systèmes physiques et biologiques

La figure (32) montre un certain nombre de changements observés au sein des systèmes physiques (en bleu), biologiques (en vert) et humains (en rouge), changements qui peuvent être attribués au climat avec plus ou moins de certitude. Par exemple, les changements biologiques concernent la disparition d'espèces et la détérioration d'écosystèmes, tandis que les changements physiques peuvent se traduire par une modification du manteau neigeux, ainsi que de la densité, de l'étendue et de la fonte des glaciers.

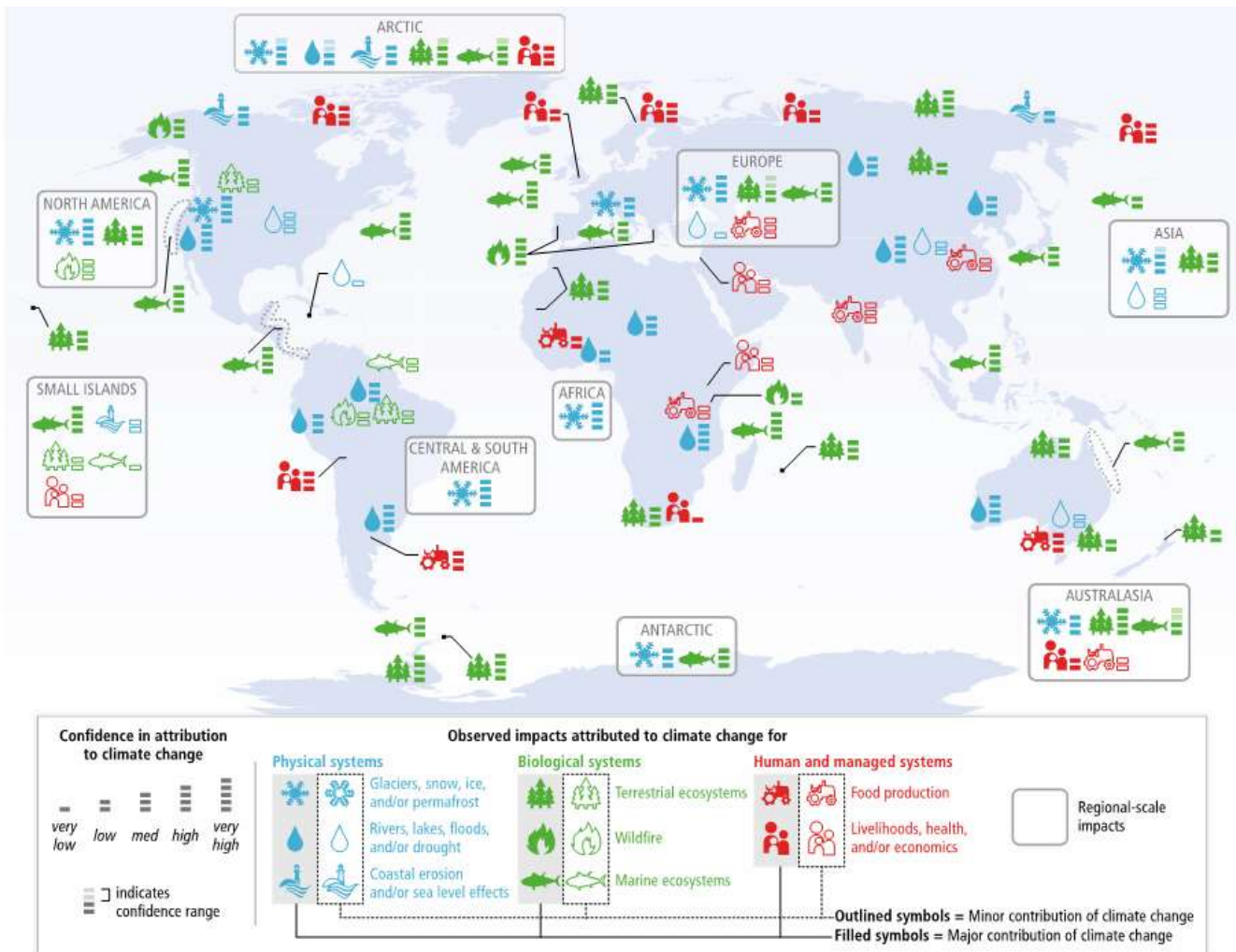


Figure 33 : Changements observés dans les systèmes physiques et biologiques

3. Evolutions projetées et conséquences des changements climatiques

3.1. Profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP)

Pour le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, la communauté scientifique a défini une série de quatre scénarios, dénommés Profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP). Ces quatre RCP comprennent un scénario d'atténuation conduisant à un effet de très faible niveau (RCP 2,6), deux profils de stabilisation (RCP 4,5 et RCP 6,0) et un profil avec des émissions de gaz à effet de serre très élevées (RCP 8,5). Les RCP peuvent ainsi représenter une diversité de politiques climatiques du XXI^e siècle, contrairement au manque de politique

climatique inhérent du Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES) utilisé dans les Troisième et Quatrième Rapports d'évaluation.

- Ensemble de quatre scénarios établis par la communauté scientifique pour le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC.
- Les RCP comprennent :
 - Un scénario d'atténuation conduisant à un niveau de forçage très faible (RCP2,6),
 - Deux scénarios de stabilisation (RCP4,5 et RCP6),
 - Un scénario comportant des émissions de gaz à effet de serre très élevées (RCP8,5)
- Les RCP représentent diverses politiques climatiques du XXI^e siècle.

3.2. Changement projeté de la température moyenne à la surface

Selon les scénarios RCP, excepté le RCP 2,6, le changement de température à la surface du globe d'ici la fin du XXI^e siècle dépassera probablement 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels.

La température augmenterait de 2°C dans les RCP 6,0 et 8,5. Depuis le Troisième Rapport d'évaluation du GIEC, il est de plus en plus certain qu'une hausse de la température à la surface du globe comprise entre 1,5°C et 2,5°C par rapport aux niveaux préindustriels entraînerait des risques considérables pour de nombreux systèmes singuliers menacés, en particulier de nombreux points chauds de la biodiversité.

Si le réchauffement planétaire dépassait cette fourchette, c'est environ 20 à 30 % des espèces qui seraient menacées d'extinction. En termes de sécurité alimentaire et de santé, les récoltes de céréales à basse altitude diminueraient et la répartition de certains vecteurs de maladie (comme les moustiques qui transmettent le paludisme) pourraient changer.

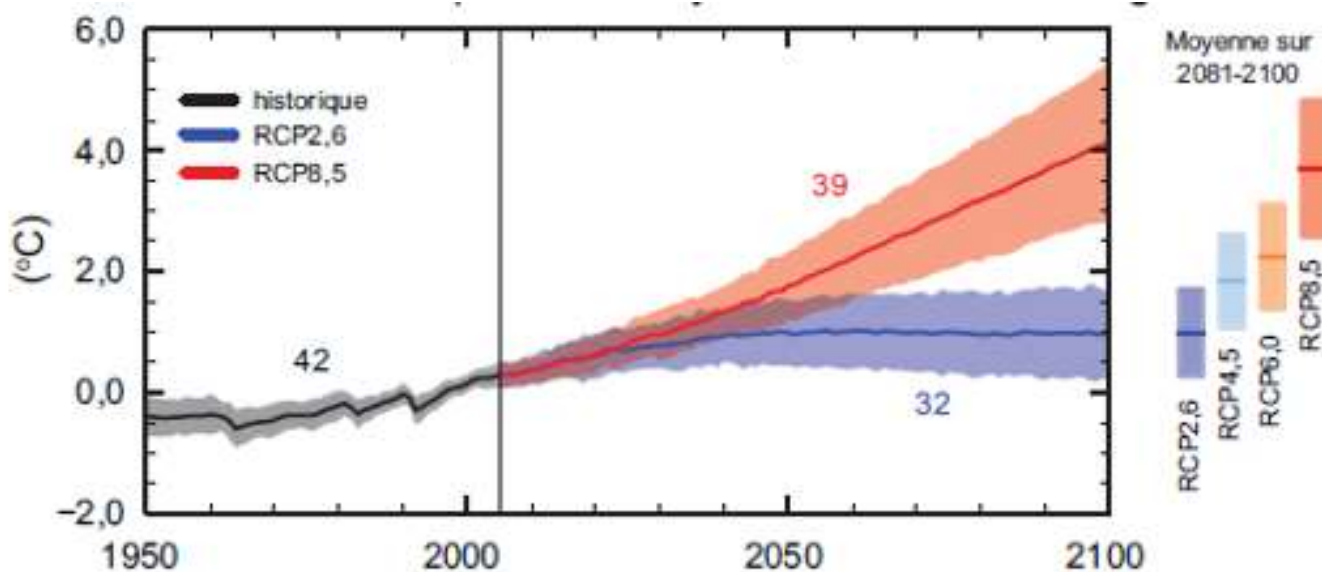


Figure 34: Evolution de la température moyenne à la surface du globe

Le changement de température à la surface du globe d'ici la fin du XXI^e siècle devrait atteindre les 4°C si aucune mesure n'est prise. (Figure 34)

3.3. Changement projeté concernant les précipitations moyennes

Le GIEC prévoit pour la fin du XXI^e siècle une augmentation des écarts relatifs aux précipitations entre les régions humides et les régions arides, ainsi qu'entre les saisons humides et les saisons sèches. Cela signifie que le réchauffement planétaire augmente aussi bien les risques de sécheresse que ceux d'inondations. Il est très probable que les phénomènes climatiques extrêmes soient plus violents et plus fréquents surtout dans les régions de moyennes latitudes et les régions tropicales humides.

Dans la figure (35) les deux cartes illustrent les changements projetés qui concernent les précipitations moyennes annuelles à la fin du XXI^e siècle selon différents scénarios. Dans un scénario où les émissions sont faibles (RCP 2,6 – carte de gauche), ces changements ne devraient pas augmenter de plus de 20 % par rapport aux niveaux de 1986-2005. Cependant, le scénario 8,5 (carte de droite) prévoit d'importants changements concernant les précipitations moyennes annuelles. Celles-ci s'accroîtront sous les hautes latitudes et dans l'océan Pacifique équatorial, tandis qu'elles diminueront dans de nombreuses régions de latitudes moyennes et subtropicales arides.

Les changements climatiques peuvent avoir plusieurs effets directs sur les quantités de précipitations, leur intensité, leur fréquence et leur type. Le réchauffement accélère l'assèchement des terres et accroît l'incidence et la gravité potentielles des sécheresses, phénomènes observés sur de nombreux points du globe. Cependant, une équation physique bien établie (la relation de Clausius-Clapeyron) détermine que la capacité de rétention d'eau de l'atmosphère augmente d'environ 7 % pour chaque hausse de température de 1 °C. Du fait que les précipitations proviennent principalement des systèmes météorologiques qui alimentent la vapeur d'eau emmagasinée dans l'atmosphère, ce phénomène a de manière générale augmenté l'intensité des précipitations et les risques de pluies violentes et d'épisodes neigeux.

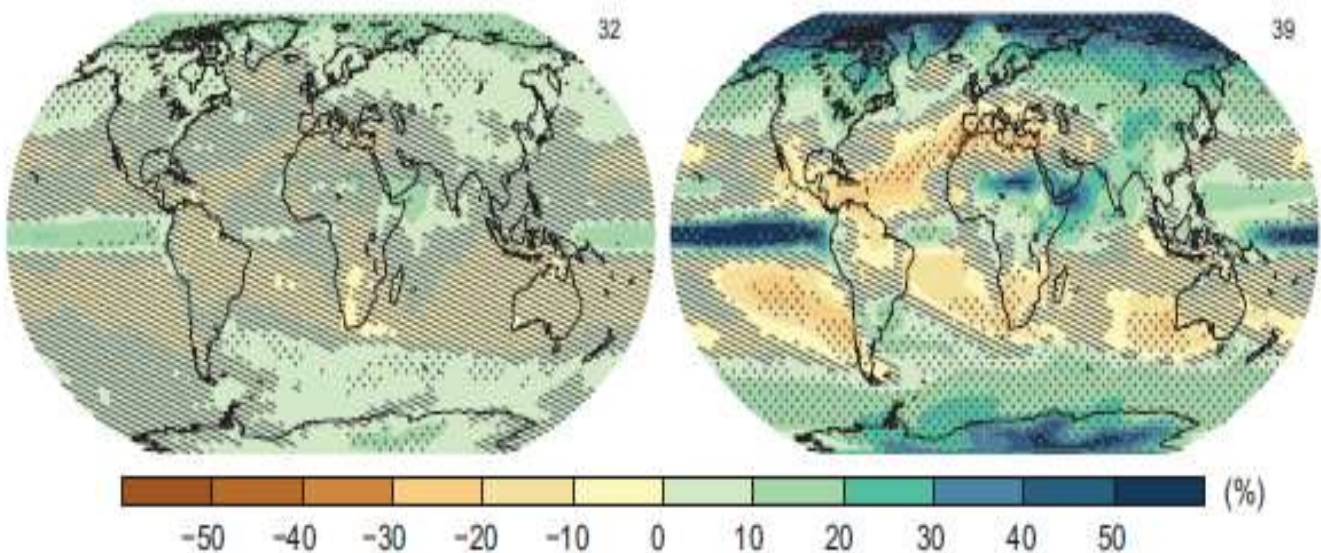


Figure 35: Changement projeté concernant les précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100

3.4. Changement projeté du pH de la surface des océans

Actuellement, le pH moyen de la surface des océans est d'environ 8,1. En raison de l'accroissement des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, les projections envisagent une acidification progressive des océans tout au long du siècle.

Dans un scénario fondé sur de faibles émissions (RCP 2,6 – carte de gauche), l'acidification des océans serait relativement limitée. Par contre, dans le scénario 8,5 (carte de droite), il faudrait s'attendre à une baisse du pH moyen de la surface des océans comprise entre

0,30 et 0,32 unités. Cette acidification progressive devrait nuire aux créatures marines qui forment des coquilles, comme le corail, ainsi qu'aux espèces qui en dépendent. (figure 36)

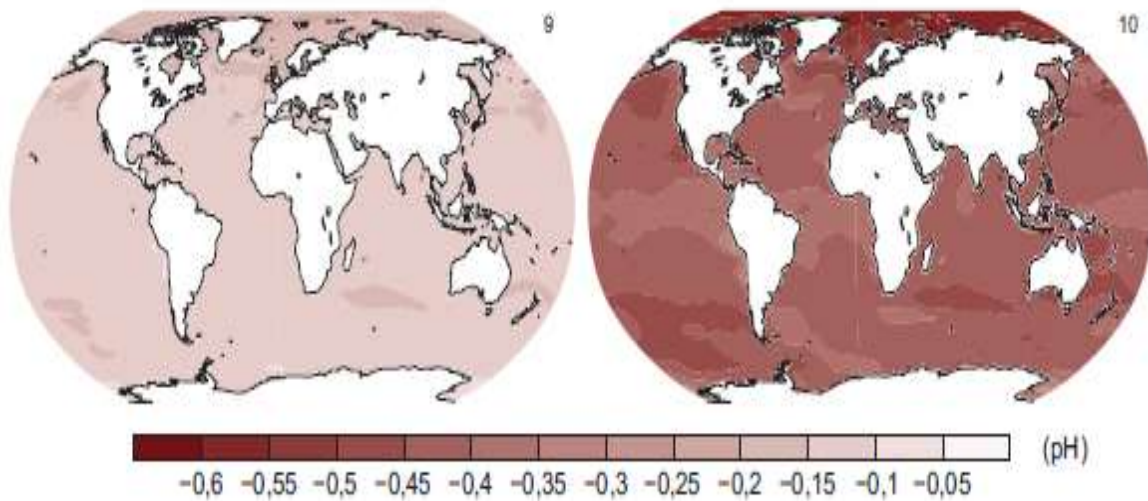


Figure 36: Changement projeté du pH de la surface des océans entre 1986-2005 et 2081-2100

3.5. Elévation projetée du niveau des mers

L'augmentation du niveau moyen des mers va continuer au cours du XXI^e siècle (voir graphique figure 37). Selon les scénarios, elle est comprise entre 0,26 m et 0,98 m. Dans tous les scénarios, le niveau des mers dépassera celui observé entre 1971 et 2010 du fait du réchauffement accru des océans et de la perte de masse en augmentation des glaciers et des nappes glaciaires.

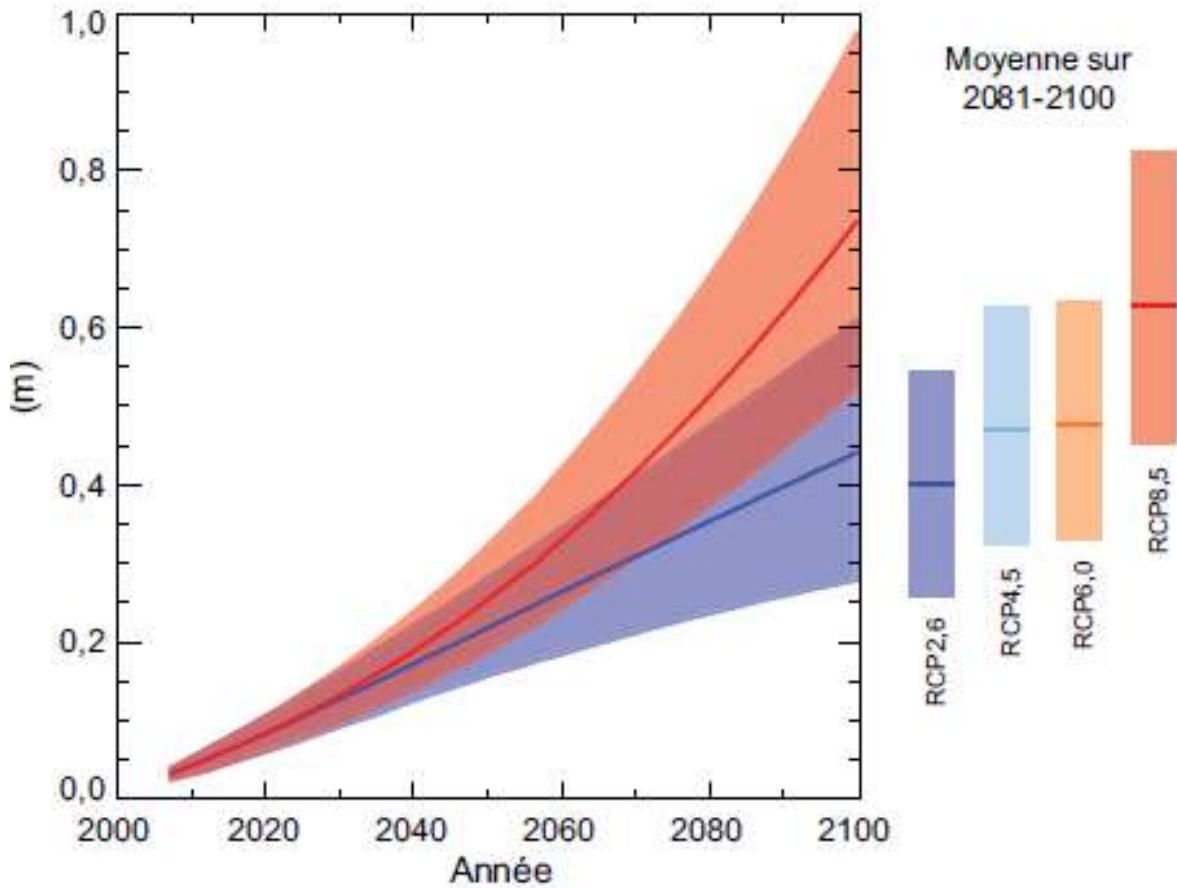


Figure 37 : L'élévation moyenne du niveau des mers au long du XXIe siècle.

3.6. Etendue de la banquise dans l'hémisphère Nord en septembre

Au cours du XXIe siècle, l'étendue et l'épaisseur de la banquise arctique vont continuer de diminuer, tandis que la température moyenne à la surface du globe va augmenter. D'après le scénario RCP 8,5, il est probable que la banquise de l'océan Arctique ait disparu au mois de septembre d'ici la moitié du siècle. (figure 38)

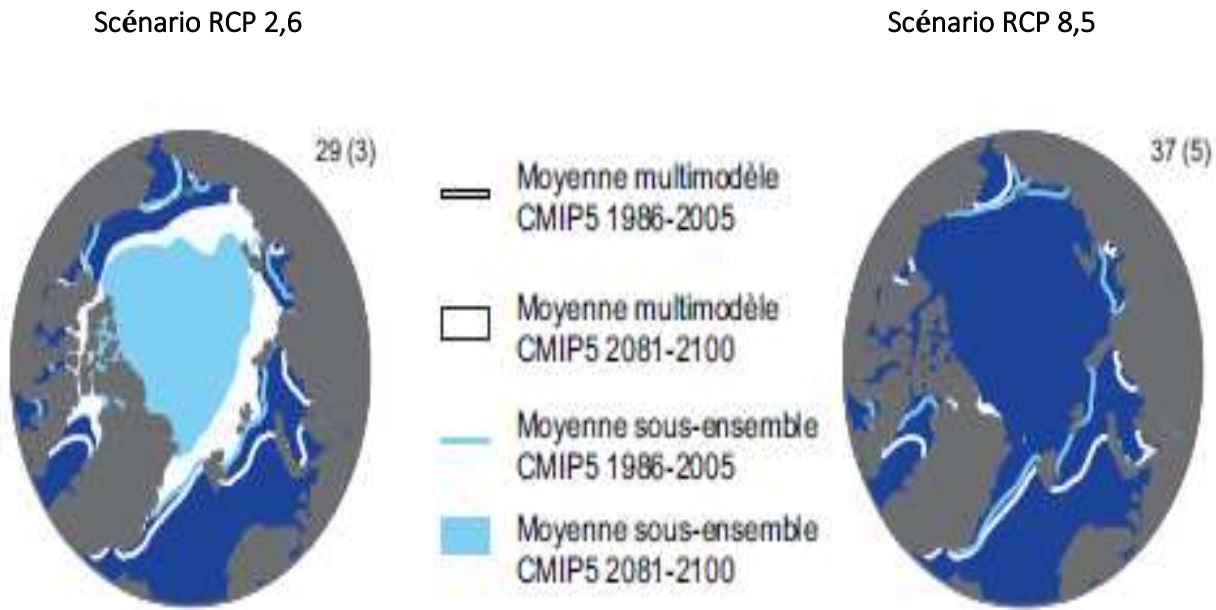


Figure 38: Etendue de la banquise dans l'hémisphère Nord en septembre Moyennes pour 2081-2100

3.7. Effets projetés des changements climatiques en Afrique

L'Afrique est l'un des continents les plus vulnérables aux changements climatiques. La majorité de sa superficie connaîtra une baisse de précipitations, seule la région du centre-est connaîtra une hausse de précipitations. D'ici 2080, plusieurs scénarios prévoient une augmentation comprise entre 5 et 8 % des terres arides ou semi-arides. D'ici 2020, 75 à 250 millions de personnes seront exposées à un stress hydrique accentué par les changements climatiques. Il est probable que la production agricole, et notamment l'accès à la nourriture, soit durement touchée. Dans certains pays, les terrains agricoles alimentés en eau de pluie pourraient être réduits jusqu'à 50 %. L'élévation du niveau des mers touchera certaines grandes villes situées en zone côtière, telles qu'Alexandrie, Le Caire, Lomé, Cotonou, Lagos et Massawa.(figure 39)

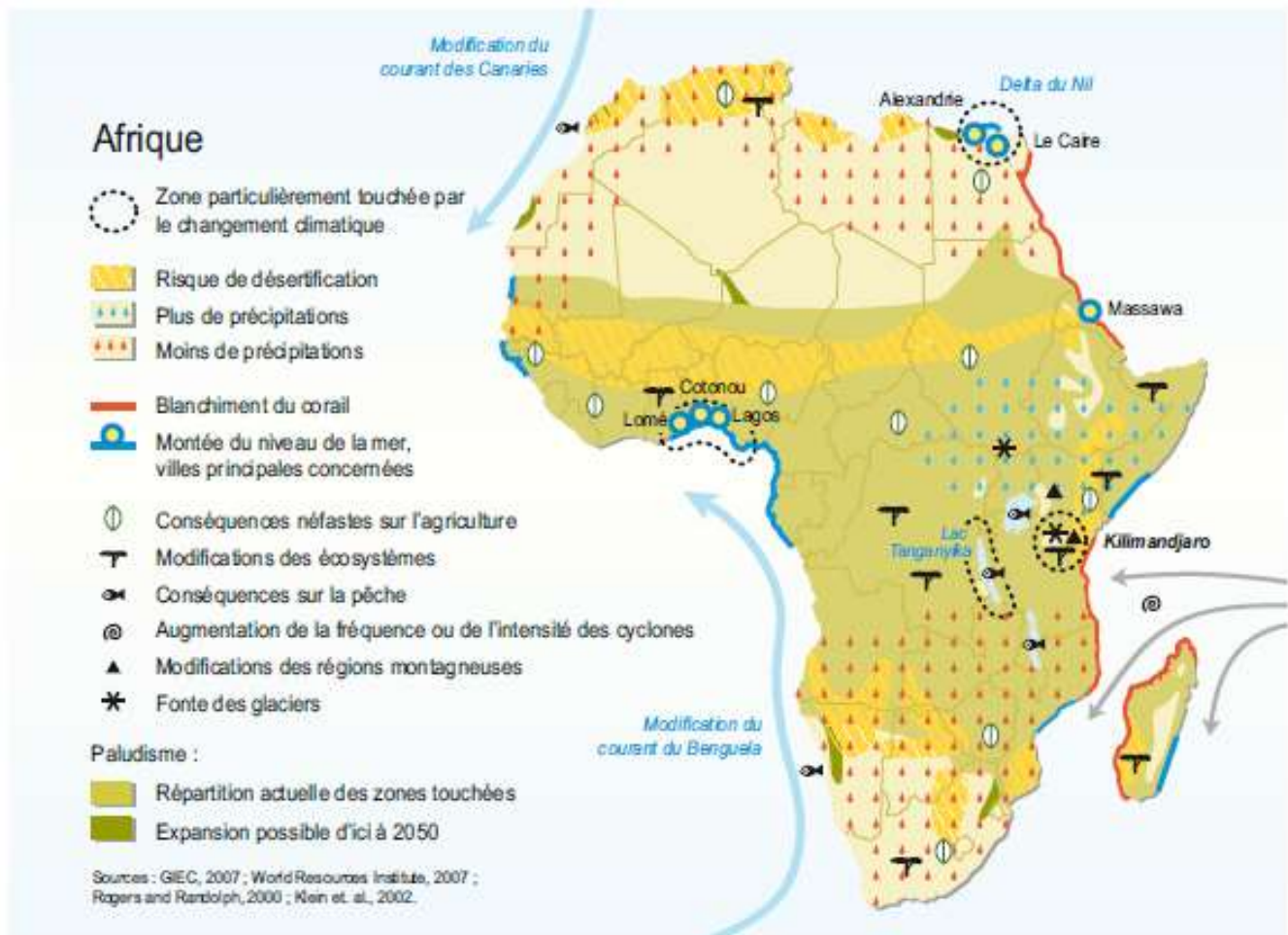


Figure 39 : Effets projetés des changements climatiques en Afrique

3.8. Effets projetés des changements climatiques sur les petites îles

De nombreuses petites îles, notamment dans les Caraïbes et le Pacifique, verront leurs réserves en eau douce diminuées à un point tel qu'elles ne seront plus suffisantes pour répondre à la demande pendant les périodes de faibles précipitations. L'élévation du niveau des mers entraînera une infiltration d'eau salée dans les sources d'eau douce, ce qui les rendra impropres à la consommation. Elle augmentera aussi considérablement les inondations, la violence des orages, l'érosion et d'autres risques côtiers ; elle menacera ainsi les infrastructures indispensables, les implantations et les équipements qui assurent les moyens d'existence des communautés insulaires. La détérioration des conditions côtières et le blanchiment du corail réduiront la valeur de ces destinations touristiques.

- L'élévation du niveau des mers accroît les inondations, la violence des orages et autres dangers côtiers
- Ressources en eau douce diminuées
- Invasion d'espèces allogènes
- Conséquences sur la sûreté alimentaire et économique

3.9. Réchauffement planétaire d'ici 2100 et au-delà : une fonction des émissions de CO₂ cumulés

La figure (40) illustre la relation linéaire existant entre les émissions de CO₂ anthropiques cumulées (axe horizontal) et les hausses de température moyenne à la surface du globe (axe vertical). En d'autres termes, une augmentation des émissions de CO₂ entraîne une température moyenne plus élevée à la surface. Comme nous ne pouvons pas prévoir exactement la quantité de dioxyde de carbone que nous émettrons dans l'avenir, il existe différents scénarios envisageant les températures qu'il fera à la fin du siècle. Ces scénarios estiment la hausse de la température entre 2°C (courbe en bleu – RCP 2,6) et près de 5°C (courbe en rouge – RCP 8,5). Afin d'avoir plus de deux chances sur trois de conserver des températures globales inférieures à 2°C (et donc d'éviter des « changements climatiques dangereux »), les émissions de CO₂ cumulées ne doivent pas dépasser les 1 000 Gigatonnes de carbone (GtC). Cependant, plus de la moitié de cette quantité a été atteinte à partir de 2011, soit plus de 500 GtC qui ont déjà été rejetées.

L'axe horizontal en bas du graphique indique les émissions cumulées en gigatonnes de carbone (GtC), tandis que celui du haut indique les niveaux d'émissions en gigatonnes de dioxyde de carbone (GtCO₂). 1 GtC correspond à 3,667 GtCO₂.

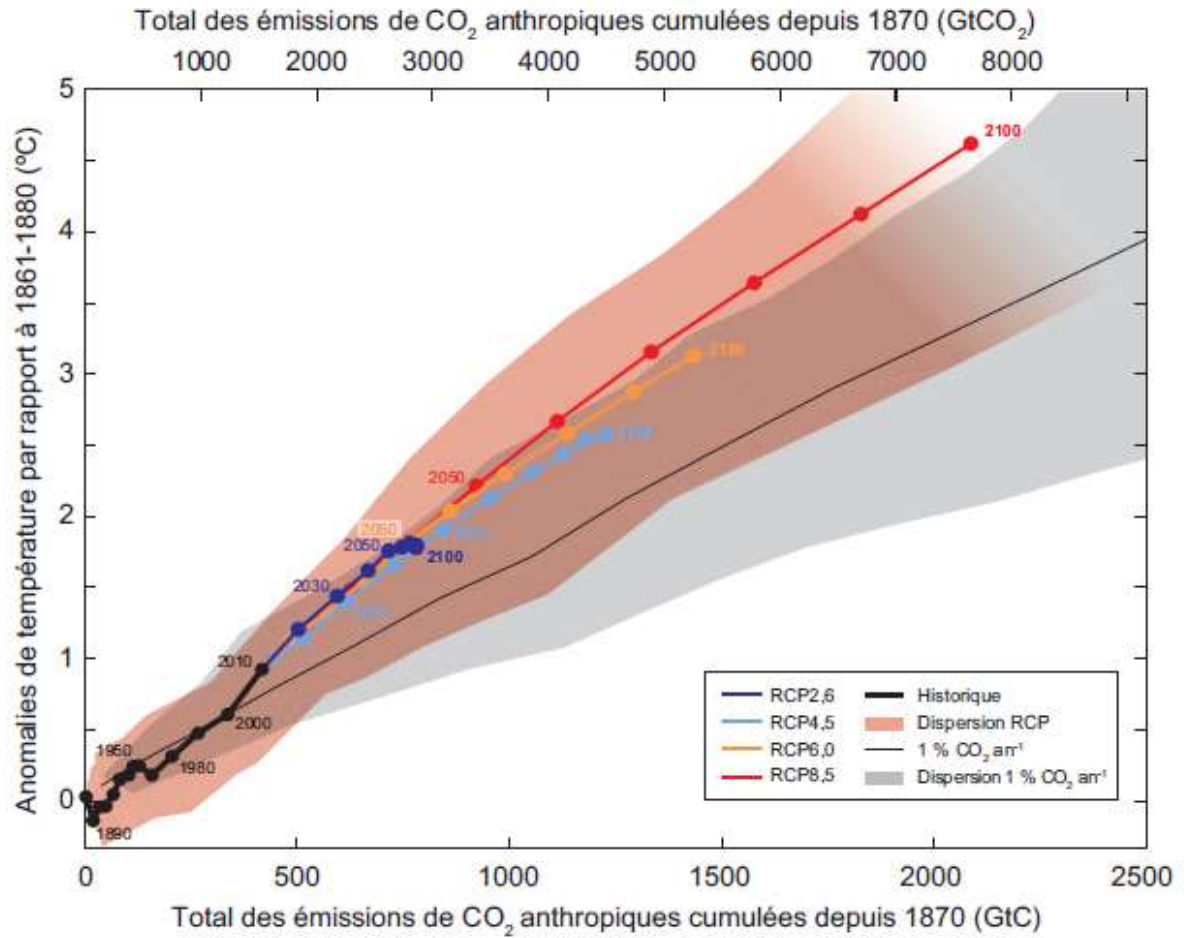


Figure 40: les émissions de CO₂ anthropiques cumulées et les hausses de température moyenne à la surface du globe

Chapitre III : les changements climatiques au Maroc

1. Introduction

Les changements climatiques se sont imposés progressivement depuis la conférence tenue à Rio en 1992 où les différents pays de la planète avaient reconnu ce danger. Dans la convention cadre des nations unies sur le climat, lancée lors de cette conférence ces pays s'étaient engagés à faire face à ce changement climatique à travers l'atténuation des émissions en GES et aussi une adaptation des politiques et programmes de développement en vue d'en limiter les impacts négatifs pouvant résulter du réchauffement climatique.

Plus de vingt années après, le changement du climat se confirme avec des impacts notables notamment sur le cycle de l'eau. Cela se retrouve en particulier autour de la méditerranée et en Afrique où ce réchauffement est important et où l'impact sur les ressources en eau accentue et accélère le déficit offre-demande qu'un grand nombre de pays de la région allait connaître logiquement avec la forte croissance de la demande et les pressions de toutes sortes auxquelles les ressources de ces pays ont été soumises ces dernières décennies.

Au Maroc, la tendance au réchauffement du climat s'est confirmée avec aussi une irrégularité interannuelle des précipitations qui s'est installée depuis les années 70, où on remarque plus d'événements extrêmes et un dérèglement du cycle saisonnier.

Pour faire face à cette situation et son impact sur le secteur de l'eau au Maroc, des efforts louables ont été consentis avec en particulier une politique de barrages renforcée, une planification de la gestion des eaux structurée et organisée et aussi des mesures et des actions adaptatives mais qui ont été plus réactives qu'anticipatives.

2. La géographie du Maroc

Le Royaume du Maroc se caractérise par un emplacement géographique exposé, qui présente à la fois de vastes opportunités et de nombreux risques et défis dans la lutte contre le changement climatique. Situé à l'angle nord-ouest du continent africain, il est séparé de l'Espagne par le Détroit de Gibraltar par une bande de la Méditerranée de seulement 15 km de large. Son territoire couvre 710 850 km². (PDAIRE, 2010)

Sa côte occidentale donne sur l'océan Atlantique tandis que la Méditerranée borde sa côté nord. Les côtes du pays constituent l'un des principaux atouts.

Grâce à sa grande extension en latitude, il bénéficie d'une importante façade sur l'océan Atlantique (2 934 km), à laquelle s'ajoutent, au Nord, 512 km de côtes sur la mer Méditerranée. Cette situation lui confère une position géographique et stratégique de premier ordre. Le Maroc est bordé à l'est par l'Algérie et au sud par la Mauritanie. Le pays bénéficie d'une remarquable diversité de reliefs qui fait rencontrer sommets enneigés et palmeraies, dunes sahariennes et vertes prairies, zones côtières, etc. La figure 41 présente les principales unités géographiques du Maroc.

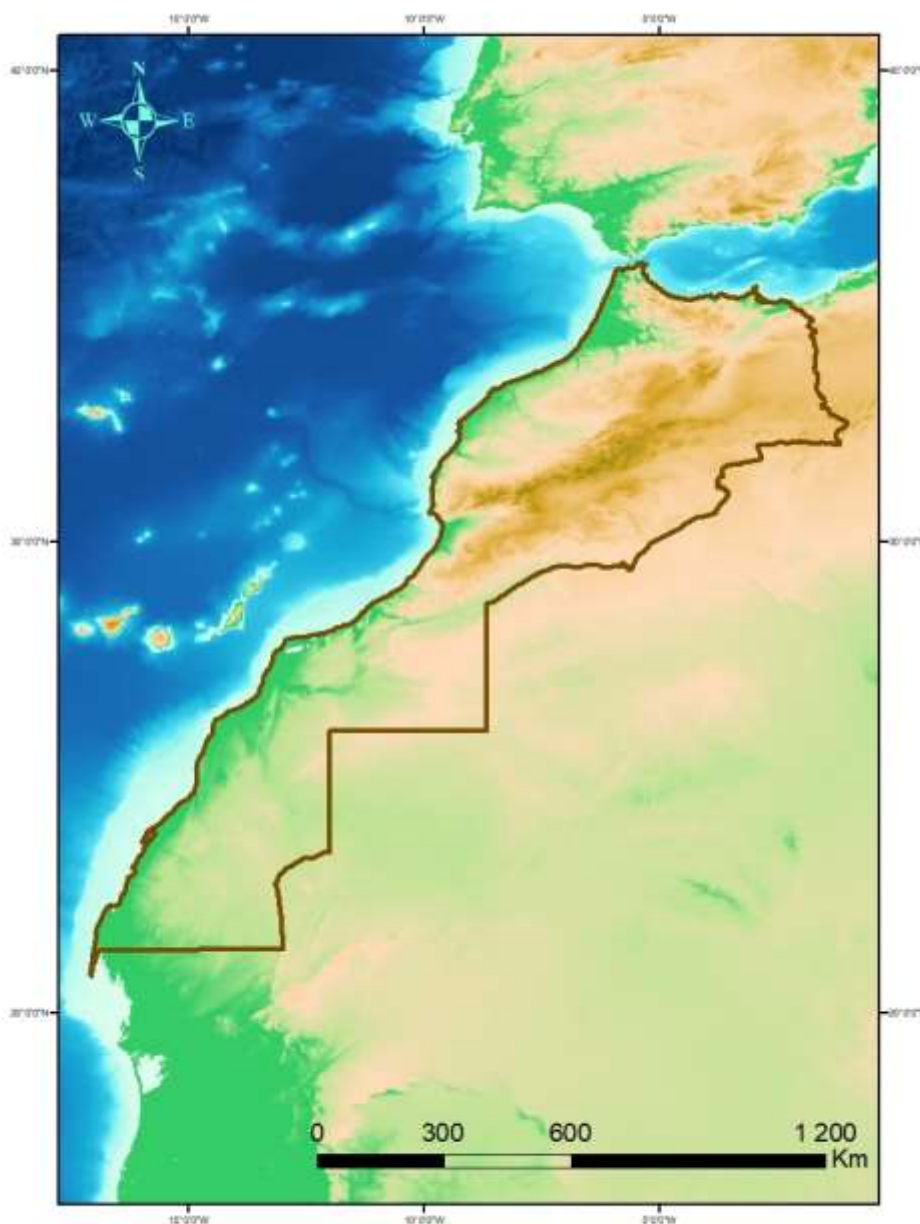


Figure 41: La situation géographique du Maroc

3. Le climat du Maroc

Le climat du Maroc est un élément important de la vie du territoire car il conditionne le comportement et les décisions des individus et des groupes sociaux comme celui de l'ensemble des espèces vivantes et des écosystèmes (Joly et al., 2010) . Partant des mesures stationnelles de précipitation et de température mises à disposition par **WorlClim**, une série temporelle de 30 ans (1970-2000) est défini pour caractériser les climats et leurs modalités distinctives de variation. Une méthode originale dite d'interpolation locale permet de reconstituer les champs spatiaux continus des variables en question et de les exprimer sous forme de couches d'information gérables par SIG. Ces données sont ensuite soumises à un traitement associant analyse factorielle des correspondances et classification selon l'indice d'aridité pour en obtenir une typologie où cinq climats sont identifiés et cartographiés sur le territoire Marocain.

3.1 Indice d'aridité

L'aridité est habituellement exprimée en fonction généralisée des précipitations, de la température et de l'évapotranspiration de référence (ET0). Un indice d'aridité peut être utilisé pour quantifier la disponibilité des précipitations par le biais de la demande atmosphérique en eau.(UNEP, 1997)

La cartographie de l'indice moyen aridité-humidité de la période 1970-2000 à 30' résolution spatiale est calculée comme suit :

$$\text{Indice d'aridité} = \text{MA-Pr} / \text{MA-ET0}$$

Où :

MA-Pr = Précipitations annuelles moyennes

MA-ET0 = Référence annuelle moyenne Evapo-Transpiration

Les valeurs moyennes des précipitations annuelles (MA-Pr) ont été obtenues à partir des données mondiales sur le climat (Fick & Hijmans, 2017), pour les années 1970-2000, tandis que les couches ET0 estimées sur une base moyenne mensuelle par le Global-ET0 (c.-à-d. modélisées à l'aide de la méthode PM-FAO, comme décrit dans annexe 1), ont été agrégés en valeurs annuelles moyennes (MA-ET0).

L'indice d'aridité montre la disponibilité de l'humidité pour la croissance potentielle de végétation de référence excluant l'impact des événements de ruissellement des eaux de médiation du sol. Le Programme des Nations unies pour l'environnement l'indice d'aridité, dans le schéma de classification traditionnel présenté dans le tableau 4.(UNEP ,1997)

Tableau 4:La classification de l'indice d'aridité (UNEP, 1997)

<i>Valeur de l'indice d'aridité</i>	<i>Classe climatique</i>
< 0,03	Hyper aride
0,03 - 0,2	Aride
0,2 - 0,5	Semi-Aride
0,5 - 0,65	Sous-humide sec
> 0,65	Humide

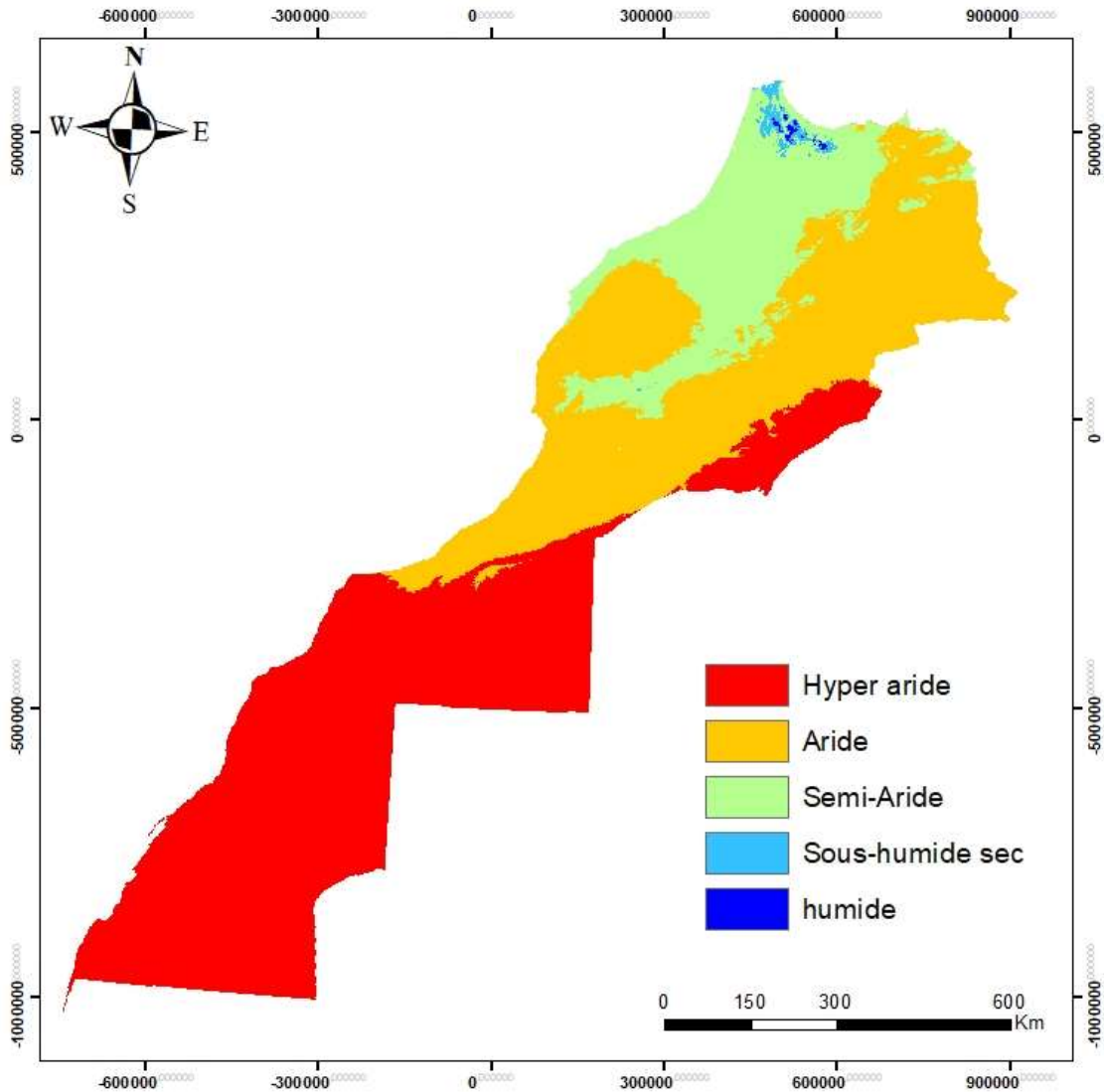


Figure 42: Climat du Maroc

Le Maroc se caractérise par un climat méditerranéen dans le nord et semi-aride ou aride dans le sud. S'étalant du nord-est au sud-ouest, les montagnes de l'Atlas assurent au Maroc d'importantes ressources en eau douce que le pays fortement tributaire de l'agriculture exploite notamment pour l'irrigation agricole.

Pour le climat, le Maroc (répétition) se trouve dans une zone géographique intermédiaire où siège une compétition entre les systèmes dépressionnaires tempérés et l'anticyclone subtropical des Açores qui conditionne l'occurrence d'événements météorologiques au Maroc. C'est une zone de transition entre les deux grands climats généraux que sont le climat tempéré d'une part et les climats désertiques ou tropicaux d'autre part.

En effet, le climat du Maroc est soumis aux influences méditerranéennes au Nord, océaniques à l'Ouest, continentales au centre, puis sahariennes à mesure que l'on descend vers le Sud-Est et le Sud. Répétition II est principalement caractérisé par un été chaud et sec où les précipitations sont quasiment absentes et l'évaporation particulièrement forte, et un hiver doux sur la bande littorale, froid à l'intérieur du pays, sur les chaînes de l'Atlas, du Rif

4. L'évolution des émissions nationales de GES (inventaire national des émissions/ absorptions)

Le Maroc a affiché des taux de croissance de l'ordre de 5% en moyenne au cours des 10 dernières années qui ont contribué à l'élimination de l'extrême pauvreté et à une réduction significative de la pauvreté. Ce taux de croissance provoque une évolution au niveau des émissions.

La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC ou Convention de Rio), adoptée en 1992 par le Maroc, a pour objectif de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Cette convention couvre l'ensemble des gaz à effet de serre non couverts par le protocole de Montréal à savoir les gaz à effet de serre direct (GES) :

- Dioxyde de carbone (CO₂),
- Protoxyde d'azote (N₂O),
- Méthane (CH₄),
- Hydrofluorocarbures (HFC)
- La vapeur d'eau
- perfluorocarbures (PFC),
- L'hexafluorure de soufre (SF₆)
- Le trifluorure d'azote (NF₃),

Ainsi que les gaz à effet de serre indirect, SO₂, NO_x, CO et COVNM.

Pour comptabiliser les émissions, l'IPCC définit trois « Tiers », autrement dit trois niveaux de complexité méthodologique. :

- Le Tier 1 est la méthode d'estimation la plus simple, basée sur la multiplication d'une donnée d'activité nationale et d'un facteur d'émissions par défaut fournit par l'IPCC.
- Le Tier 2 implique la recherche d'un facteur d'émission spécifique au territoire concerné
- Le Tier 3 fait souvent appel à des modèles et/ou sources de données complexes.

Au Maroc il y a un manque d'information pour un certain nombre de paramètres, donc des méthodes de Tier 1 ont été mises en œuvre pour la plupart des secteurs et des GES. Ces méthodes, pour toutes les catégories, sont conçues pour utiliser des statistiques nationales ou internationales aisément accessibles en combinaison avec les facteurs d'émission par défaut et d'autres paramètres fournis dans les directives du GIEC.

L'inventaire national des émissions/ absorptions marocaines de gaz à effet de serre pour les années 2010, 2012 et 2014, a été réalisé conformément aux lignes directrices du GIEC de 2006, et couvre les principaux gaz à effet de serre (GES) direct et indirect listés par ces lignes directrices, dépendamment des données disponibles.

Les émissions sont présentées en unités originales (milliers de tonnes ou Gigagrammes) pour tous les gaz directs et indirects, mais aussi exprimées en tonnes-équivalent CO₂ (t éq-CO₂), pour tous les gaz directs, moyennant la conversion de ces gaz directs selon leur pouvoir de réchauffement global (PRG). (MEMEE, 2019)

4.1. Le secteur Energie

Le module Energie représente le premier secteur émetteur des GES au Maroc avec une part variant entre 65% en 2010 et 66% en 2014. Le taux de croissance moyen annuel des émissions de ce secteur entre 2010 et 2014 est de 3,6. Les sous-secteurs énergétiques qui ont le plus contribué à ces croissances sont l'industrie de l'énergie, le transport et autres secteurs. Par type de gaz émis, l'évolution du CO₂ présente un taux de croissance moyen annuel de 3,6% pour la période 2010-2014. Celle du CH₄ montre un taux -0,6% sur la même période alors que

l'évolution du N₂O ressort avec un taux de croissance de 3,2% sur la même période.(Ministère Délégué Chargé de l'Environnement, 2016)

4.2. Le secteur Procédés Industriels participe

Le module Procédés Industriels participe dans les émissions globales de GES au Maroc avec une part de 8,2% en 2010 et 7,1% en 2014. Le taux de croissance moyen annuel des émissions de ce secteur entre 2010 et 2014 est de -0,6% Le seul type de gaz émis pour ce secteur est le CO₂ dont l'évolution présente un taux de croissance moyen annuel de -0,7% pour la période 2010-2014 dû essentiellement à la baisse de l'activité de production du ciment sur cette période.(Ministère Délégué Chargé de l'Environnement, 2016)

4.3. Le secteur Agriculture

Le module Agriculture représente le deuxième secteur émetteur des GES au Maroc avec une part de l'ordre de 25. Le taux de croissance moyen annuel des émissions de ce secteur entre 2010 et 2014 est de 2,2. Les sous-secteurs de ce module qui ont le plus contribué à ces croissances sont les sols agricoles et la fermentation entérique avec respectivement des taux de l'ordre de 45% chacun. Par type de gaz émis qui sont essentiellement le CH₄ et le N₂O, l'évolution du CH₄ présente un taux de croissance moyen annuel de 1,9% pour la période 2010-2014. Celle du N₂O montre un taux de 2,5% pour la même période.(Ministère Délégué Chargé de l'Environnement, 2016)

4.4. Le secteur UTCATF

Le module UTCATF contribue à absorber environ 3,5 à 4% des émissions globales de GES entre 2010 et 2014 et ce grâce à la mise en œuvre du plan Maroc vert et des plans décennaux du département des Eaux et Forêts notamment en matière de reforestation. Le taux de croissance moyen annuel des émissions de ce secteur entre 2010 et 2014 est de -1,5%. Le sous-secteur de ce module qui a le plus contribué à l'atténuation des émissions est celui de la forêt et de l'arboriculture qui a connu un essor important avec la mise en place du programme Maroc vert. Par type de gaz émis, le principal gaz émis est le CO₂ qui présente un taux de croissance moyen annuel allant de -1,3% pour la période 2010-2014.

4.5. Le secteur Déchets

Les émissions du module Déchets représentent une part de l'ordre de 5,46% entre 2010 et 2014. Le taux de croissance moyen annuel des émissions de ce secteur est de 2,5%. Le sous-secteur de ce module qui a le plus contribué aux émissions du module est celui des déchets solides dont le taux de croissance est de 3,3% entre 2010 et 2014. Par type de gaz émis, l'évolution du CH₄ présente un taux de croissance moyen annuel de 2,5% pour la période 2010-2014. Celle du N₂O montre un taux de 2,7% sur la période totale 2010-2014. (Ministère Délégué Chargé de l'Environnement, 2016)

Tableau 5: Evolution des émissions des GES par secteur de gaz entre 2010 et 2014

SECTEUR							TAUX D'ÉVOLUTION MOYEN ANNUEL		
	2010	%	2012	%	2014	%	2010-2012	2012-2014	2010-2014
ENERGIE	47 731,5	64,9%	53 549,2	66,1%	54 926,9	66,3%	5,9%	1,3%	3,6%
INDUSTRIES DE L'ÉNERGIE	17 980,8	37,7%	20 779,9	38,8%	21 952,8	40,0%	7,5%	2,8%	5,1%
INDUSTRIE MANUFACTURIÈRE ET DE CONSTRUCTION	7 277,8	15,2%	8 429,8	15,7%	7 305,9	13,3%	7,6%	-6,9%	0,1%
TRANSPORT	14 197,6	29,7%	15 221,3	28,4%	15 949,1	29,0%	3,5%	2,4%	3,0%
AUTRES SECTEURS	8 095,7	17,0%	8 919,7	16,7%	9 510,1	17,3%	5,0%	3,3%	4,1%
EMISSIONS FUGITIVES LIÉES AUX COMBUSTIBLES	179,6	0,4%	198,5	0,4%	209,0	0,4%	5,2%	2,6%	3,9%
PIUP	5 989,2	8,1%	6 492,0	8,0%	5 849,7	7,1%	4,1%	-5,1%	-0,6%
INDUSTRIE MINÉRALE	5 558,3	92,8%	6 042,9	93,1%	5 383,6	92,0%	4,3%	-5,6%	-0,8%
INDUSTRIES CHIMIQUES	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0,0	0,0%			
INDUSTRIE DES MÉTAUX FERREUX ET NON FERREUX	206,124	3,4%	239,795	3,7%	239,795	4,1%	7,9%	0,0%	3,9%
USAGES NON ÉNERGÉTIQUES DE PRODUITS	215,659	3,6%	187,857	2,9%	188,701	3,2%	-6,7%	0,2%	-3,3%
PRODUCTION ET USAGES DE GAZ FLUORÉS	9,143	0,2%	21,391	0,3%	37,607	0,6%	53,0%	32,6%	42,4%
AUTRES INDUSTRIES	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0,0	0,0%			

Partie I : Chapitre III : les changements climatiques au Maroc

SECTEUR							TAUX D'ÉVOLUTION MOYEN ANNUEL		
	2010	% ₁₀	2012	% ₁₂	2014	% ₁₄	2010-2012	2012-2014	2010-2014
AGRICULTURE	18 532,5	25,2%	19 336,8	23,9%	20 236,3	24,4%	2,1%	2,3%	2,2%
FERMENTATION ENTÉRIQUE	8 338,5	45,0%	8 951,9	46,3%	9 037,6	44,7%	3,6%	0,5%	2,0%
GESTION DES DÉJECTIONS ANIMALES	1 689,4	9,1%	1 832,9	9,5%	1 840,3	9,1%	4,2%	0,2%	2,2%
RIZICULTURE	35,2	0,2%	43,3	0,2%	20,9	0,1%	11,0%	-30,6%	-12,2%
SOLS AGRICOLES	8 441,2	45,5%	8 490,8	43,9%	9 303,4	46,0%	0,3%	4,7%	2,5%
APPLICATION D'URÉE	28,2	0,2%	17,9	0,1%	34,1	0,4%	-20,4%	38,1%	4,8%
UTCATF	-2 750,9	-3,7%	-2 635,9	-3,3%	-2 593,8	-3,1%	-2,1%	-0,8%	-1,5%
FORÊTS PRODUCTION BRUTE	-7 038,4	255,9%	-7 016,0	266,2%	-7 059,2	272,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
FORÊTS EXPLOITATION RÉGULIÈRE	1 273,9	-46,3%	1 413,9	-53,6%	1 559,8	-60,1%	5,4%	5,0%	5,2%
FORÊTS EXPLOITATION INFORMELLE	4 577,4	-166,4%	4 727,4	-179,3%	4 843,1	-186,7%	1,6%	1,2%	1,4%
FORÊTS INCENDIES	8,3	-0,3%	28,2	-1,1%	9,3	-0,4%	84,8%	-42,6%	3,0%
TERRES CONVERTIES EN BÂTI	161,9		166,0		182,6				
CULTURES PERMANENTES	-1 733,8	63,0%	-1 955,5	74,2%	-2 129,5	82,1%	6,2%	4,4%	5,3%
DÉCHETS SOLIDES ET ASSAINISSEMENT	4 024,2	5,5%	4 234,2	5,2%	4 449,0	5,4%	2,6%	2,5%	2,5%
STOCKAGE EN DÉCHARGE	2 397,3	59,6%	2 557,2	60,4%	2 728,0	61,3%	3,3%	3,3%	3,3%
TRAITEMENT DES EAUX USÉES	1 627,0	40,4%	1 677,0	39,6%	1 720,9	38,7%	1,5%	1,3%	1,4%
TOTAL	73 526,6		80 976,3		82 867,9				
POPULATION (MILLIERS)	32 410		33 330		34 320		1,4%	1,5%	1,4%
TONNE E-CO2 PER CAPITA	2,27		2,43		2,41		3,5%	-0,3%	1,6%

5. Tendances climatiques observées au Maroc

Le Maroc est situé à la latitude 31.79 et la longitude -7.09. Elle fait partie de l'Afrique et de l'hémisphère nord. Dans la région de transition entre l'anticyclone subtropical et les zones de dépression subpolaire, les facteurs climatiques les plus conditionnés au Maroc continental s'ajoutent à la latitude de son orographie et à l'effet de l'océan Atlantique.

Des études de réduction d'échelle dynamique sur le Maroc sont menées depuis des années, et les modèles numériques européens sont principalement utilisés. (Born et al., 2008), en utilisant le modèle régional de climat REMO à une résolution de 50 km, ont étudié la variabilité climatique actuelle et future à l'aide des données du quatrième rapport d'évaluation du GIEC et ont conclu que l'Afrique du Nord-Ouest continuera de connaître des tendances à l'assèchement et au réchauffement dans le futur. Cependant, (Born et al., 2008) ont rapporté que REMO a révélé un biais de modèle remarquable en faveur des conditions plus sèches. Ils ont également remarqué que la température de la surface de la mer (TSM) de l'ECHAM5 n'est pas en phase par rapport à la TSM observée à l'échelle temporelle courte et ont fait valoir que le climat actuel de GCM ne devrait pas coïncider avec l'observation du climat d'une seule année.

(Paeth et al., 2009), en utilisant REMO à une résolution de 50 km, ont analysé l'effet potentiel de la couverture terrestre et des changements d'utilisation des terres (LCLU) sur le climat régional en Afrique de l'Ouest par le biais d'une réduction d'échelle des scénarios AR4, A1B et B1 du GIEC. En outre, ils ont conclu que le retour d'information des LCLU est peut-être la deuxième cause la plus importante du changement climatique régional dans la zone d'étude après les gaz à effet de serre (GES). En utilisant un MCG à résolution variable ARPRGE-CLIMATE avec le pôle d'étirement placé sur le Maroc à 28°N et 7°W à un facteur d'étirement de 3, (Driouech et al., 2009) ont étudié la variabilité des précipitations de la saison froide par rapport à 1971-2000. En comparaison avec les données de la station, ils ont constaté que le modèle est efficace dans représentant la fréquence, la variabilité interannuelle des régimes et le climat les précipitations tendanciels, qui sont presque les meilleurs résultats à ce jour.

Toutefois, ils ont constaté qu'en général, le modèle ne générant pas suffisamment de précipitations le long de la côte atlantique. Le modèle a montré un biais sec, bien qu'il soit capable de reproduire de fortes précipitations, ainsi que de longues périodes sèches, dans le centre de la zone. Plus récemment, (Driouech, 2010) ont comparé plus de dix sorties du MCR

sur le Maroc et ont constaté qu'à l'avenir (2021-2050), les précipitations au Maroc connaîtront non seulement une diminution mais aussi un changement de distribution et des événements extrêmes par rapport aux données climatiques actuelles sur les précipitations (1971-2000), ont également prouvé que l'utilisation de la méthode de réduction d'échelle statistique pour réduire les précipitations sur le Maroc ne fonctionne pas en raison de l'hypothèse stationnaire.

Certains chercheurs ont également utilisé les modèles numériques qui seront développés par les États-Unis. Pour étudier la variabilité du climat en Afrique. Par exemple, (Vizy & Cook, 2002) ont utilisé le MM5 à une résolution de 120 km pour réduire l'échelle des données du CEPMMT afin d'étudier la variabilité des précipitations estivales et son lien avec la température de surface de la mer (TSM). (Vigaud et al., 2009), en utilisant le modèle de recherche et de prévision météorologique (WRF) - nouvelle version du MM5, réduit la période de 10 ans de 1981-1990 ARPEGE-CLIMAT GCM (résolution de $2,8^{\circ} * 2,8^{\circ}$) et les données de la réanalyse ERA-40 ($2,5^{\circ} * 2,5^{\circ}$) et a constaté que le WRF peut représenter les principales caractéristiques de la circulation de la mousson d'Afrique de l'Ouest de manière raisonnablement satisfaisante. Grâce à la réduction d'échelle des résultats d'ARPEGE, la dynamique atmosphérique et les précipitations estivales du WRF se comparent mieux aux observations que les données de forçage d'ARPEGE. En utilisant le modèle WRF à une résolution de 90 km et les résultats du quatrième rapport d'évaluation du GIEC comme champs de forçage, (Patricola & Cook, 2010) ont simulé les variations climatiques actuelles (1981-2000) et futures (2081-2100) de l'Afrique du Nord (y compris le Maroc) et ont conclu que les précipitations futures ne changent guère, alors que les températures futures augmentent d'environ 5°C .

Cependant, la réduction d'échelle dynamique génère également des biais et des erreurs, qui peuvent provenir soit du forçage des données, soit des schémas de paramétrage physique du modèle, soit des deux. Quelques exemples des efforts ont été faits pour supprimer le biais du modèle dans la réduction d'échelle dynamique sur

L'Afrique du Nord. Par exemple, dans leur série d'études (Paeth & Pollinger, 2010), utilisant le modèle climatique régional REMO à la résolution de $0,5^{\circ}$, a réduit l'échelle de 25 ans des données de réanalyse du CEPMMT pour étudier la variabilité interannuelle des précipitations. Ils ont constaté que le modèle sous-estime systématiquement la quantité et la variabilité des précipitations et ne saisit pas certains détails du cycle saisonnier dans le désert subsaharien. Ensuite, ils ont mis au point une méthode de réduction d'échelle des statistiques dynamiques (Paeth et al., 2011) pour ajuster les données de pluie simulées aux caractéristiques des précipitation. Dans leur méthode de statistiques dynamiques, ils ont supposé que le modèle

climatique soit beaucoup plus fiable en termes de circulation atmosphérique et thermodynamique ; les statistiques de sortie du modèle sont utilisées pour corriger les précipitations simulées en des moyens d'autres paramètres simulés du climat proche de la surface, tels que la température, la pression au niveau de la mer, et les composantes du vent. Bien que les domaines de ces études couvrent Maroc, leurs résolutions restent trop grossières (~50 km) pour une application hydrologique à l'échelle du bassin.

(Huebener & Kerschgens, 2007b) ont utilisé la méthode de réduction d'échelle des statistiques dynamiques pour réduire les scénarios climatiques futurs à une région de 15 000 km² sur la partie sud des montagnes de l'Atlas à une résolution de 3 km. Dans leurs études, ils ont d'abord identifié la circulation des types de temps (CWT) qui affectent les précipitations du sud du Maroc, en utilisant les données de réanalyse du NCEP pour le climat actuel et les données ECHAM4 pour les scénarios futurs. Ensuite, à l'aide du modèle climatique régional, ils ont effectué des analyses à haute résolution la réduction d'échelle et l'analyse détaillée d'un ou deux événements correspondant à chaque CWT. Par la suite, (Huebener & Kerschgens, 2007a) ont calculé la climatologie et les tendances moyennes dans la région étudiée et les ont pondérées en fonction des résultats à échelle réduite de différentes CWT. Bien qu'ils aient reconnu que la réduction d'échelle de différents scénarios a généré différentes climatologies régionales, leur analyse a démontré l'importance du rôle des montagnes de l'Atlas dans le déclenchement des précipitations locales à travers les différents scénarios. Cependant, ces études n'ont pas couvert l'ensemble du pays ni le bassin du Maroc, qui sont les points centraux de ce projet.

En résumé, de nombreuses études de réduction d'échelle dynamique ont été menées sur le Maroc en utilisant différents modèles climatiques régionaux. Cependant, les performances des MCR diffèrent les unes des autres, et aucun MCR ne peut être considéré comme le meilleur en par rapport aux autres. Les résolutions de la plupart des MCR dans les études de réduction d'échelle précédentes sur le Maroc sont relativement grossières (>50-60 km). La dynamique à haute résolution D'un point de vue hydrologique, la réduction d'échelle pour l'ensemble du pays, en particulier dans les régions montagneuses du nord, reste nécessaire. En outre, les études sur les processus d'enneigement n'ont pas reçu l'attention nécessaire de la part des Les résultats des MCG ou des MCR, même si la fonte des neiges est la principale ressource en eau dans Maroc(Boudhar et al., 2010).

5.1. Distribution des températures mensuelles (1970-2000)

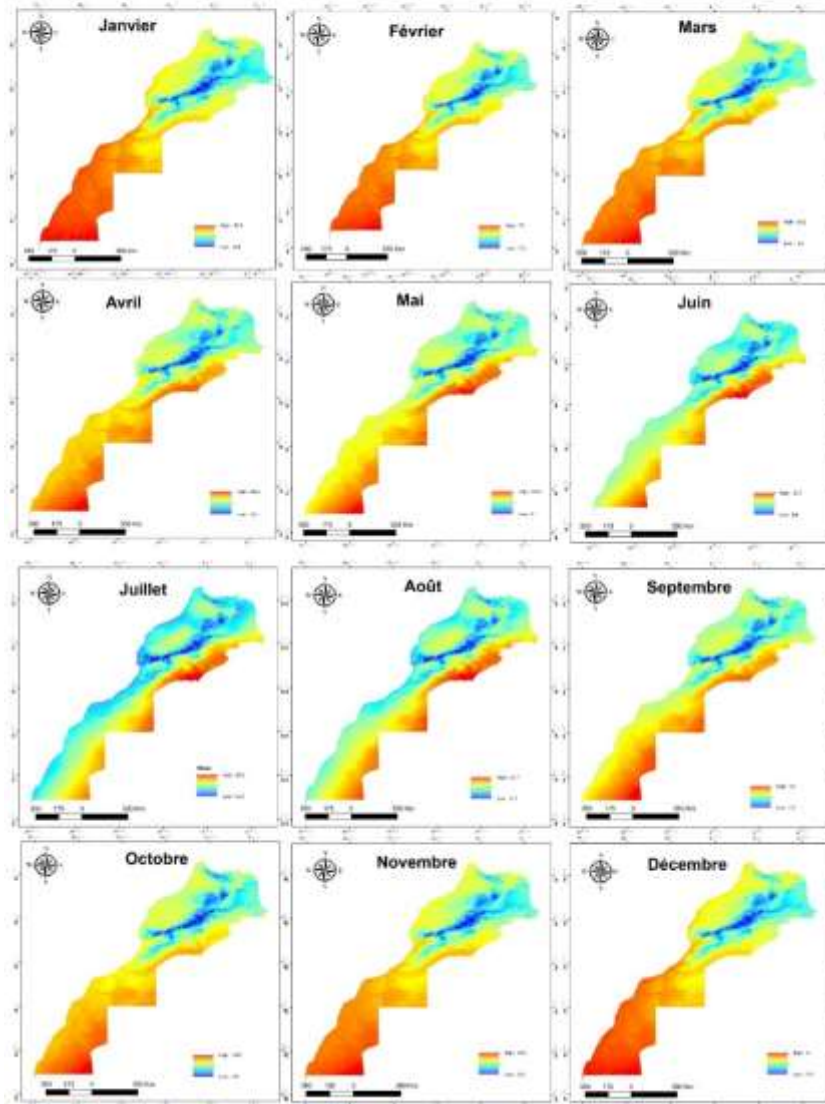


Figure 43: Distribution des températures mensuelles (1970-2000)

La répartition spatiale des températures mensuelles pour l'ensemble du Maroc pour une période de 30 ans (1970-2000) (figure 43) montre un effet de continentalité combiné avec l'effet lié à l'altitude au niveau de la chaîne de l'Atlas et du Rif. En générale, les températures moyennes mensuelles varient de presque -7°C au niveau des crêtes des montagnes du Rif jusqu'à plus de 36°C à l'Extrême Sud Est du pays.

5.2. Distribution des températures mensuelles maximale (1970-2000)

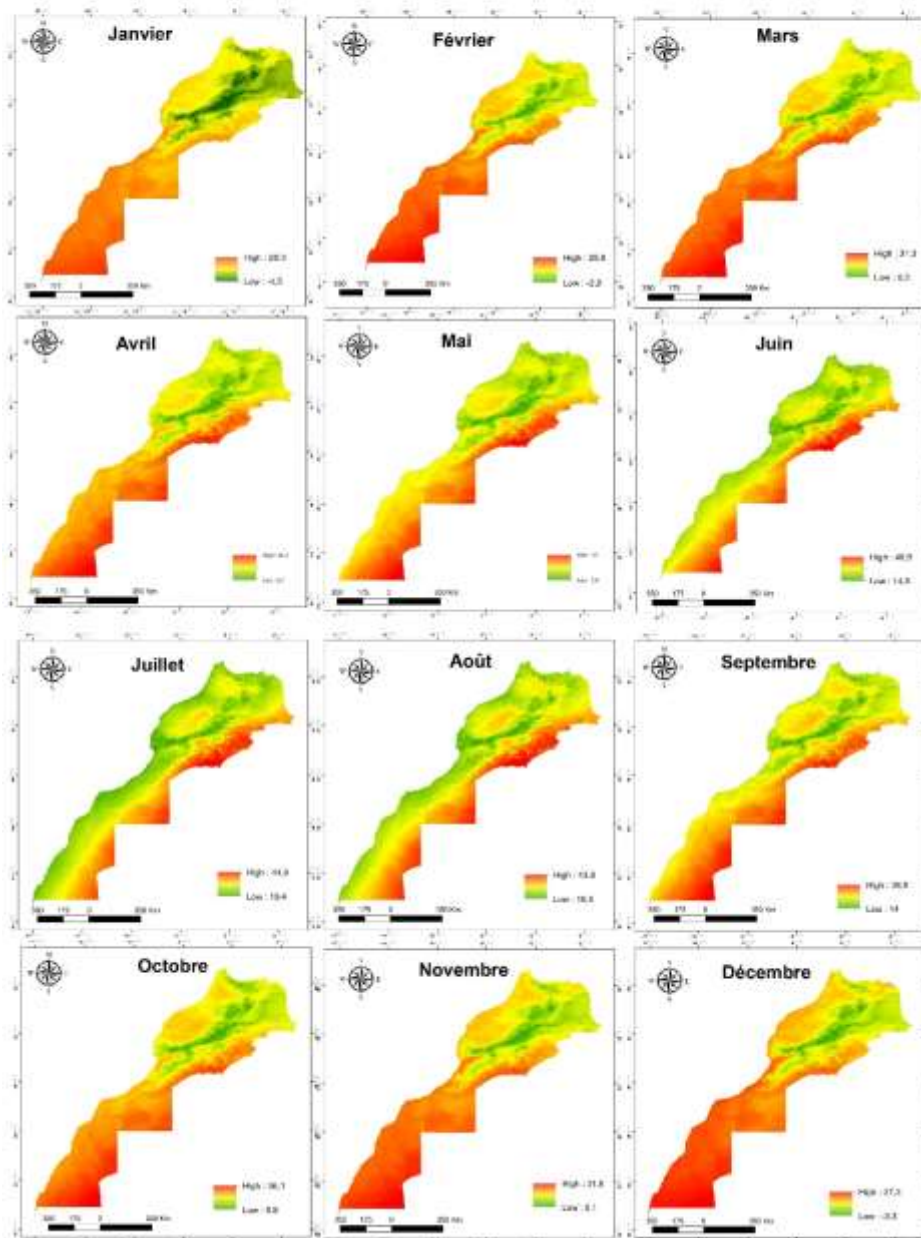


Figure 44: Distribution des températures moyennes maximale (1970-2000)

La distribution spatiale des valeurs de 30 ans de température maximale (Figure 42) présente clairement un gradient en fonction de la latitude et correspond bien à la répartition de température moyenne en été (Figure 44). Les extrêmes chauds varient généralement entre 34 et 45°C pour le Maroc du Sud, entre 33 et 38°C pour le centre du Maroc, de l'Est et de l'Ouest, et peuvent descendre jusqu'à 28°C sur le Nord du Maroc.

5.3. Différence entre les valeurs extrêmes et les températures mensuelles (1970-2000)

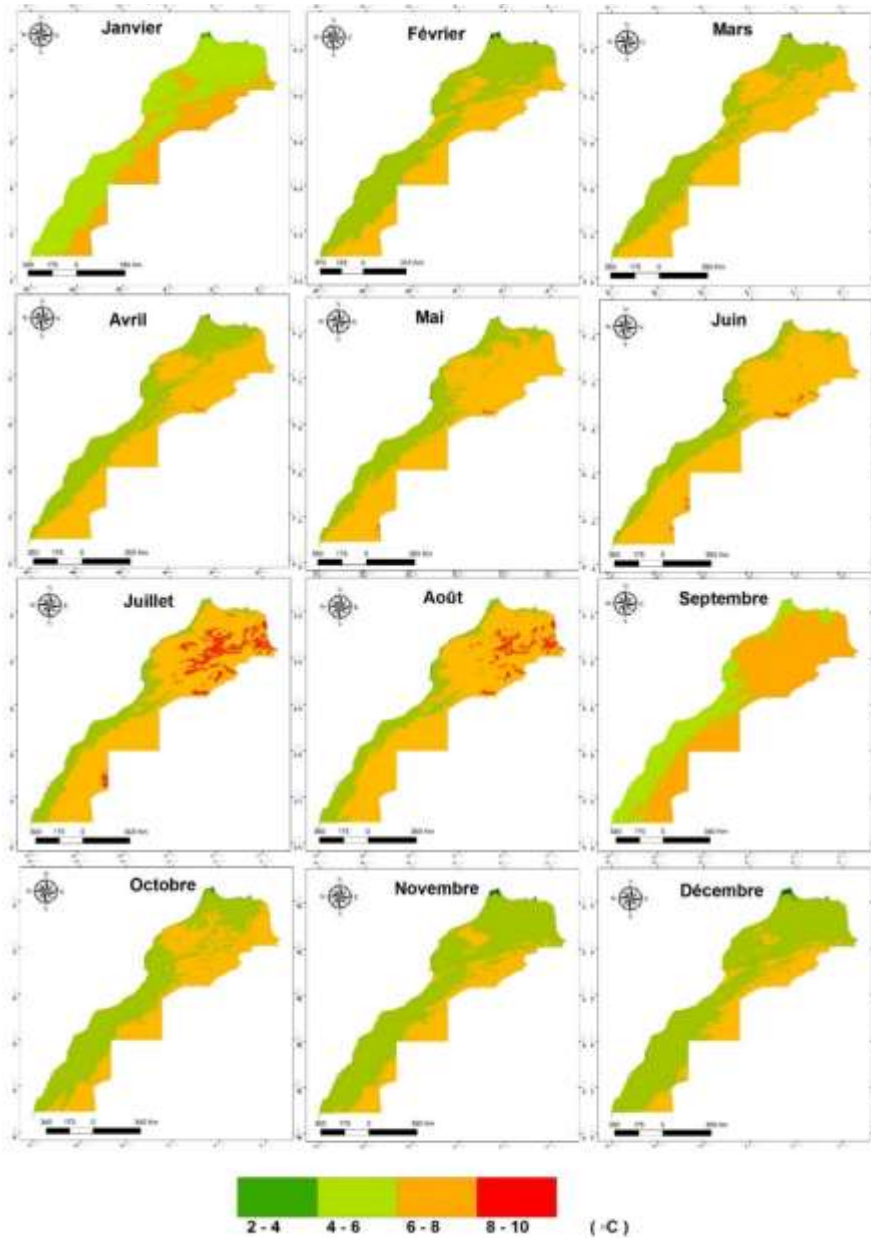


Figure 45: La différence entre les valeurs extrêmes et les températures mensuelles (1970-2000)

La comparaison quantitative entre les valeurs extrêmes et la moyenne température mensuelle moyenne (1970-2000) révèle une particularité intéressante : la différence entre les valeurs extrêmes et les moyennes varie entre 2°C et 10 °C pour tous le territoire marocain. (Figure 45). La variation géographique des extrêmes chauds est plus importante que celle des

extrêmes froids. La température dépend de la latitude mais aussi fortement de la distance à l'océan.

5.4.L'amplitude thermique

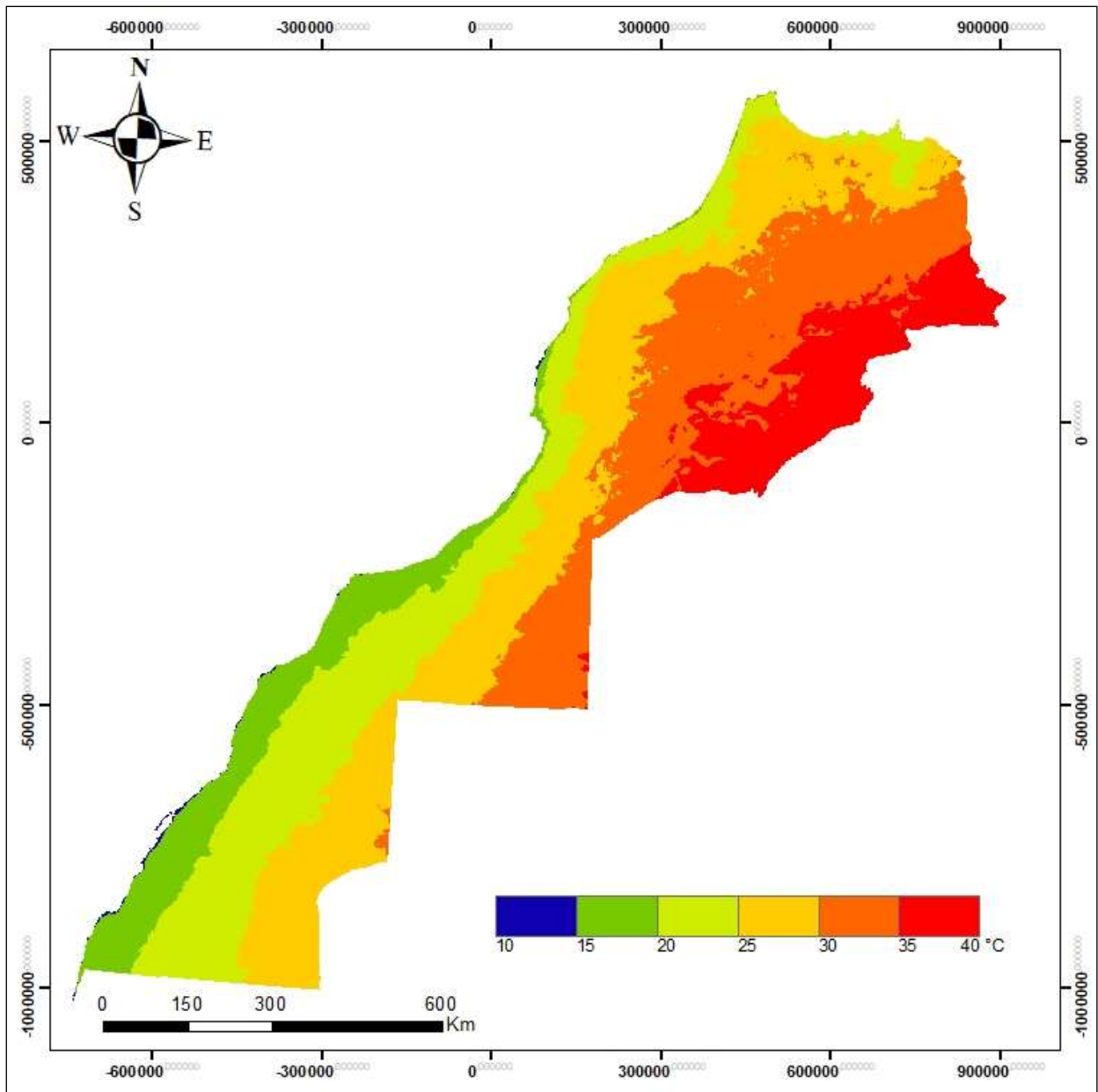


Figure 46: L'amplitude thermique(1970-2000)

L'analyse de l'amplitude thermique entre la valeur maximale du mois le plus chaud et la valeur minimale du mois le plus froid à partir des données Worldclim (Bio07) (Figure 46), montre que les amplitudes les plus extrêmes sont situées au niveau de la vallée de Drâa avec des valeurs annuelles moyennes pouvant atteindre 35°C entre la température minimale du mois de Janvier et celle maximale relative au mois de Juillet.

5.5. Distribution des précipitations mensuelles moyennes (1970-2000)

Au Maroc, la pluviométrie présente une grande variabilité spatiale. La couche d'information relative à la moyenne des précipitations annuelles sur la période de 1970-2000 (Données Worldclim), pour l'ensemble du Maroc, extraite à partir de la base de données Worldclim, montre que la moyenne des précipitations annuelles pour l'ensemble du Maroc varie globalement entre 20mm à 1182mm.

Les valeurs les plus basses sont enregistrées au niveau de l'extrême Sud du pays et les valeurs les plus élevées sont localisées au niveau des crêtes des montagnes du Rif. La répartition spatiale des pluies (Figure 47) montre un gradient altitudinal et longitudinal en relation avec les effets combinées des courants humides océaniques et de la barrière montagneuse de l'Atlas.

On distingue, par ailleurs, l'existence de deux grandes dépressions des précipitations en relation avec des effets de site et la topographie qui sont la dépression de la vallée de Missour où les précipitations ne dépassent pas la valeur moyenne de 200mm et celle localisée au niveau de l'axe de Kalâa Sraghna, Marrakech à Chichaoua avec des précipitations moyennes de l'ordre de 250 à 300mm. la répartition spatiale des pluies montre que 48% du territoire Marocain reçoit moins de 100mm annuellement, alors que les régions où il pleut plus de 600mm ne dépassent pas les 6%.

De point de vue localisation spatiale, on note que l'ensemble du Sud Marocain y compris une partie des flancs du Haut Atlas et l'Anti Atlas oriental reçoit des précipitations inférieures à 100mm avec un gradient nord sud assez prononcé. Au Nord, c'est la chaîne Nord-Ouest du Rif qui est la plus arrosée avec des précipitations moyennes pouvant atteindre plus de 1m annuellement.

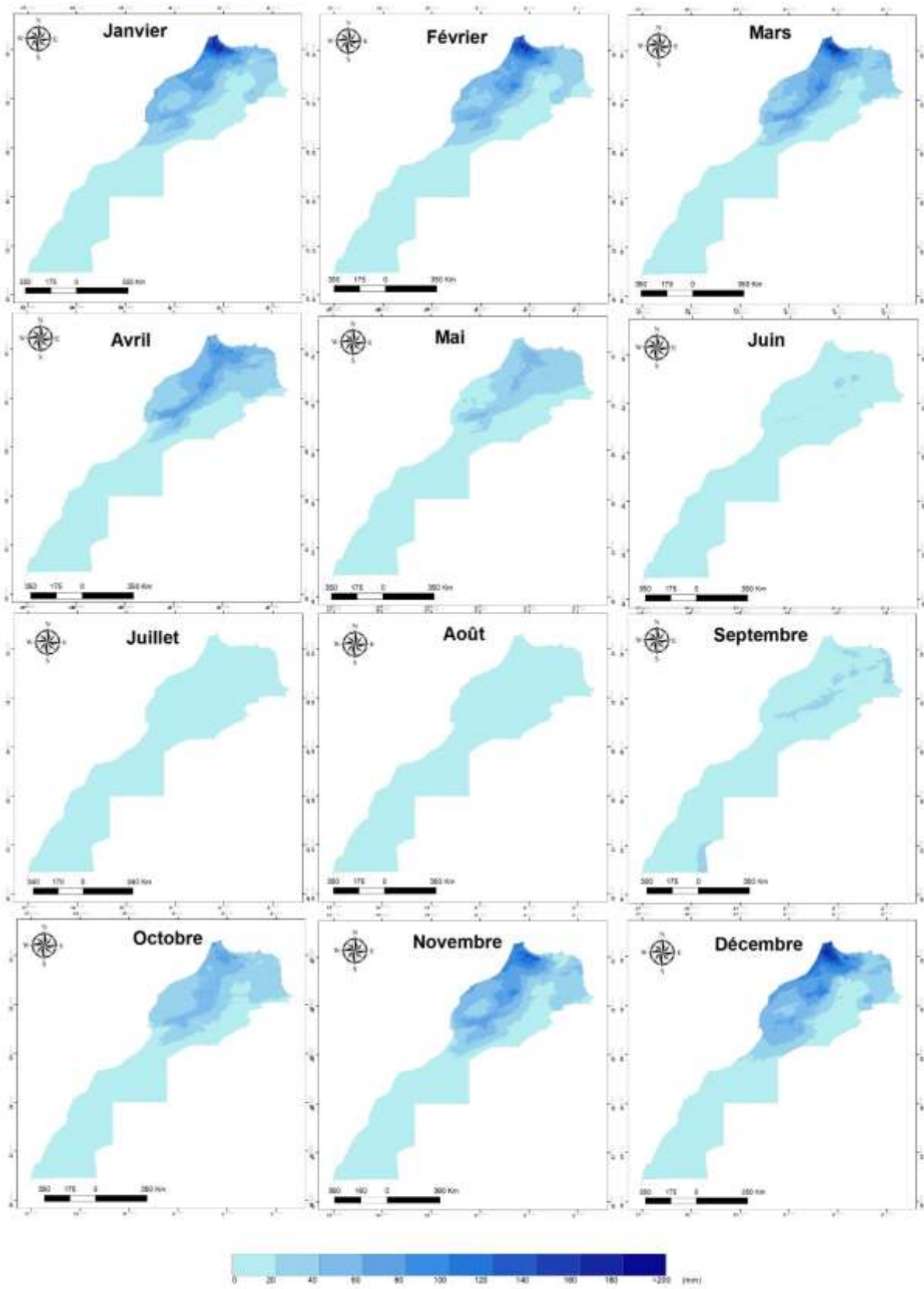


Figure 47 : Distribution des précipitations mensuelles (1970-2000)

6. Evolutions projetées et conséquences des changements climatiques

Pour la région méditerranéenne, les modèles climatiques montrent une certaine convergence pour ce qui concerne le signe du changement climatique. Selon les prévisions, le profil climatique du Maroc se verrait ainsi dominé par la diminution des précipitations et la hausse des températures (IPCC, 2001).

Le Maroc est un pays qui fait partie de la région méditerranéenne, subit les effets des changements climatiques dans leur diversité, dans leur intensité et dans leur occurrence. Il y aura également une tendance à l'augmentation des phénomènes extrêmes, en nombre ; en fréquence et en intensité.

6.1. Changement projeté des températures mensuelles (2021-2040)

Toutes les données météorologiques disponibles pour le Maroc indiquent un réchauffement significatif durant les dernières décennies avec une augmentation importante de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes du type sécheresses et inondations.

La seconde communication nationale du Maroc présentée en 2010 est venue confirmer cet aspect. Tous les modèles de circulation générale prévoient que ce réchauffement devrait continuer dans cette région et même prendre une autre dimension durant les prochaines décennies.

6.1.1. Le modèle BCC-CSM2-MR

Les principales avancées du modèle de système climatique du Centre climatique de Pékin (BCC), de la phase cinq du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP5) à sa phase six (CMIP6), sont présentées, en termes de paramétrisations physiques et de performances des modèles. BCC-CSM1.1 et BCC-CSM1.1m sont les deux modèles impliqués dans CMIP5, et BCC-CSM2-MR, BCC-CSM2-HR, et BCC-ESM1.0 sont les trois modèles configurés pour CMIP6. Des simulations historiques de 1851 à 2014 à partir de BCC-CSM2-MR (CMIP6) et de 1851 à 2005 à partir de BCC-CSM1.1m (CMIP5) sont utilisées pour l'évaluation du modèle. (Wu et al., 2018)

Les matrices d'évaluation comprennent :

- Le bilan énergétique au sommet de l'atmosphère,
- La température de l'air en surface, les précipitations et la circulation atmosphérique pour les régions du monde et de l'Asie de l'Est,
- L'étendue et l'épaisseur de la glace de mer et la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (AMOC),
- Les variations climatiques à différentes échelles de temps telles que la tendance au réchauffement climatique au 20e siècle, l'oscillation quasi-biennale stratosphérique (QBO), l'oscillation Madden-Julian (MJO) et le cycle diurne des précipitations.

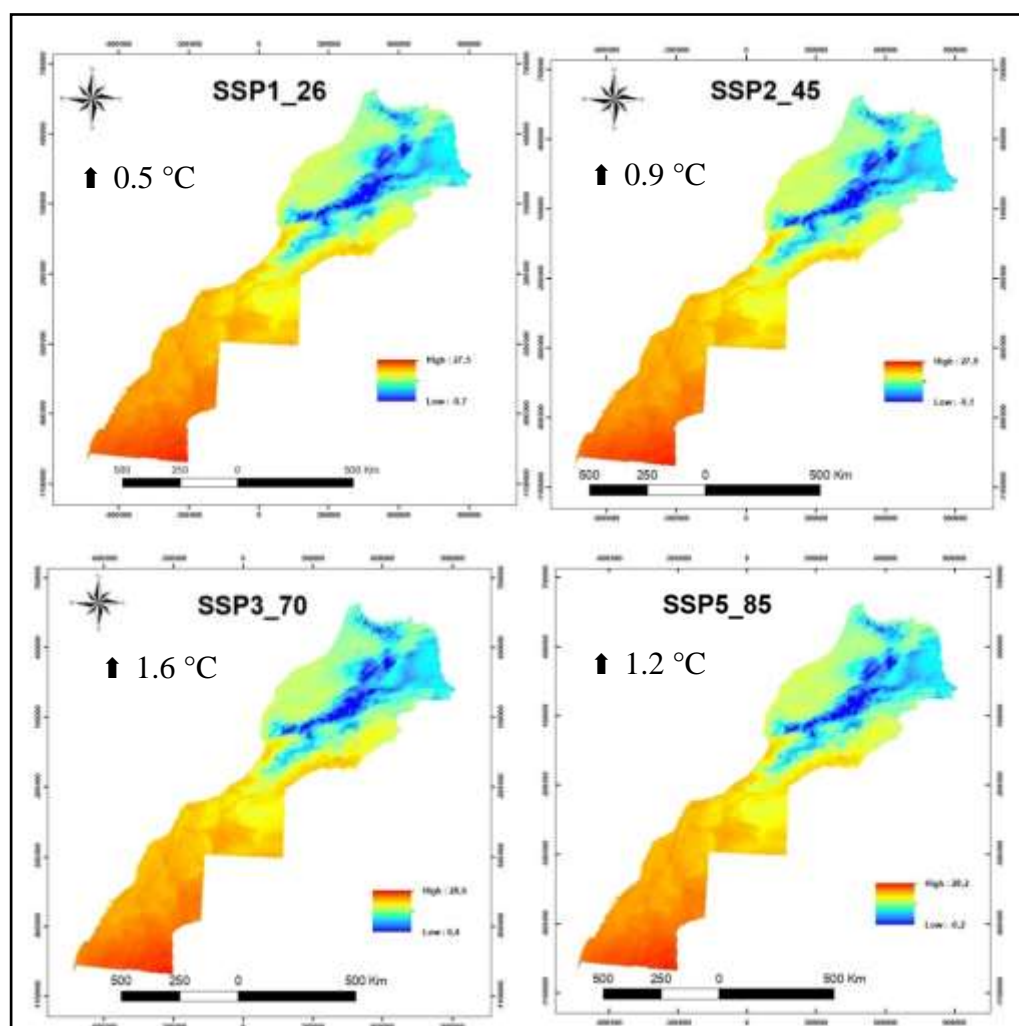


Figure 48: Les scénarios de projection des températures moyennes mensuelles selon le modèle BCC-CSM2-MR pour la période (2021-2040)

La figure 48 illustre les changements projetés qui concernent les températures moyennes mensuelles entre la période 2021-2040 selon les différents scénarios du modèle BCC-CSM2-MR :

- SSP1-26 : les changements vont augmenter de plus de 0.5 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP2-45 : le réchauffement prévu est de 0.9 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP3-70 : le réchauffement prévu est de 1.6°C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP5-85 : le réchauffement prévu est de 1.2 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.

6.1.2. Le modèle CNRM-CM6-1

CNRM-CM6-1 est le modèle climatique développé par le groupe de modélisation CNRM/CERFACS pour CMIP6. C'est le successeur du modèle climatique CNRM-CM5.1 qui participe à CMIP5, son atmosphère est simulée à l'aide du MCG ARPEGE-Climat v6.3, dans lequel la surface terrestre est représentée à l'aide du système de surface terrestre ISBA-CTRIP et les lacs à l'aide d'une version révisée du modèle Flake lake, tous deux intégrés dans le système de surface externalisé SURFEX v8.0.

Ce continuum terre-atmosphère est entièrement couplé toutes les heures avec le modèle océanique NEMO et le schéma de glace de mer GELATO à l'aide du coupleur OASIS-MCT. Le CNRM-CM6-1 est interfacé avec le serveur d'entrées/sorties configurable en Xml (XIOS) développé par IPSL/LSCE afin de fournir à la fois des sorties haute performance pour des simulations massivement parallèles, une configuration facile des sorties de modèles et de certains post-traitements en ligne.

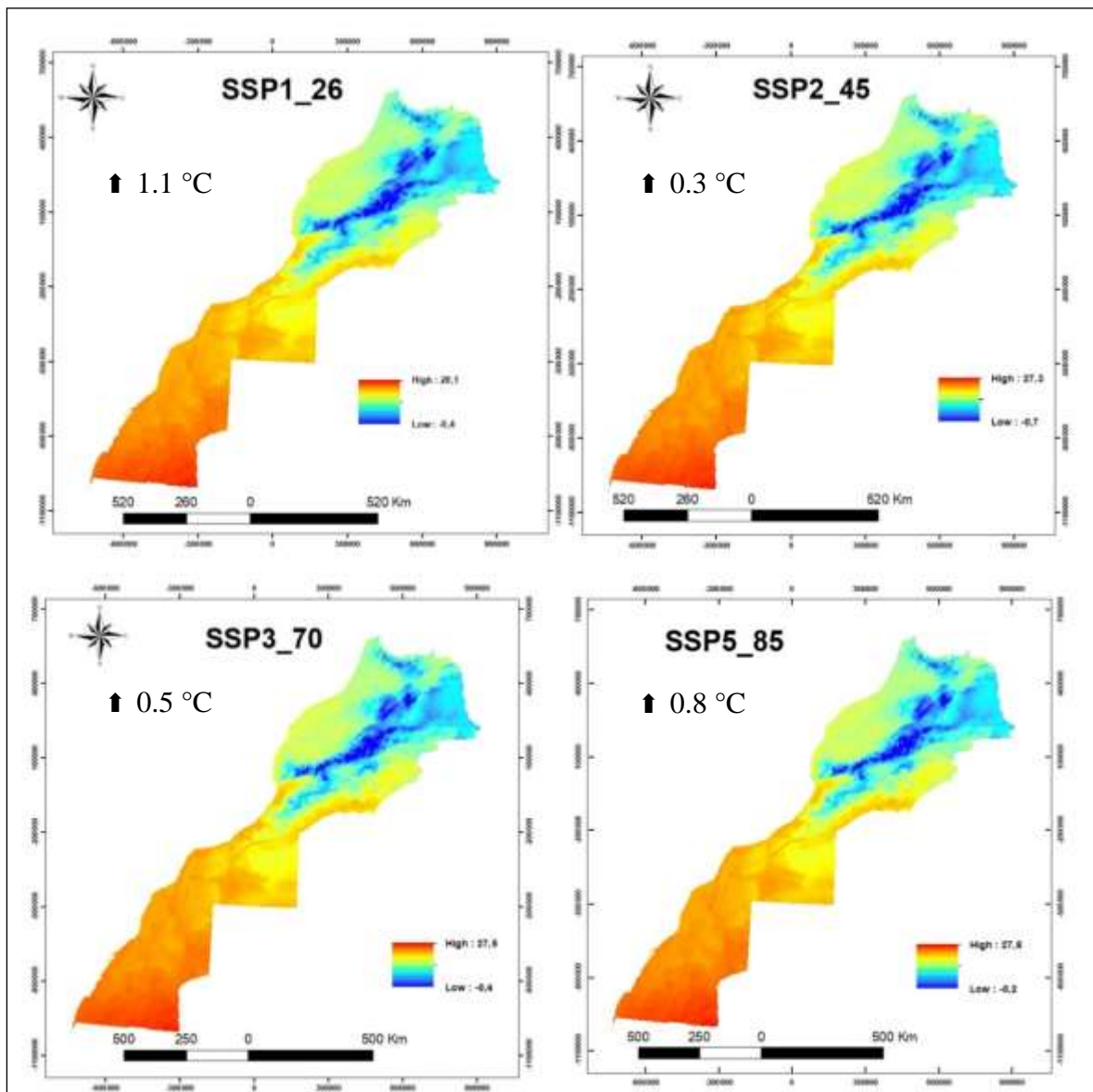


Figure 49: Les scénarios de projection des températures moyennes mensuelles selon le modèle CNRM-CM6-1 pour la période (2021-2040)

La figure 49 illustre les changements projetés qui concernent les températures moyennes mensuelles entre la période 2021-2040 selon les différents scénarios du modèle **CNRM-CM6-1** :

- SSP1-26 : les changements vont augmenter de plus de 1.1 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP2-45 : le réchauffement prévu est de 0.3 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP3-70 : le réchauffement prévu est de 0.5°C par rapport aux niveaux de 1970-2000.

- SSP5-85 : le réchauffement prévu est de 0.8 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.

6.2. Changement projeté des températures mensuelles (2041-2060)

6.2.1. Le modèle BCC-CSM2-MR

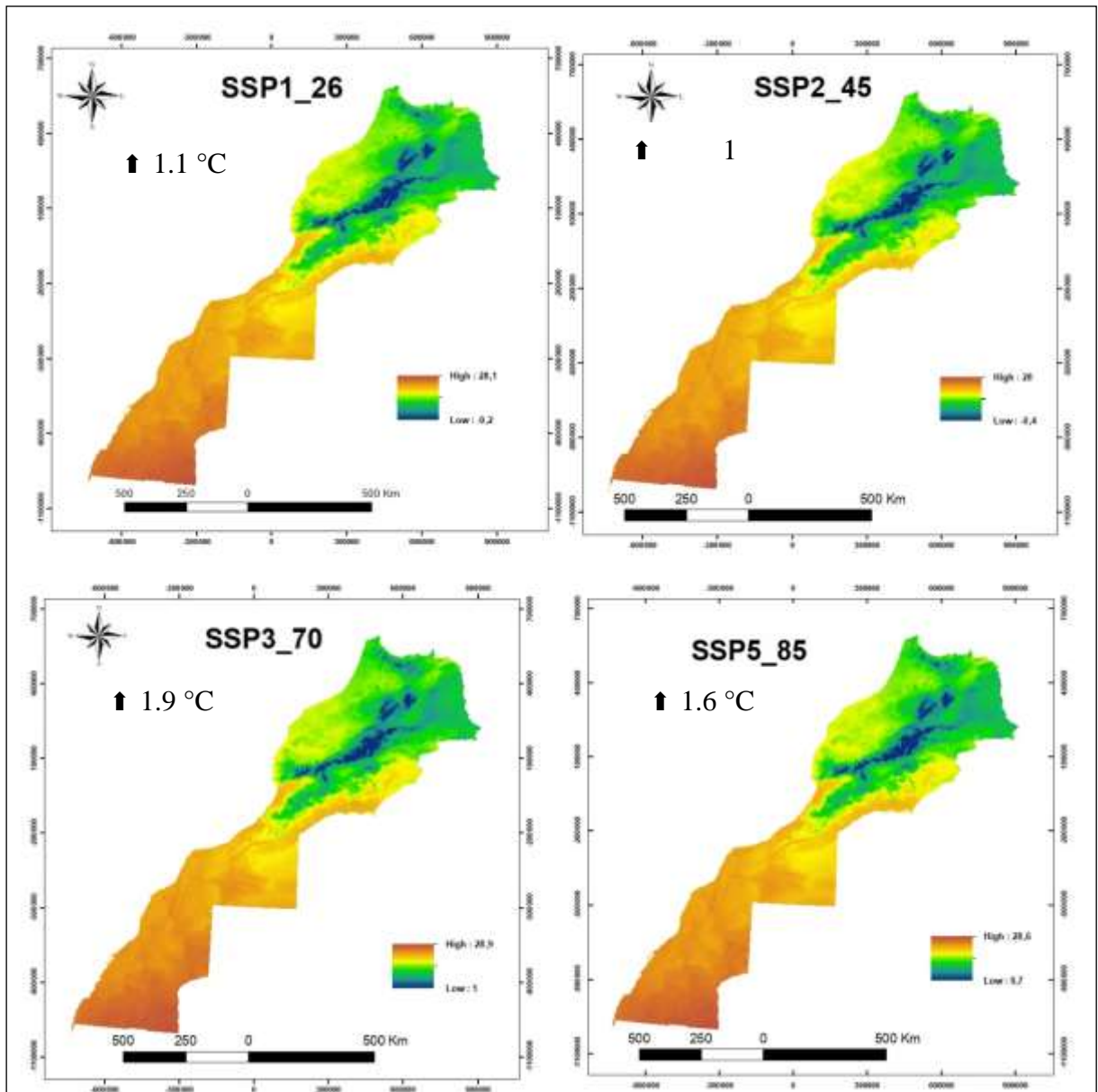


Figure 50: Les scénarios de projection des températures moyennes selon le modèle BCC-CSM2-MR pour la période (2041-2060)

La figure 50 illustre les changements projetés qui concernent les températures moyennes mensuelles entre la période 2041-2060 selon les différents scénarios du modèle CNRM-CM6-1 :

- SSP1-26 : les changements vont augmenter de plus de 1.1 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP2-45 : le réchauffement prévu est de 1 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP3-70 : le réchauffement prévu est de 1.9°C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP5-85 : le réchauffement prévu est de 1.6 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.

6.2.2. Le modèle CNRM-CM6-1

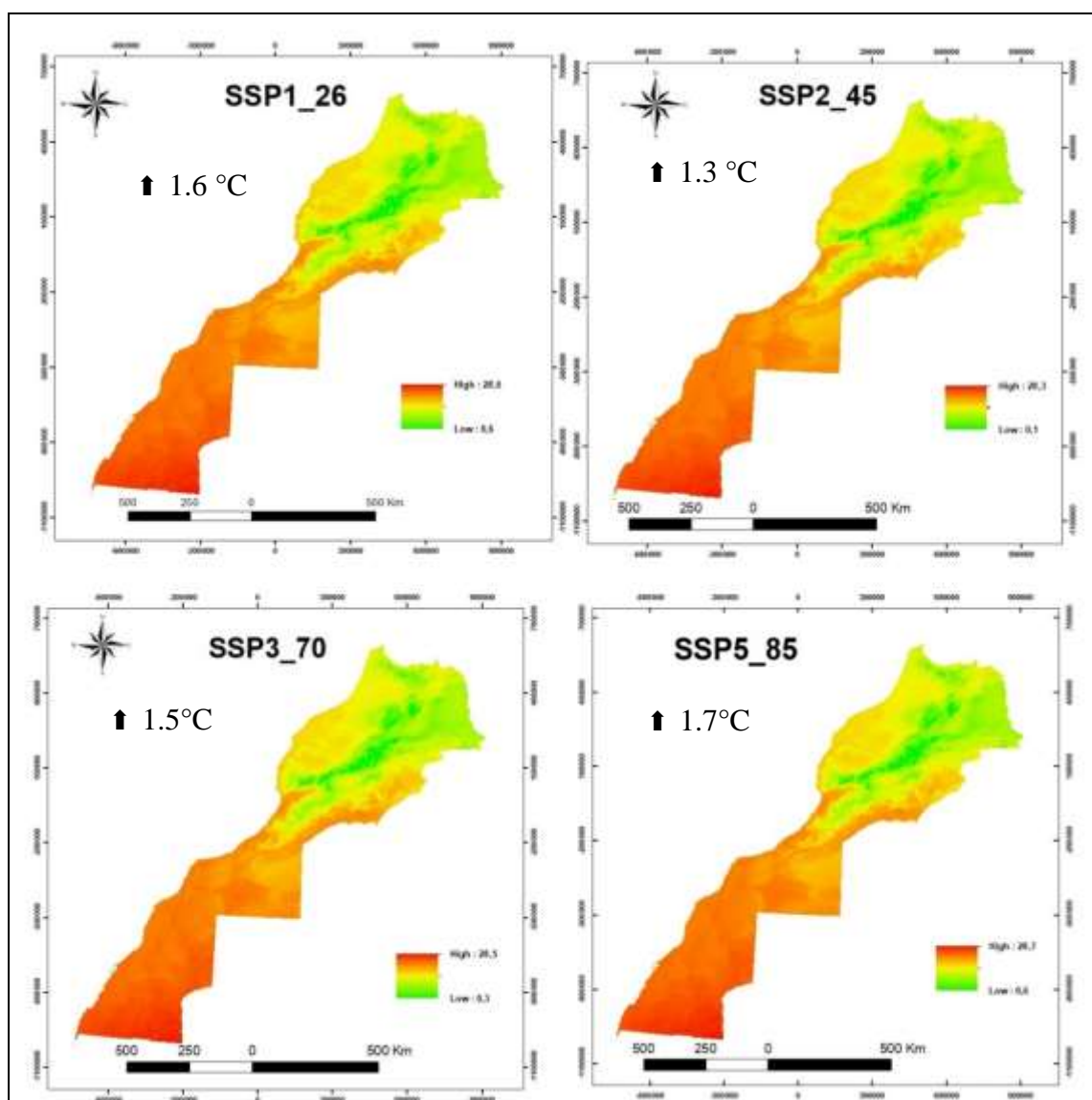


Figure 51: Les scénarios de projection des températures moyennes selon le modèle CNRM-CM6-1 pour la période (2041-2060)

La figure 51 illustre les changements projetés qui concernent les températures moyennes mensuelles entre la période 2021-2040 selon les différents scénarios du modèle **CNRM-CM6-1** :

- SSP1-26 : les changements vont augmenter de plus de 1.6 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP2-45 : le réchauffement prévu est de 1.3 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP3-70 : le réchauffement prévu est de 1.5°C par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP5-85 : le réchauffement prévu est de 1.7 °C par rapport aux niveaux de 1970-2000.

Donc on peut résumer les résultats obtenus pour le réchauffement au Maroc dans le tableau 6 :

Tableau 6: Réchauffements prévus au Maroc en relation avec les Changements Climatiques

Régions du Maroc	<i>Le modèle BCC-CSM2-MR</i>		<i>Le modèle CNRM-CM6-1</i>	
	<i>Réchauffement prévu en (2021-2040)</i>	<i>Réchauffement prévu en (2041-2060)</i>	<i>Réchauffement prévu en (2021-2040)</i>	<i>Réchauffement prévu en (2041-2060)</i>
<i>Oriental</i>	0.8/0.9 °C	2 °C	0.8/0.9 °C	2.1 °C
<i>Nord</i>	0.6/0.7 °C	1.3°C	0.6/0.7 °C	1.3°C
<i>Centre</i>	0.6/0.7 °C	1.5°C	0.6/0.7 °C	1.5°C
<i>Sud</i>	0.4/0.6 °C	1.7 °C	0.4/0.6 °C	1.7 °C

6.3. Changement projeté des précipitations mensuelles (2021-2040)

Les changements climatiques peuvent avoir plusieurs effets directs sur les quantités de précipitations, leur intensité, leur fréquence et leur type. Le réchauffement accélère l'assèchement des terres et accroît l'incidence et la gravité potentielles des sécheresses, phénomènes observés sur de nombreux points du globe. Cependant, une équation physique bien

établie (la relation de Clausius-Clapeyron) détermine que la capacité de rétention d'eau de l'atmosphère augmente d'environ 7 % pour chaque hausse de température de 1 °C. Du fait que les précipitations proviennent principalement des systèmes météorologiques qui alimentent la vapeur d'eau emmagasinée dans l'atmosphère, ce phénomène a de manière générale augmenté l'intensité des précipitations et les risques de pluies violentes et d'épisodes neigeux

6.3.1. Le modèle BCC-CSM2-MR

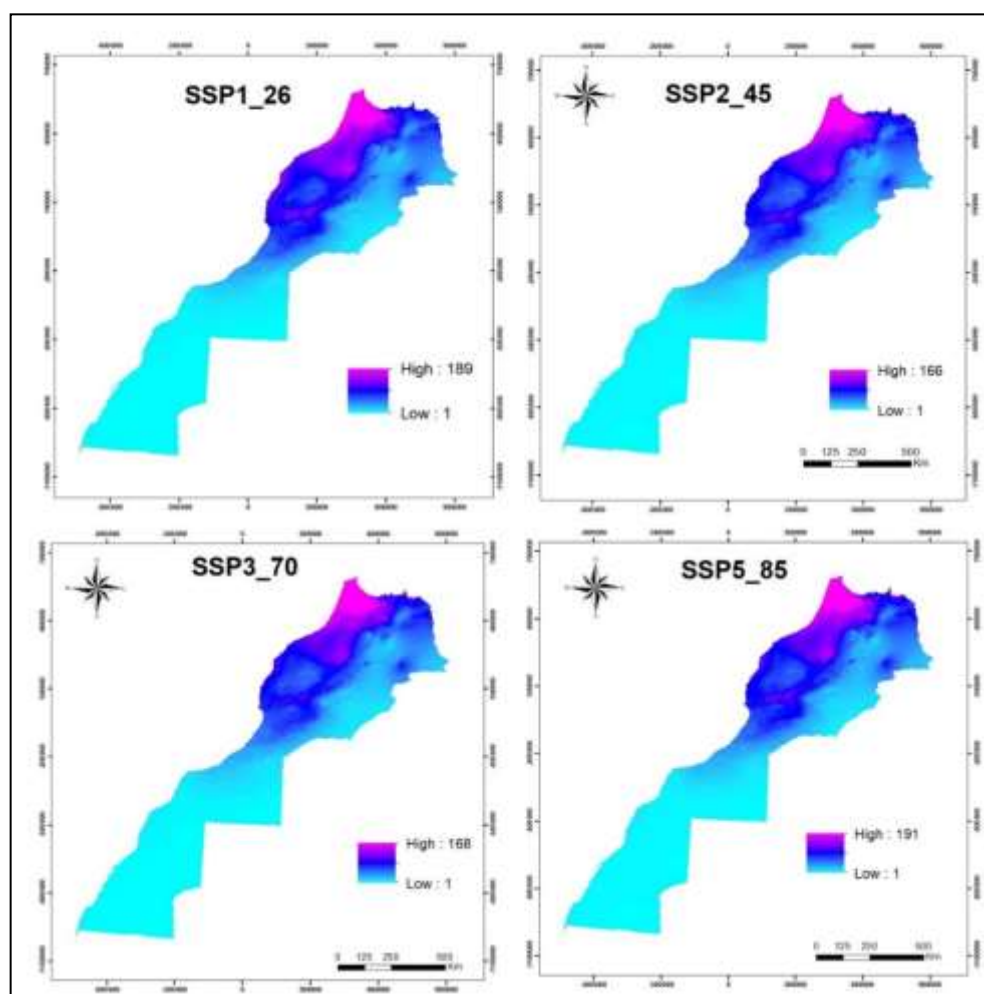


Figure 52: Les scénarios de projection des précipitations moyennes selon le modèle BCC-CSM2-MR pour la période (2021-2040)

Les quatre cartes (Figure 52) illustrent les changements projetés qui concernent les précipitations moyennes mensuelles entre la période 2021-2040 selon différents scénarios :

- SSP1-26 : Dans un scénario où le monde évolue progressivement, mais de manière omniprésente, vers une voie plus durable, mettant l'accent sur un développement plus inclusif qui respecte les limites environnementales perçues,

ces changements ne devraient pas augmenter de plus de 10 % par rapport aux niveaux de 1970-2000.

- SSP2-45 : dans un scénario où le monde suit une voie dans laquelle les tendances sociales, économiques et technologiques ne s'écartent pas nettement des modèles historiques, on prévoit d'importants changements concernant les précipitations moyennes mensuelles d'une diminution de 20 %.
- SSP3-70 : dans un scénario où Les pays se concentrent sur la réalisation des objectifs de sécurité énergétique et alimentaire dans leurs propres régions au détriment d'un développement plus large. Les précipitations moyennes mensuelles au Maroc vont subir d'une diminution de 20 %.
- SSP5-85 : dans un scénario où le monde fait de plus en plus confiance aux marchés compétitifs, à l'innovation et aux sociétés participatives pour produire des progrès technologiques rapides et le développement du capital humain comme voie vers le développement durable, les changements au niveau précipitations moyennes mensuelles au Maroc ne devraient pas augmenter de plus de 10 % par rapport aux niveaux de 1970-2000.

6.3.2. Le modèle CNRM-CM6-1

La figure 53 illustre les changements projetés qui concernent les précipitations moyennes mensuelles entre la période 2021-2040 selon les différents scénarios du modèle **CNRM-CM6-1** :

- SSP1-26 : une diminution de plus de 10 % par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP2-45 : on prévoit d'importants changements concernant les précipitations moyennes mensuelles d'une diminution de 20 %.
- SSP3-70 : Les précipitations moyennes mensuelles au Maroc vont subir d'une diminution de 20 %.
- SSP5-85 : les changements au niveau précipitations moyennes mensuelles au Maroc ne devraient pas diminuer de plus de 10 % par rapport aux niveaux de 1970-2000.

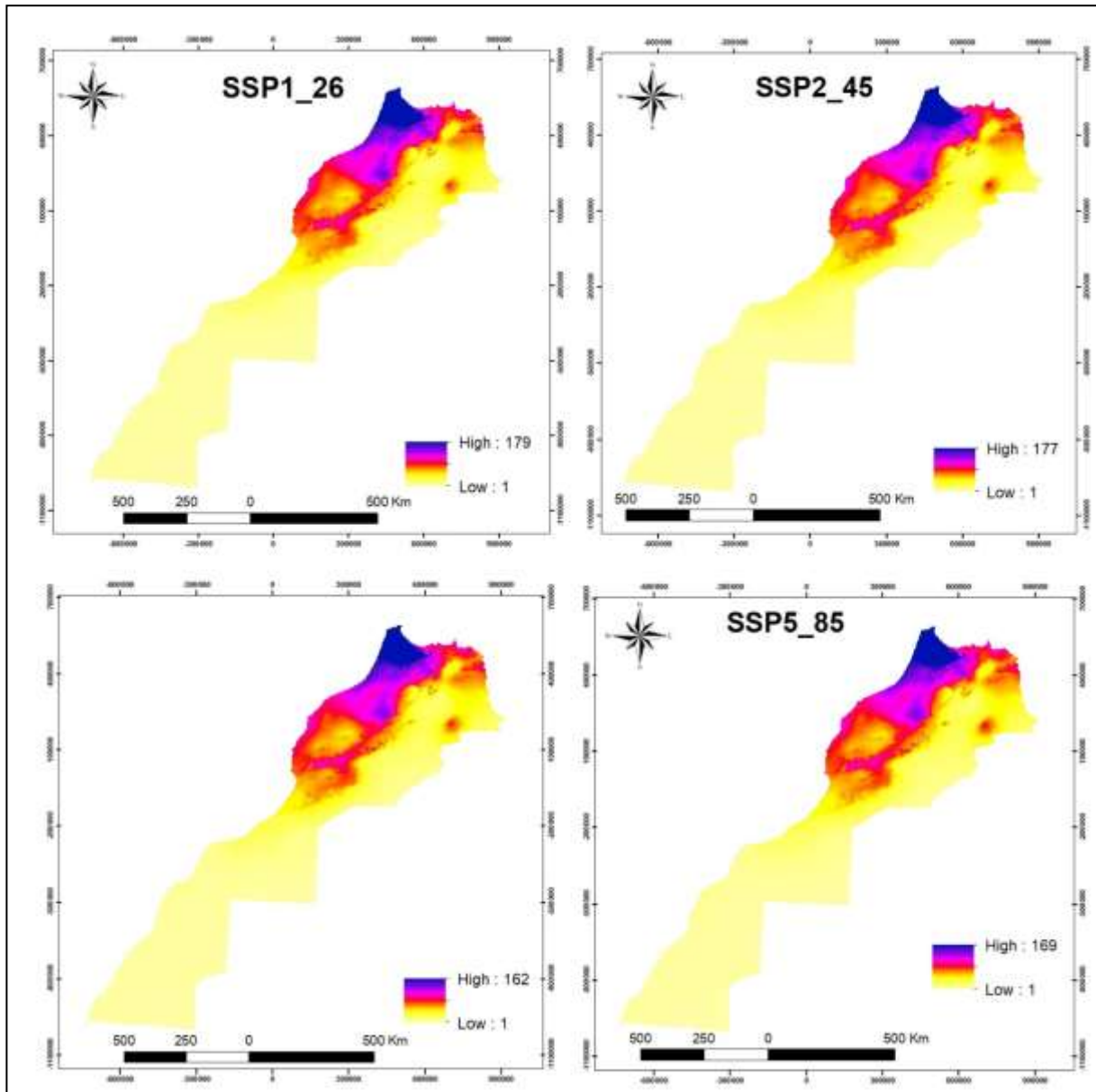


Figure 53: Les scénarios de projection des précipitations moyennes selon le modèle CNRM-CM6-1 pour la période (2021-2040)

6.4. Changement projeté concernant des précipitations mensuelles (2041-2060)

6.4.1. Le modèle BCC-CSM2-MR

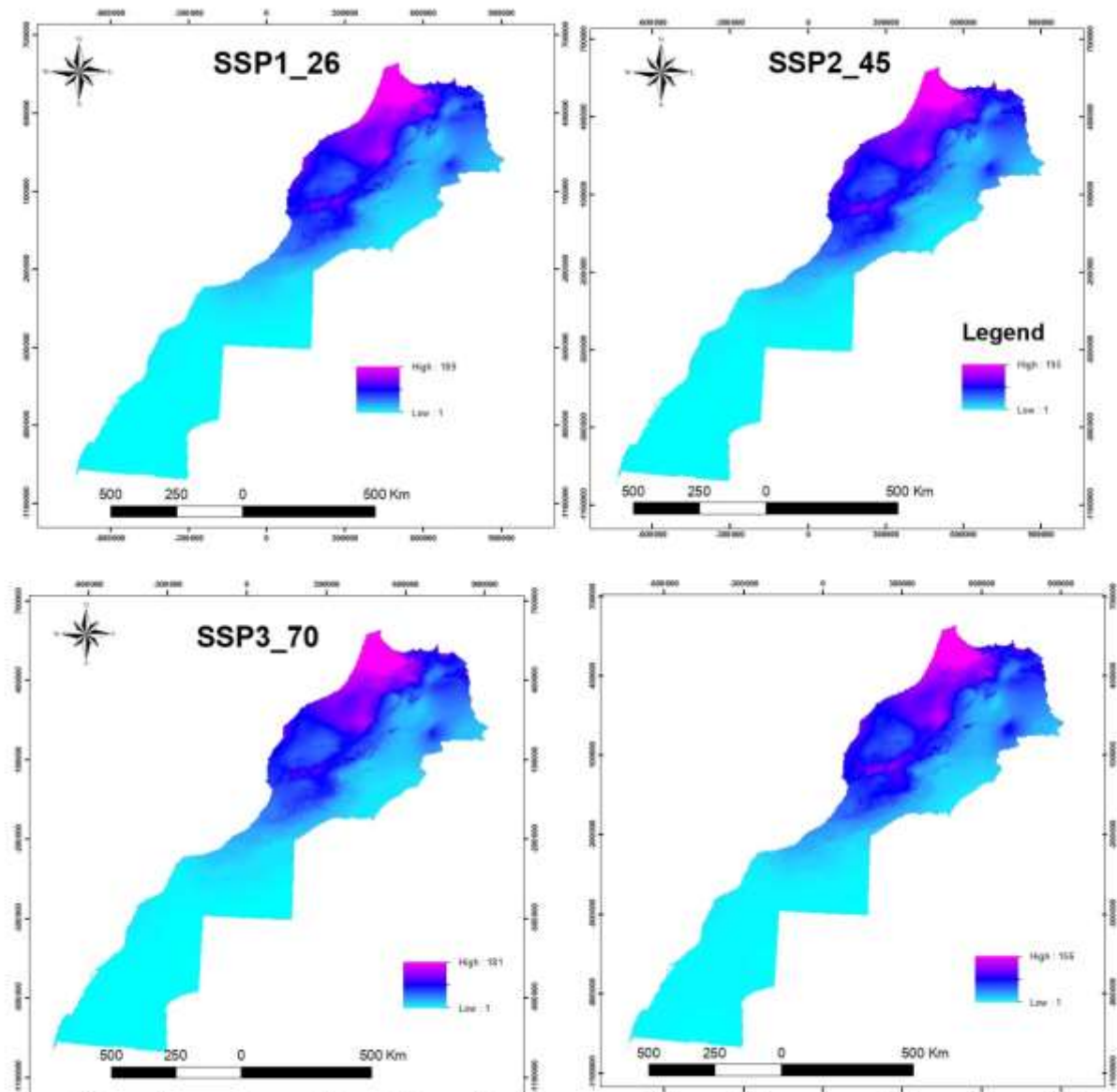


Figure 54: Les scénarios de projection des précipitations moyennes selon le modèle BCC-CSM2-MR pour la période (2041-2060

La figure 54 illustre les changements projetés qui concernent les précipitations moyennes mensuelles entre la période 2021-2040 selon les différents scénarios du modèle CNRM-CM6-1 :

- SSP1-26 : une diminution de plus de 10 % par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP2-45 : on prévoit d'importants changements concernant les précipitations moyennes mensuelles d'une diminution de 20 %.

- SSP3-70 : Les précipitations moyennes mensuelles au Maroc vont subir d'une diminution de 20 %.
- SSP5-85 : les changements au niveau précipitations moyennes mensuelles au Maroc ne devraient pas diminuer de plus de 10 % par rapport aux niveaux de 1970-2000.

1.1.1. Le modèle BCC-CSM2-MR

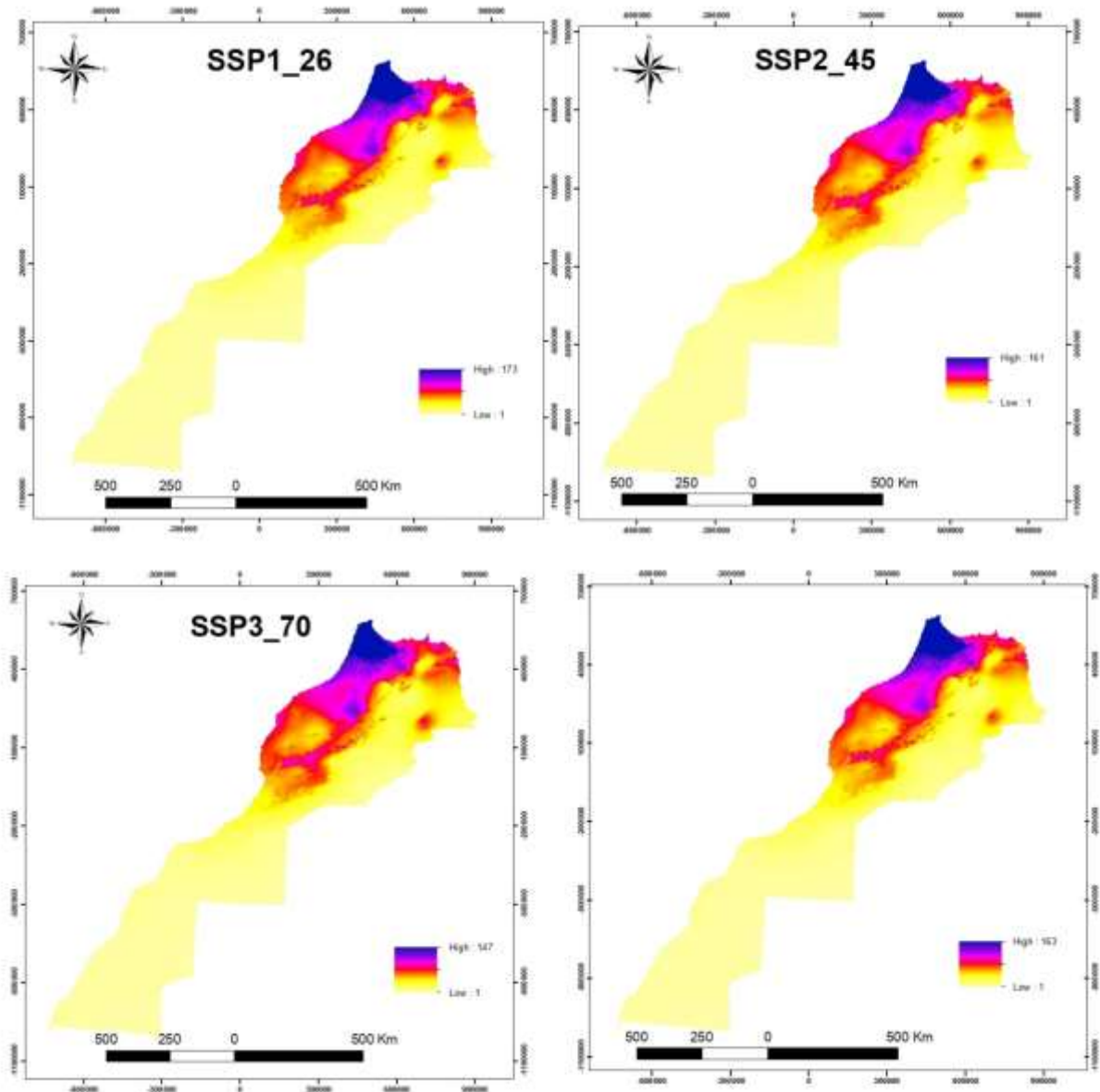


Figure 55: Les scénarios de projection des précipitations moyennes selon le modèle CNRM-CM6-1 pour la période (2041-2060)

La figure 55 illustre les changements projetés qui concernent les précipitations moyennes mensuelles entre la période 2021-2040 selon les différents scénarios du modèle **CNRM-CM6-1** :

- SSP1-26 : une diminution de plus de 10 % par rapport aux niveaux de 1970-2000.
- SSP2-45 : on prévoit d'importants changements concernant les précipitations moyennes mensuelles d'une diminution de 20 %.
- SSP3-70 : Les précipitations moyennes mensuelles au Maroc vont subir d'une diminution de 20 %.
- SSP5-85 : les changements au niveau précipitations moyennes mensuelles au Maroc ne devraient pas diminuer de plus de 10 % par rapport aux niveaux de 1970-2000.

Tableau 7: Diminution des précipitations prévues au Maroc en relation avec les Changements Climatiques

Régions du Maroc	<i>Le modèle BCC-CSM2-MR</i>				<i>Le modèle CNRM-CM6-1</i>			
	Diminution précipitations Prévue pour la période 2021-2040	Diminution en %	Diminution précipitations Prévue pour la période 2041-2080	Diminution en %	Diminution précipitations Prévue pour la période 2021-2040	Diminution en %	Diminution précipitations Prévue pour la période 2041-2080	Diminution en %
<i>Oriental</i>	-10/20 mm Sur 140mm/an	-7%/-14%	18/22 mm Sur 140mm/an	-13%/-16%	-10/20 mm Sur 140mm/an	-7%/-14%	18/22 mm Sur 140mm/an	-13%/-16%
<i>Nord</i>	-36 mm Sur 720mm/an	-5%	-90/100 mm Sur 720mm/an	-12%/14%	-36 mm Sur 720mm/an	-5%	-90/100 mm Sur 720mm/an	-12%/14%
<i>Centre</i>	-14/26 mm Sur 236mm/an	-6%/11%	-30/40 mm Sur 236mm/an	-13%/17%	-14/26 mm Sur 236mm/an	-6%/11%	-30/40 mm Sur 236mm/an	-13%/17%
<i>Sud</i>	-3/9mm Sur 59mm/an	-3%/-15%	-6mm Sur 59mm/an	-10%	-3/9mm Sur 59mm/an	-3%/-15%	-6mm Sur 59mm/an	-10%

Partie II : Identification des changements climatiques dans le bassin OER et élaboration de la stratégie d'adaptation

Chapitre I : Présentation du bassin de l'Oum Er Rbia

Chapitre II : Identification du stockage du carbone dans le bassin de l'Oum Er Rbia par le modèle InVEST

Chapitre III : Identification des changements climatiques dans le bassin de l'Oum Er Rbia

Chapitre IV : l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia

Chapitre V : Stratégie d'Adaptation de la gestion des ressources en eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia

Chapitre I : Présentation du bassin de l'Oum Er Rbia

1. Introduction

Le bassin de l'Oum Er Rbia, l'un des plus grands bassins du pays, s'étend sur une superficie de 35 000 km² avec un allongement de 550 km. Le cours d'eau d'Oum Er-Rbia prend son origine au Moyen Atlas à 1 800 m d'altitude, traverse la chaîne du Moyen Atlas, la plaine du Tadla et la Meseta côtière et se jette dans l'Océan Atlantique, près de la ville d'Azemmour, à environ 16 km au Nord de la ville d'El Jadida.

Le bassin de l'Oum Er Rbia, s'alimente essentiellement dans le domaine atlasique. Le réseau hydrographique du bassin est formé de l'oued Oum Er Rbia et de ses affluents : Tassaout, El Abid, Lakhdar, Derna, Melloul, Ouamana, Srou, Chbouka, Ouirine, Gzef, El Touim et Faragh.

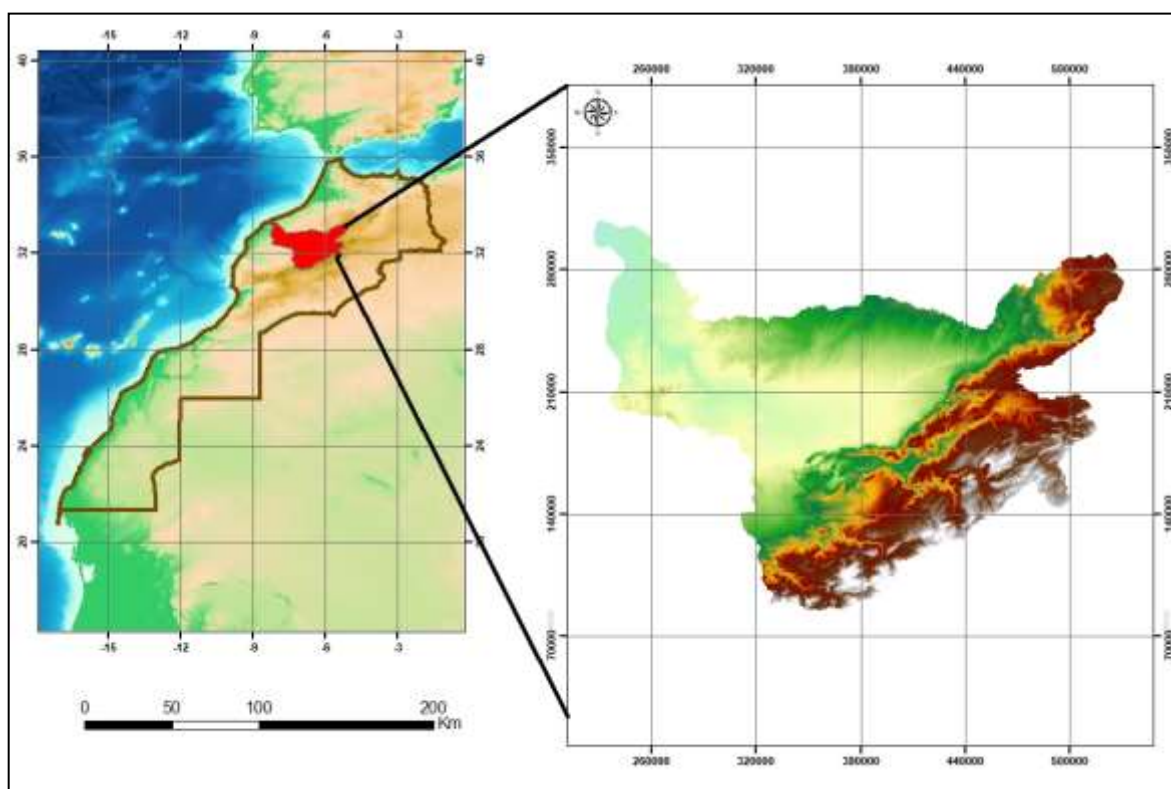


Figure 56 : La situation géographique du bassin de l'Oum Er Rbia

Grâce à une pluviométrie variable de 300 mm à 1 100 mm, les apports moyens à l'embouchure de l'oued Oum Er Rbia sont importants et s'évaluent à 3 680 Mm³/an. Ces apports proviennent principalement de l'Oum Er Rbia et de ses principaux affluents : Tassaout, Lakhdar et El Abid. Les apports de nombreuses sources associées à ceux de la fonte des neiges

garantissent un étiage très soutenu pour l'Oum Er Rbia faisant de lui le cours le plus régulier du Royaume. (Figure 56)

2. Le climat du bassin

Le bassin Oum Rbia présente de zones à climats différents allant du climat littoral modéré qui caractérise la zone côtière au climat aride caractérisant la plaine de Rhamna en passant par le climat semi-aride dans la plaine de Tadla et des zones plus arrosées en montagne. Le bassin a connu une diminution de la pluviométrie. La pluviométrie moyenne du bassin est passée d'environ 400 mm/an au cours de la période 1935 – 1980, à un 340 mm/an au cours de la 1980 -2007. (Figure 57)

Le bassin Oum Er Rbia présente de zones à climats différents allant du climat littoral modéré qui caractérise la zone côtière au climat aride caractérisant la plaine de Rhamna en passant par le climat semi-aride dans la plaine de Tadla et des zones plus arrosées en montagne.

La pluviométrie moyenne sur le bassin de l'Oum Er Rbia et les bassins côtiers est de 500 mm/an. Elle varie entre 1100 mm sur le Moyen Atlas et 300 mm dans la zone aval du fleuve. Elle neige en moyenne 20 jours/an au-dessus de 800 m.

La température varie entre 10 et 50°C. Les moyennes des minima et maxima sont de 3,5°C (Janvier) et 38°C (Août) respectivement.

L'évaporation peut atteindre 1600 à 1800 mm/an. Elle est 1600 mm par an en moyenne sur la côte et 2000 mm à l'intérieur du bassin avec un maximum mensuel de 300 mm en Juillet et Août.

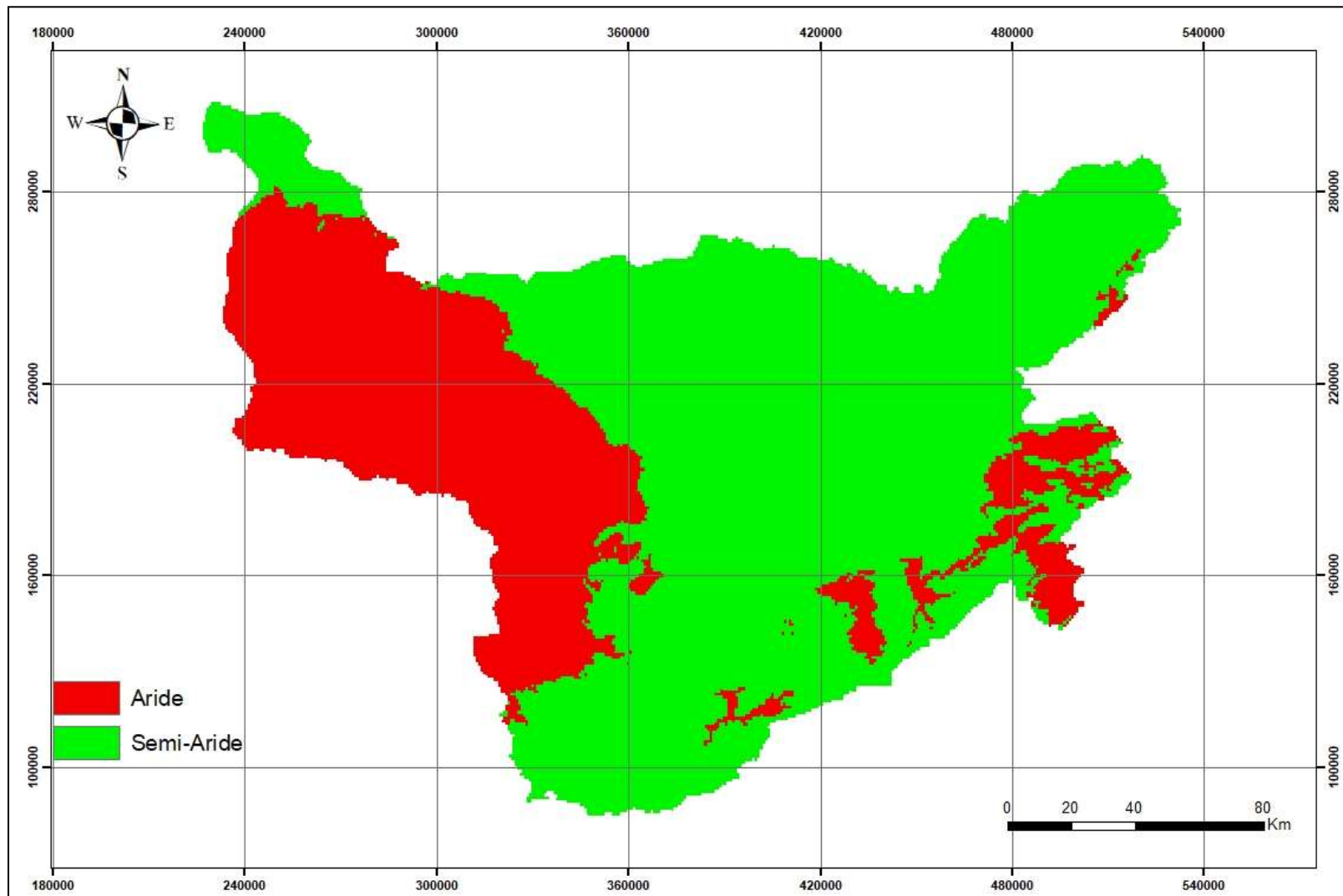


Figure 57: Le climat du bassin de l'Oum Er Rbia

Le climat du bassin Oum Er Rbia est caractérisé par une diversité bioclimatique entre le semi-aride et l'aride :

- ❖ **Les plateaux des phosphates** : sont sous un climat semi-aride continental. L'examen de la répartition moyenne des pluies mensuelles et des températures moyennes mensuelles de la station de Khouribga montre que les étés sont très chauds et secs et les hivers assez froids et relativement humides. La période pluvieuse s'étend d'octobre à mai avec une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 350 mm en 60 jours de pluie en plus de 60 jours d'observation de la rosée. La température moyenne mensuelle en janvier (le mois le plus froid) varie entre 5 °C et 15.3°C avec une moyenne avoisinant les 10.2°C et des nuits qui peuvent être très fraîches. Quant à la température moyenne mensuelle en juillet (le mois le plus chaud), elle oscille entre 18.7°C et 34.9°C avec une moyenne de 26.8°C. Les écarts sont importants entre le jour et la nuit et les journées caniculaires liées aux cherguis sont souvent observées l'été. Ce climat fait que la végétation naturelle de ces plateaux est steppique : graminée, doums, jujubiers...
- ❖ **La région de Tadla Azilal** : de par sa situation géographique sise entre les plateaux des phosphates et le moyen atlas, se caractérise par un climat, semi-aride dans les plaines et continental dans les montagnes notamment à Azilal. La pluviométrie annuelle moyenne est d'une normale de 380 mm (peut dépasser les 600 mm pour les années arrosées et descendre au-dessous de 200 mm pour les années sèches), reste relativement faible. Les précipitations dans cette zone suivent un régime pluviométrique caractérisé par une période pluvieuse de huit mois (octobre à mai) et pouvant atteindre neuf mois en s'approchant de la montagne (septembre à mai) avec un nombre moyen annuel de jours de pluie de l'ordre de 60 jours. Les températures moyennes mensuelles en janvier (le mois le plus froid) varient entre 2.7°C et 17.6°C avec une moyenne avoisinant les 10.2 °C et des nuits qui peuvent être très fraîches (les gelées ne sont pas rares en hiver). Quant aux températures moyennes mensuelles en juillet (le mois le plus chaud), elles oscillent entre 18.9°C et 36.9°C avec une moyenne de 27.9°C près de la montagne et 29.3 °C dans la plaine (les écarts sont importants entre le jour et la nuit et les journées caniculaires sont fréquents). L'été est très chaud à cause des vents brûlants du sud-est "chergui" qui font augmenter la température au-dessus des 40 °C (47 °C juillet 2007), vagues de chaleur se terminant parfois par de violents orages. De par son climat, cette région est connue pour la culture d'olives, betteraves, oranges, céréales et

piments rouges. Son climat favorise la pratique des sports et loisirs aériens spécialement en hiver.

- ❖ **Au moyen Atlas**, la température est sensiblement influencée par l'altitude moyenne du massif. Les valeurs enregistrées sont relativement basses par rapport aux régions avoisinantes et confèrent une allure de climat tempéré. L'amplitude moyenne annuelle de la température est assez forte. Si l'on considère les amplitudes des maxima et des minima moyens et extrêmes, on constatera que les écarts sont très importants, traduisant la forte instabilité qui règne sur les versants du Moyen Atlas. Cette zone est située dans une zone de transition climatique de part son altitude qui varie de 1000 m NGM à M'Rirt à plus de 1200 m NGM en haut du bassin versant de l'oued Tighza. Les températures restent basses sur les sommets, aussi la neige persiste longtemps de façon quasi continue.

3. Démographie, villes et centres

Selon les résultats du recensement général de la population de 2014, le bassin de l'Oum Er Rbia regroupe une population de l'ordre de 5,17 millions d'habitants (17,5 % de la population du pays) (Tableau 8). La population urbaine de la zone s'élève à 1,9 millions d'habitants, répartie sur 71 centres appartenant à 8 provinces. La population rurale compte 3,34 millions d'habitants, représentant 64 % de la population totale de la zone. Le tableau 1 donne le détail de cette population par province, suivant ledit recensement.

Tableau 8: Démographie du bassin Oum Er Rbia (2014)

Province	Total
Azilal	554001
Beni Mellal	550678
El Jadida	786716
Kelaa des Sraghna	537488
Khenifra	371145
Khouribga	542125
Safi	691983
Fquih Ben salah	502827
Settat	634184
Total	5171147

4. Géologie

L'aire d'étude fait partie du domaine Atlantique. Elle s'étend sur six unités géographiques (selon la classification du document sur les Ressources en Eau du Maroc) :

- Massif des Rhamna,
- Plateau des phosphates,
- Abda Doukkala, qui fait partie de la Méséta marocaine,
- Zone côtière d'Azemmour à Safi,
- Plaine de Tadla, Gantour, Bhira et Tassaout aval,

Ci-après, on donne un descriptif de la géologie de ces unités (Figure 58)

- Le massif des Rhamna est constitué par des formations sédimentaires paléozoïques fortement plissées avec une couverture d'âge secondaire sur les bordures,
- Le plateau des phosphates est constitué d'un ensemble de plates-formes emboîtées correspondant chacune aux niveaux calcaires les plus résistants de la série sédimentaire. Il est caractérisé par l'existence du gisement de phosphates d'Ouled Abdoun.
- La zone des Abda-Doukkala fait partie de la Méséta marocaine. Cette dernière est caractérisée par un régime tabulaire de dépôts secondaires et tertiaires reposant sur des terrains primaires frottement plissés.
- La zone côtière d'Azemmour à Safi présente une morphologie dunaire avec une successio de crêtes séparées de dépressions remplies de limons très sableux.
- La plaine de Tadla est constituée d'une vaste dépression asymétrique recouverte de dépôts hétérogènes. Cette plaine est caractérisée par l'existence de deux importants périmètres agricoles, situés de part et d'autre de l'Oued Oum Rbia (Béni Amir et Béni Moussa).
- Le plateau des Gantour, et les plaines de Bhira et Tassaout aval forment un bassin sédimentaire. Le socle primaire est recouvert par des formations de couverture triasiques, crétacées et éocènes, antérieurs aux premiers mouvements atlasiques. Ces formations affleurent au Nord et s'enfoncent sous la plaine vers le Sud. Elles sont recouvertes par des formations continentales de remplissage récent et par des dépôts quaternaires

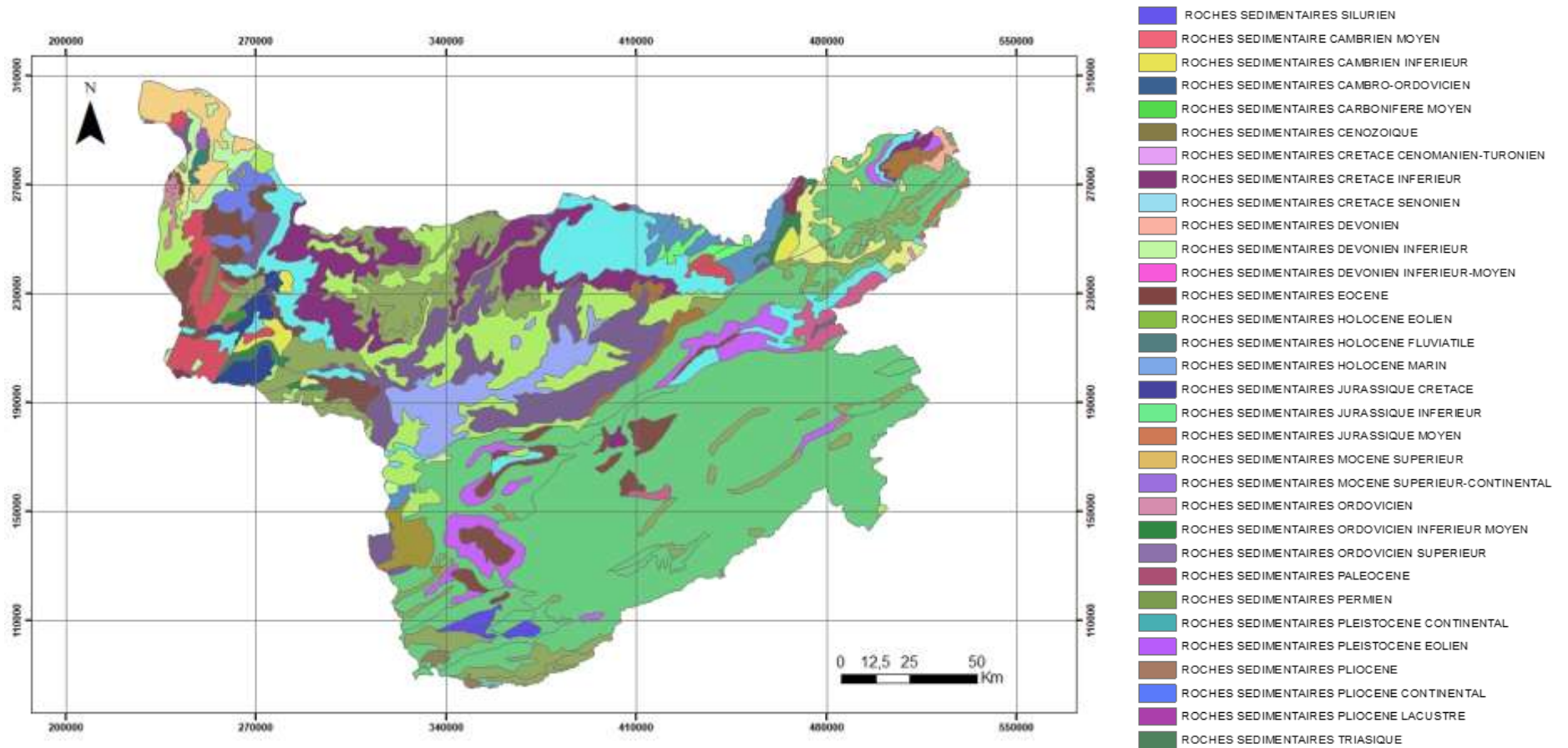


Figure 58: La géologie du bassin de l'Oum Er Rbia (Légende : Annex 1)

5. Ressources en eaux souterraines

Dans le bassin de l'Oum Er Rbia, on distingue les unités de nappes suivantes (Figure 59) :

- Les nappes phréatiques du Tadla découpées dans le plan horizontal en trois sous-unités :

- ⇒ Une en rive droite de l'Oued Oum Er Rbia c'est la nappe des Béni Amir,
- ⇒ Deux en rive gauche la nappe du Dir, et sa prolongation vers l'aval par la nappe des Béni Moussa

Ces trois sous-unités correspondent à un découpage hydrographique d'une part, et aux aménagements hydro-agricoles d'autre part, mais présentent par ailleurs des éléments de convergence ou de continuité qui conduisent à les considérer comme une seule unité hydrogéologique ;

- Les nappes profondes du Tadla qui comprennent successivement en dessous :de la nappe phréatique les niveaux aquifères de l'Eocène, du Sénonien et du Cénomano-Turonien ; la distinction entre ces trois sous-unités s'effectue donc cette fois dans un plan vertical, mais les relations étroites qui lient ces niveaux aquifères successifs conduisent à les considérer comme un seul ensemble ;

- Plusieurs unités regroupées sous le titre de « nappes centrales » :

- ⇒ Nappe de la Tessaout aval ; on regroupe dans cette unité le tronçon de la nappe phréatique comprise entre l'Oued El Abid à l'Est et l'Oued Tessaout à l'Ouest, et les nappes profondes interconnectées, essentiellement représentées ici par le Turonien ;
- ⇒ Nappe de la Bahira ; la pointe occidentale de cette nappe se situe en fait dans la zone d'action de l'agence du Tensift ; nous inclurons, pour des raisons évidentes de continuité hydrogéologique, la totalité de cette nappe dans le domaine couvert par la présente étude ;
- ⇒ Nappe du Haouz dont l'extrémité orientale se situe sur le bassin de la Tessaout : certaines cartes ou documents écrits prolongent le glacis du Haouz de

Marrakech jusqu'à l'Oued Tessaout ; il n'existe en effet pas de limite claire, ni hydrographique, ni hydrogéologique dans le glacis de piémont qui s'intercale entre le cours de la Tessaout (qui fait naturellement partie de la zone d'action de l'ABHOER), et celui des premiers affluents orientaux du Tensift (Oued Lahr et Oued Rdat), situés dans le Haouz de Marrakech et donc dans la zone d'action de l'ABH du Tensift ; o Nappes de Khemisset – Chaouïa : cette unité concerne uniquement un secteur d'extension limitée, situé au Sud - Sud-ouest de Settat, et au Nord du massif des Rehamna ;

- Les « Nappes de montagne » : on regroupe sous ce terme un certain nombre de nappes situées sur la bordure septentrionale de l'Atlas : Dogger d'Azizal et Ait M'hamed, Turonien d'Ait Attab, Dogger et Lias dans la région de Demnate, Lias dans les provinces de Khénifra et Béni Mellal. Celles-ci présentent effectivement un grand intérêt hydrogéologique en tant que château d'eau de l'Oued OER et de ses affluents (Oued El Abid, Oued Lakhdar et Oued Tessaout) ;

- Les nappes de la région El Jadida-Safi : il s'agit essentiellement des nappes du Sahel (bande côtière) et des Doukkala qui en constituent l'arrière-pays ;

- L'ensemble « Sahel-Doukkala-Abda » : la prolongation vers le Sud-Ouest des Sahel-Doukkala, qui constitue la plaine des Abda, et les collines des Mouissate qui en constituent l'arrière-pays (et la limite Ouest du bassin de la Bahira), sont souvent considérées comme constituant une unité séparée ;

- La nappe de la Chaouïa côtière, située entre la rive droite de l'Oued Oum Er Rbia et l'agglomération de Casablanca.

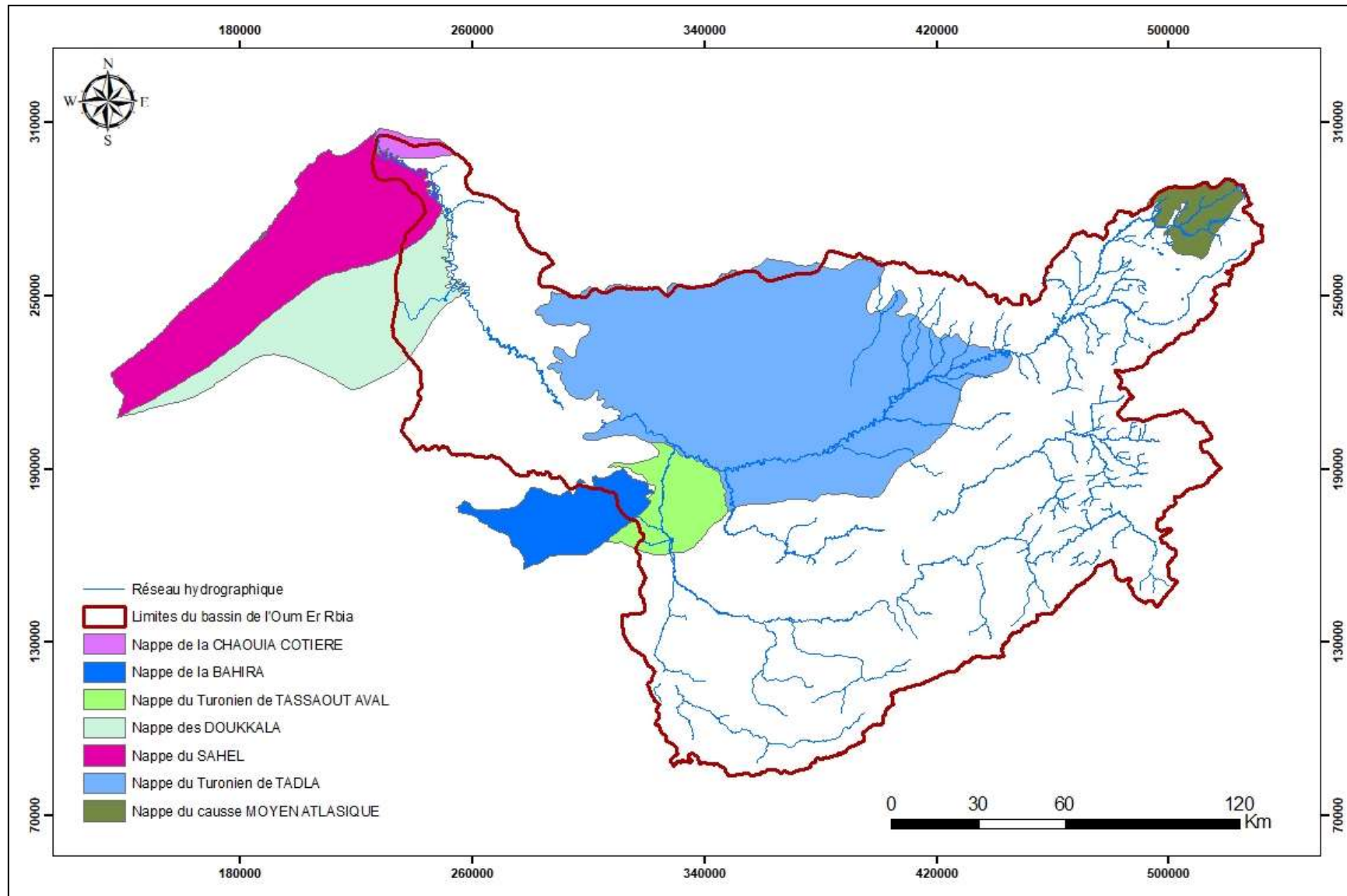


Figure 59: Les nappes du bassin de l'Oum Er Rbia

6. Hydrologie

L'oued Oum Rbia s'écoule sur la plaine septentrionale du Moyen Atlas. Le point culminant du bassin du Haut Oum Er Rbia est Jbel Hayane (2410 mNGM). Cet Oued est formé par l'Oued Fellat qui prend naissance vers 1800 mNGM d'altitude et reçoit l'Oued Admer Izem sur sa droite. Après la confluence de l'Oued Fellat et l'Oued Bou Ijdji grossi par un groupe de sources vaclusiennes, l'Oued prend le nom de l'Oum Rbia. Ces sources qui jaillissent à une altitude voisine de 1300 mNGM, assurent la pérennité des apports. (Figure 60)

Après cette confluence, l'Oued Oum Rbia prend une direction est – Ouest puis débouche à Tanfnit sur le plateau central où il dessine un coude pour se diriger vers le Sud-Ouest avant de traverser la ville de Khénifra dans une direction Nord-Sud.

Son embouchure se situe au niveau de la ville d'Azemmour, à 16 km au Nord d'El Jadida. Avec ses 34 735 km², le bassin de l'Oum Er Rbia constitue, après celui du Sebou, le deuxième ensemble hydrographique du Maroc. Il s'allonge d'Ouest en Est sur 400 km entre El Jadida et Khénifra. Sa particularité est de présenter un réseau « en peigne » ; pratiquement dépourvu d'affluents rive droite, le cours du fleuve vient buter au Nord contre les grandes zones des plateaux de Settat, Khouribga et des Béni-Meskine. En revanche, il draine tout le versant Nord de l'Atlas par une série de puissants affluents en rive gauche que sont l'Oued Srou, l'Oued El Abid et l'Oued Tessaout.

Les apports proviennent de l'Oum Rbia et de ses principaux affluents : Tessaout, Lakhdar et El Abid. Les apports de nombreuses sources associés à ceux de la fonte des neiges garantissent un étiage très soutenu pour l'Oum Rbia faisant de lui le cours d'eau le plus régulier du Royaume.

Les apports moyens à l'embouchure de l'oued Oum Rbia sont importants. Néanmoins, les études récentes des ressources en eau ont montré une tendance à la baisse des apports du bassin depuis 1941 d'environ 42 Mm³/an.

La moyenne des apports globaux sur la période 1935-1980 est de 3,8 milliards de m³/an. Elle n'est plus que de 2,3 milliards de m³ sur les 20 dernières années (1980 – 2007). Le réseau hydrographique et peu développé dans la zone côtière de Safi-El Jadida ; les apports d'eau de surface sont de l'ordre de 40 Mm³/an.

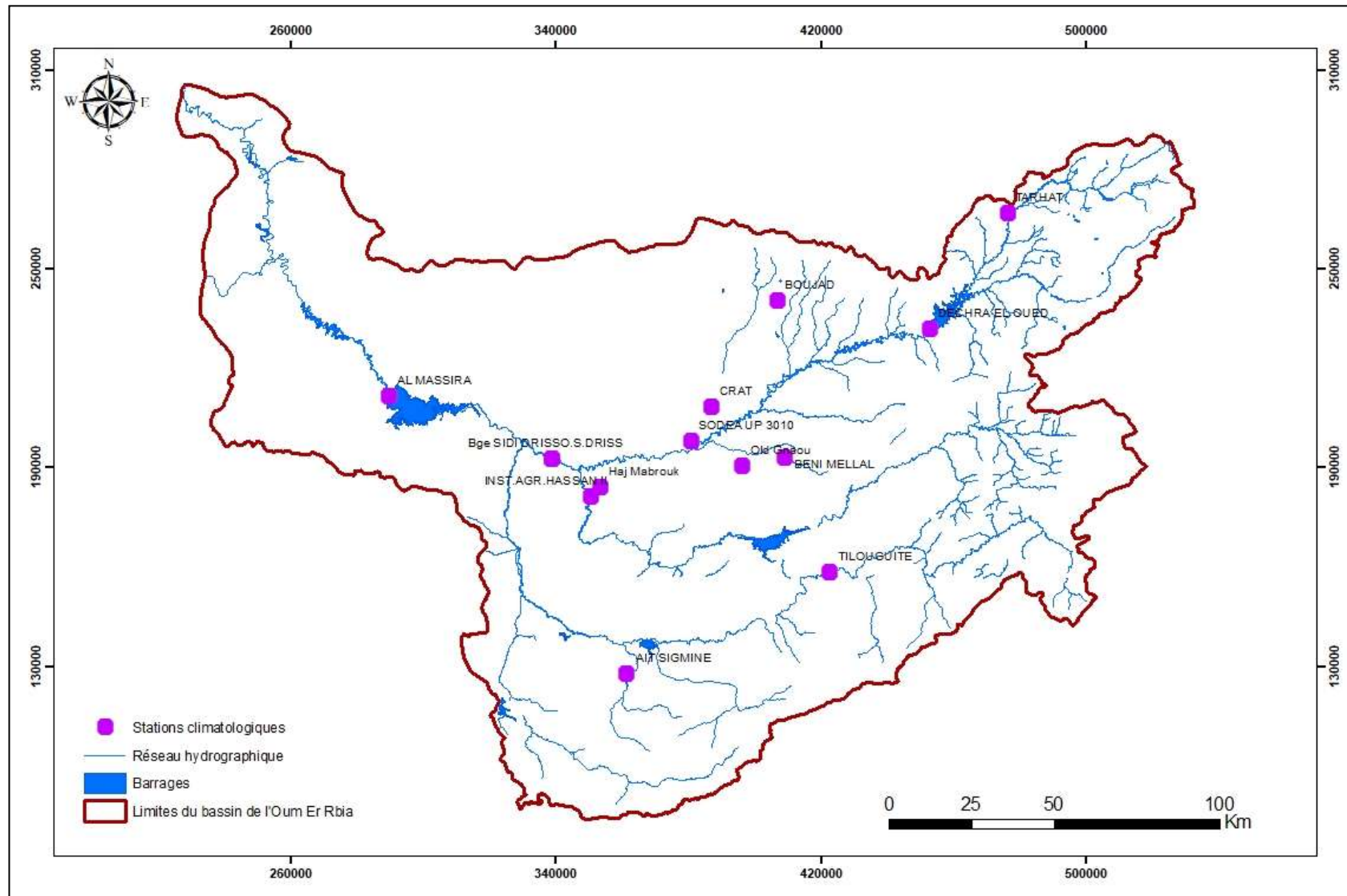


Figure 60: Le réseau hydrographique d'Oued Oum Er Rbia

Chapitre II : Identification du stockage du carbone dans le bassin de l'Oum Er Rbia par le modèle InVEST

1. Introduction

Le réchauffement climatique est l'une des conditions environnementales les plus graves auxquelles la société humaine est actuellement confrontée, et les émissions de carbone et l'effet de serre sont considérés comme des facteurs importants du climat (Peck, 2005). Les changements dans l'utilisation des terres provoquent des changements dans le cycle du carbone des écosystèmes terrestres, ce qui à son tour affecte le bilan carbone régional (Chen et al., 1983). Ainsi, le maintien de la fonction de ce service pour l'écosystème est crucial. L'évaluation scientifique et la prévision de l'influence des changements de paysage sur le carbone dans l'écosystème peuvent fournir des données sur le transfert accru des émissions de gaz à effet de serre (Zeng et al., 2014).

Le changement de l'occupation du sol est l'un des principaux facteurs influençant le stockage du carbone dans les écosystèmes (Chavan et al., 2020). Le Stockage du carbone dans le bassin d'Oum Er Rbia, l'un des bassins importants du Maroc est affecté par de nombreux facteurs tels que le changement de l'occupation du sol.

Afin de déterminer cette influence, nous utiliserons les données de la classification des sols MCD12Q1, les données sur la biomasse, le carbone du sol et le carbone humus. Pour la vérification des paramètres, nous avons appliqué le modèle InVEST pour simuler le stockage du carbone dans l'écosystème et les effets des facteurs de conduite.

2. Le modèle InVEST

Le modèle InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) fournit une visualisation dynamique des fonctions de service d'un écosystème à travers le temps et l'espace. Le module carbone InVEST peut simuler les niveaux de carbone dans quatre bassins de carbone différents, à savoir la biomasse hors sol, la biomasse souterraine, le carbone du sol et le carbone humus, à partir des données d'occupation du sol.

Le processus de séquestration et de libération du carbone n'est pas définitivement pris en compte dans le module, mais le module peut estimer de manière fiable le stockage du carbone dans le paysage. La sortie du module carbone InVEST pour le stockage du carbone dans le paysage peut être affichée visuellement, et sa dynamique est pilotée par LUCC. À partir de ce calcul, la valeur du stockage du carbone et les effets du LUCC sur la réglementation des services écosystémiques sont obtenus. Cette méthodologie a été largement utilisée dans la recherche sur le stockage du carbone. En outre, ce modèle nécessite moins de données d'entrée et produit plus de données de sortie que les autres modèles.

Le modèle InVEST peut utiliser plusieurs modules sur plusieurs échelles, et il peut analyser de nombreuses situations. Basé sur les variations spatiales et temporelles de l'utilisation/couverture des terres, le modèle InVEST peut être utilisé pour simuler des processus dans les écosystèmes terrestres, y compris le stockage du carbone, la récolte biologique, le débit d'eau, la purification de l'eau et la qualité de l'habitat, ainsi que pour évaluer la conservation des sols et les changements dynamiques dans les fonctions des services écosystémiques. (Jiang et al., 2017)

Le module de puits de carbone du modèle InVEST suppose que l'intensité carbone (c.-à-d. le carbone par unité de surface) de chaque type de couverture terrestre demeure inchangée et que la quantité de carbone change linéairement au fil du temps. Les hypothèses et l'algorithme simplifié du modèle InVEST rendent nécessaire d'améliorer la simulation du stockage du carbone et de la précision des transferts afin que le modèle soit adapté aux puits couvrant de vastes zones et à simuler rapidement les caractéristiques dynamiques d'une zone à travers l'espace et le temps. (Liang et al., 2017)

3. Modélisation des changements de couverture terrestre

Le changement de l'occupation du sol est devenu l'un des principaux enjeux du développement durable et des changements environnementaux mondiaux (Bhatti et al., 2019). L'occupation du sol est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement. .

Pour cette étape Nous avons utilisé les données de l'occupation du sol par MODIS pendant la période de remorquage 2009 (Figure 61) et 2018(Figure 62), MODIS est une couche mondiale de données de classification de la couverture terrestre produite chaque année depuis 2001, pour chaque année, il existe cinq programmes de couverture terrestre, élaborés par différents groupes de recherche. Les données sont distribuées par l'USGS à une résolution de 500 m dans les tuiles de grille MODIS standard. Ces tuiles utilisent la projection sinusôïde et couvrent environ 1200 x 1200 km ($\sim 10^\circ \times 10^\circ$ à l'équateur)

Nous utiliserons le système mondial de classification de la végétation du Programme international de géosphère-biosphère (IGBP), qui est principalement divisé en 17 classes. Cet ensemble de données est fourni par l'International Scientific & Technical Data Mirror Site, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences (Figure 61)

Les outils manipulés aux fins de la cette étude sont : logiciel SIG, ARCGIS 9.2 pour la numérisation et la création de cartes d'utilisation des terres et de cartes de changement.

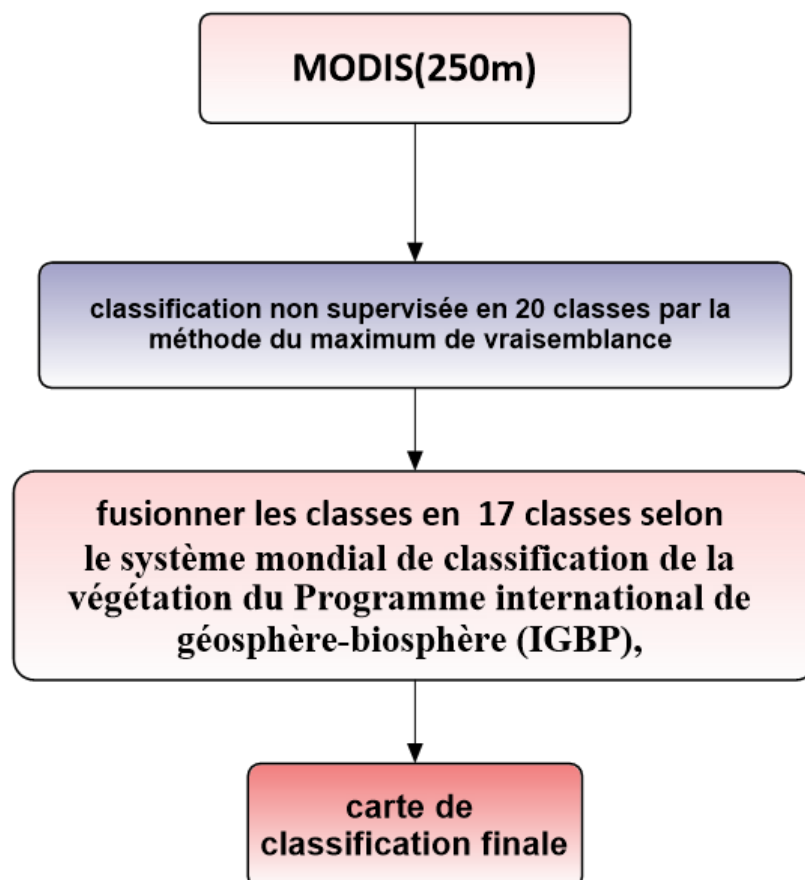
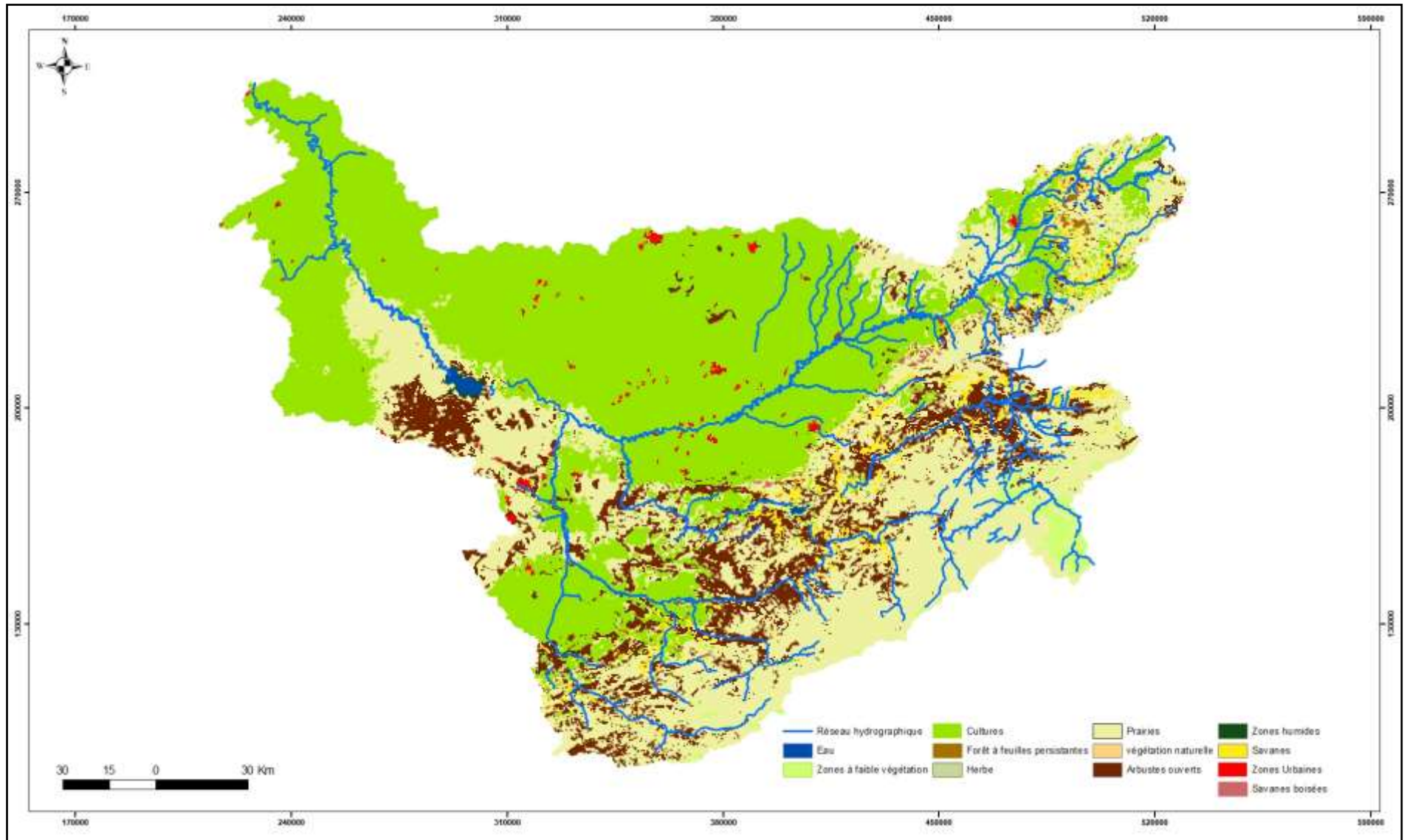


figure 61:Organigramme de la procédure de classification des données MODIS



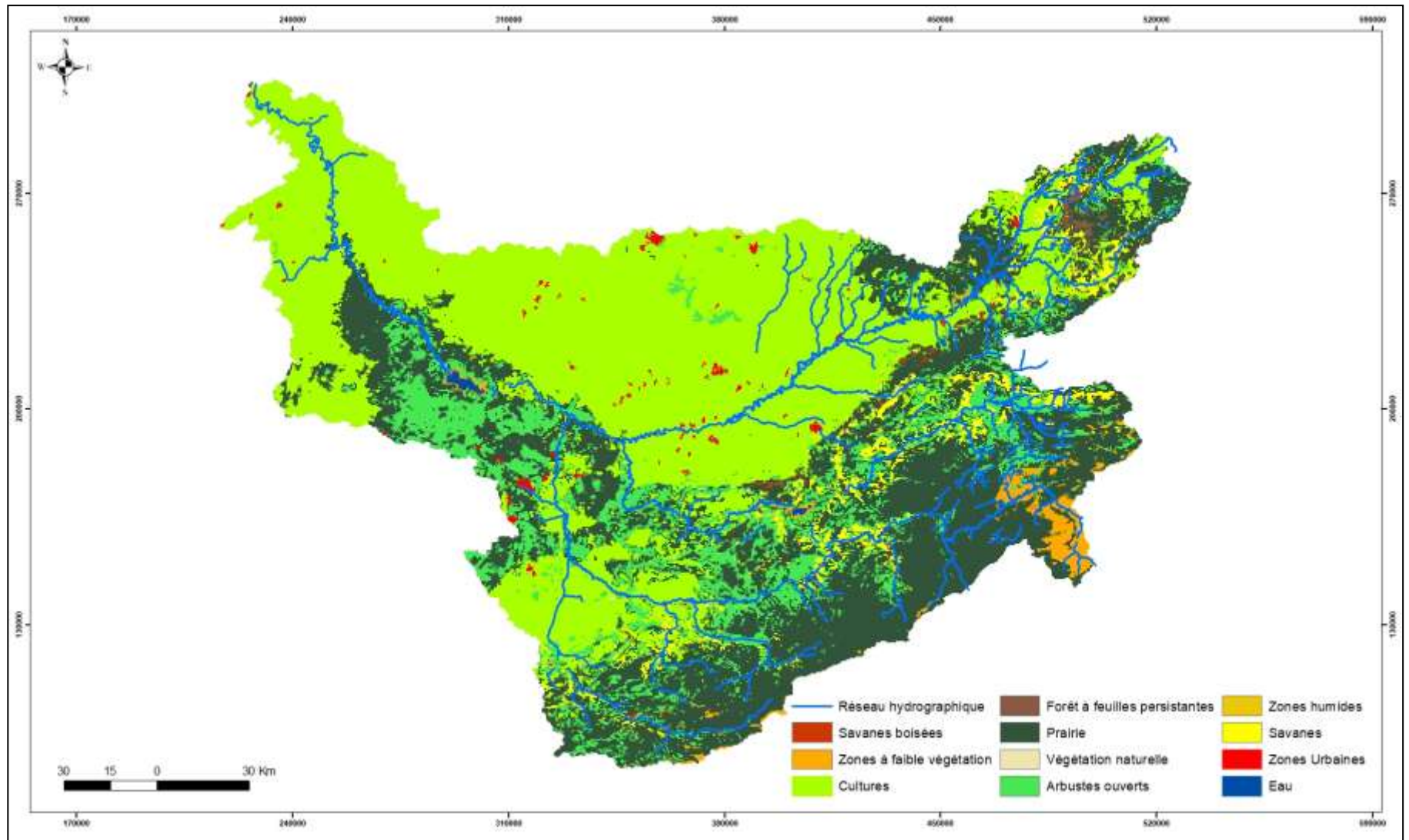


Figure 63: La carte de l'occupation du sol du bassin de l'Oum Er Rbia pour l'année 2018

Le tableau 9 indique que le bassin de l'Oum Er Rbia a connu des changements dans l'utilisation des sols, dans la période entre 2009 et 2018, ou on peut remarquer que la superficie de la culture et des zones urbaines a augmenté, avec une diminution de la superficie de la végétation naturelle et les eaux de la surface.

Tableau 9: L'occupation du sol dans le bassin d'Oum Er Rbia en 2009 et 2018 (unité : ha)

Type d'occupation du sol	2009	2018
Forêt à feuilles persistantes	7660	8672
Arbustives ouvertes	417110	471273
Savanes boisées	6898	4940
Savanes	94851	119172
Prairies	1223598	1211628
Zones humides	1721	1701
Cultures	1664077	1601656
Zones Urbaines	16764	16953
Végétation Naturelle	317	173
Zones a faible végétation	50458	49397
Eau	7184	5148

4. Modèle de fonction de stockage du carbone et son changement

Les changements dans l'utilisation et la couverture des terres ont une influence complexe sur le système écologique, car les plantes vertes absorbent le CO₂ de l'atmosphère par photosynthèse. Le carbone est stocké dans le feuillage, les tiges, les systèmes racinaires et, surtout, dans le tissu ligneux des principales tiges des arbres. En raison de la longue durée de vie de la plupart des arbres et de leur taille relativement importante, les arbres et les forêts sont de véritables réserves de carbone.

Dans l'ensemble, les forêts stockent de 20 à 100 fois plus de carbone par unité de terre que les terres cultivées et jouent un rôle clé dans la régulation des niveaux de carbone atmosphérique. La capacité d'absorption et de stockage du carbone des forêts est très variable. Les facteurs qui contrôlent les taux d'absorption du carbone comprennent la température, les précipitations, le peuplement, le sol, la pente, l'altitude, les conditions du site, les taux de croissance et l'âge. En général, les forêts fermées ont une plus grande capacité de stockage de carbone que les forêts ouvertes ou les zones boisées claires. Les forêts non perturbées stockent plus de carbone que les forêts dégradées. Les forêts très humides ou humides stockent plus de carbone que les forêts sèches ou semi-arides et les peuplements matures en stockent plus que les jeunes formations.

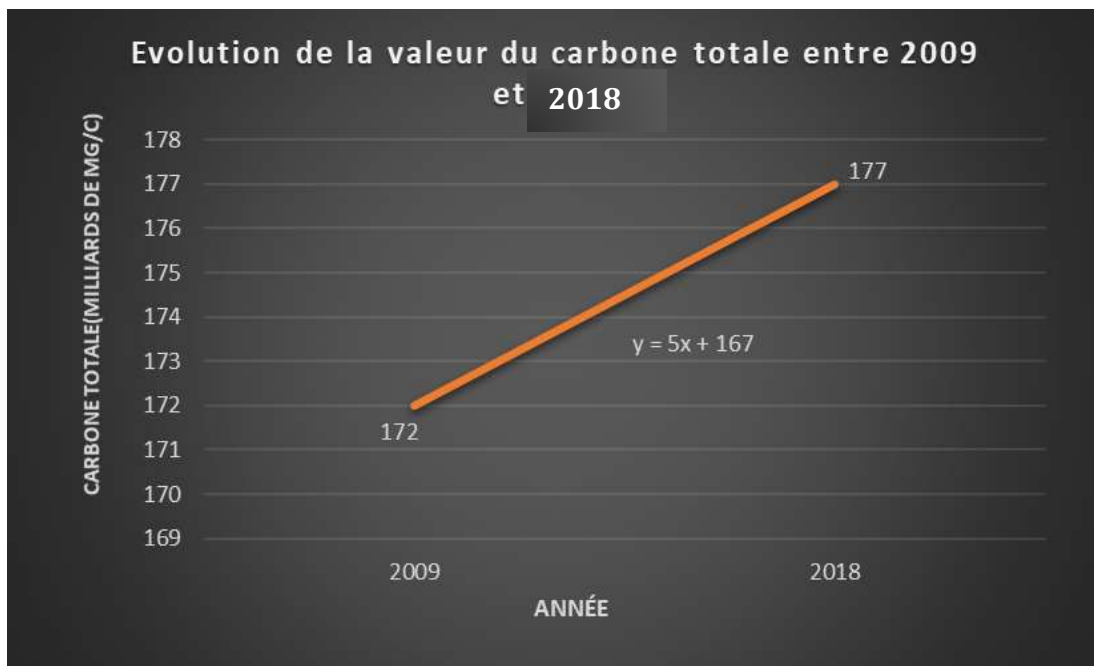
Dans l'étude, le stockage de carbone dans le bassin d'Oum Er Rbia en 2009 et 2010 est passé de 172 milliards de t/C en 2009 à 177 milliards de t/C en 2009, ce qui représente une augmentation totale de 5 milliards de t/C. (Tableau 10)

Le bassin d'Oum Er Rbia est un terrain complexe et des conditions climatiques diverses les facteurs climatiques écologiques varient sur les échelles spatiales horizontales et verticales, influençant ainsi les distributions horizontales et verticales de la couverture terrestre. (Figure 65)

Le stockage du carbone a diminué dans les régions du nord et du centre, alors qu'il a augmenté dans les régions du sud. (Figure 66)

Tableau 10: La valeur du carbone totale pour l'année 2009 et 2018

Année	La valeur du carbone totale
2009	172 milliards de Mg/C
2018	177 milliards de Mg/C



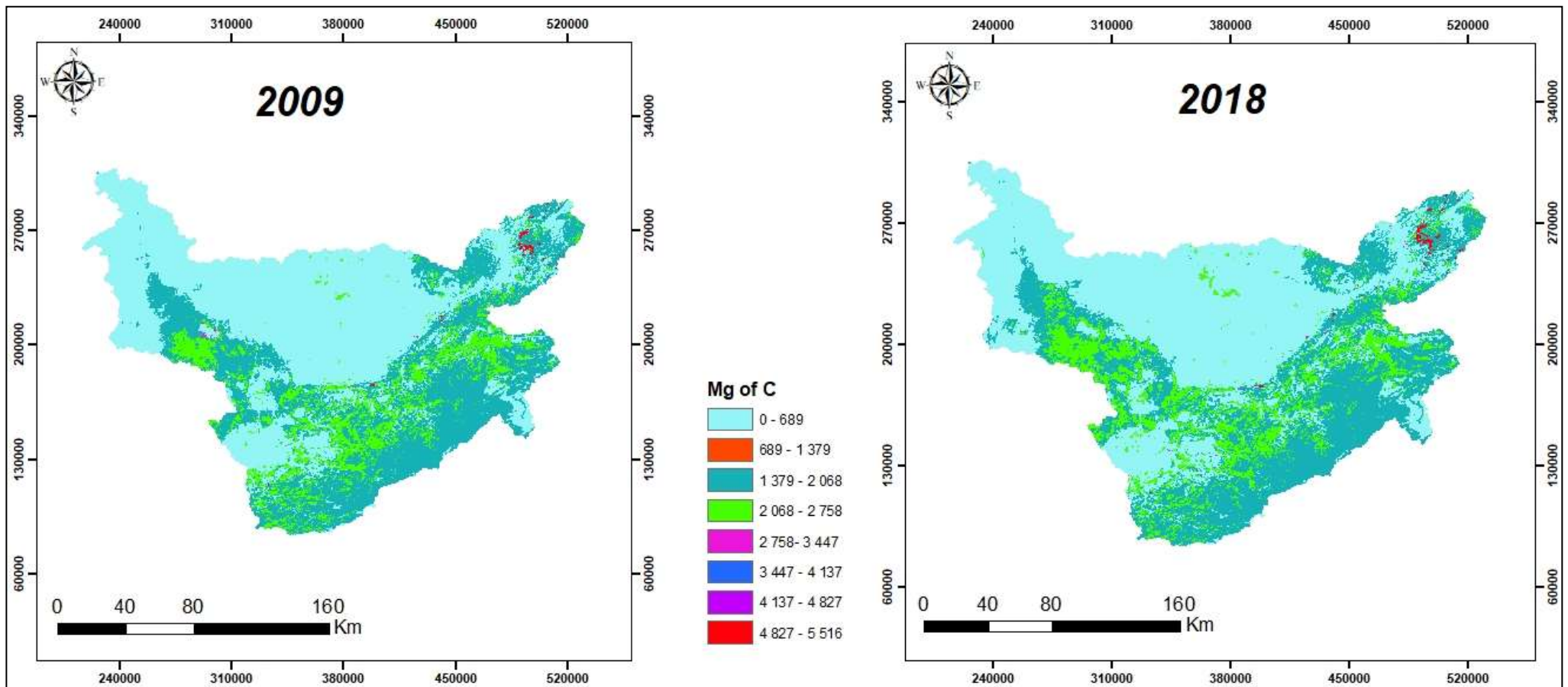


Figure 65: La quantité du Carbone totale dans le bassin de l'Oum Er Rbia pour l'année 2009 et 2018

Chapitre III : Identification des changements climatiques dans le bassin de l'Oum Er Rbia

1. Tendances climatiques observées dans le bassin de l'Oum Er Rbia

Quelques études ont porté sur l'impact du changement climatique mondial sur les précipitations et les températures régionales au Maroc et en Afrique du Nord (par exemple, (Born et al., 2008),(Driouech et al., 2009), la conclusion générale est que la température a augmenté au cours des dernières décennies et qu'elle augmentera à l'avenir. L'ampleur des augmentations varie en fonction des études, notamment en fonction des modèles et des données de forçage utilisés par les auteurs, ainsi que des périodes d'adressage, et les précipitations ont subi une diminution.

1.1. La variabilité des précipitations de 1970 à 2000

Dans cette partie de l'étude pour identifier les tendances de précipitations dans le bassin de l'Oum Er Rbia, on a utilisé les données de CMIP5 qui nous donne l'accès à une historique des données climatiques de 1970.

La figure 66 montre la carte des tendances des précipitations à l'échelle mensuelle de 1971 à 2000. La couleur remplie représente les montants des changements de tendance, à l'échelle mensuelle, les changements des précipitations n'étaient pas significatifs et varient de manière importante d'une zone à l'autre. Par contre, les précipitations de printemps ont enregistré une baisse significative dans la partie Nord et sud du bassin au taux de 0.5 mm/jour par décennie.

Donc on fait appel à une analyse statistique des précipitations pour identifier l'évolutions des précipitations dans le bassin de l'Oum Er Rbia.

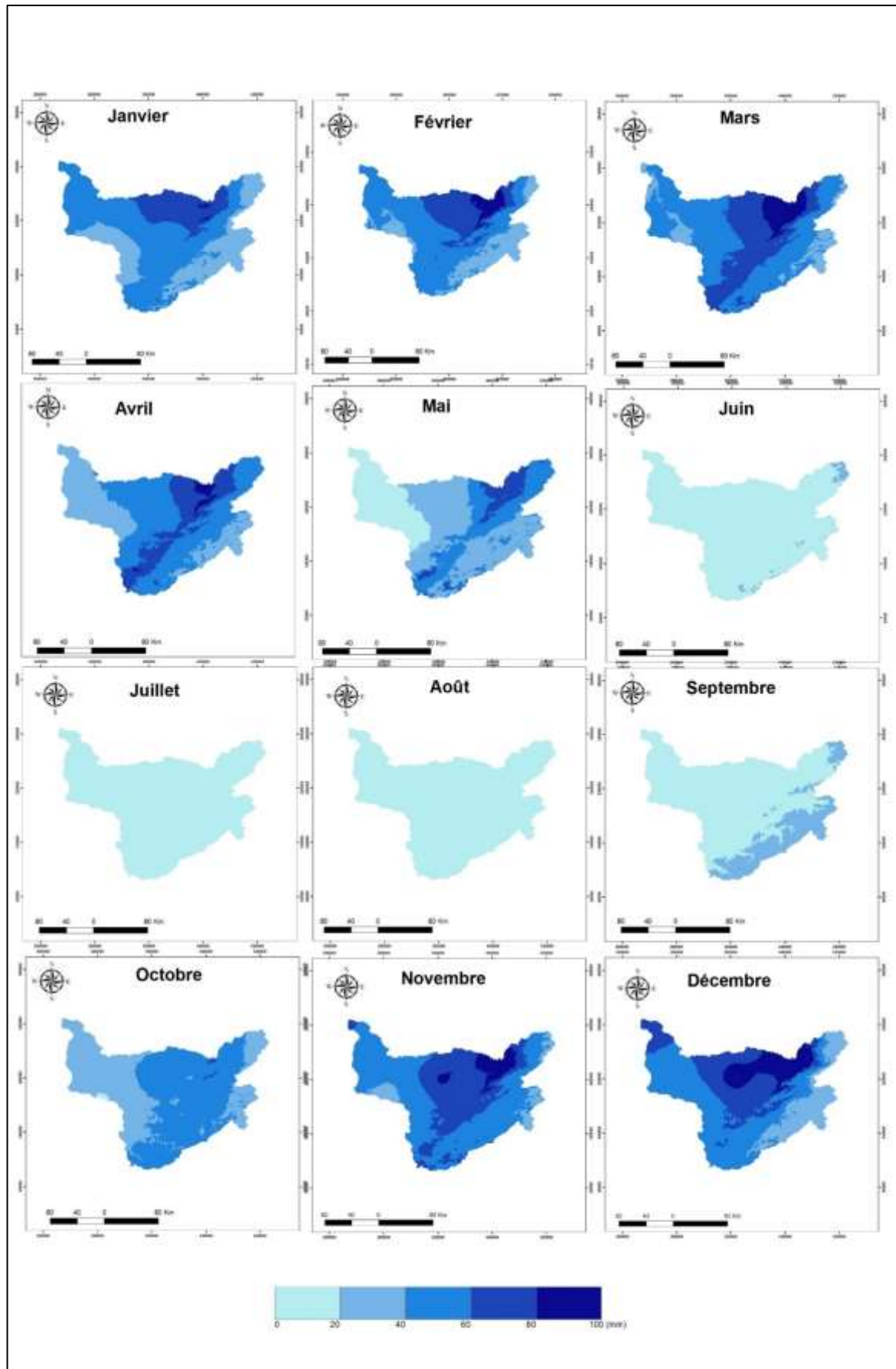


Figure 66: Distribution des précipitations mensuelles dans le bassin de l'Oum Er Rbia (1970-2000)

1.2. Analyse statistique des précipitations

1.2.1. Introduction

L'analyse des précipitations mesurées dans différentes stations météorologiques est généralement effectuée sur des années bien définies (Hien, 1995)

Les trois critères d'évaluation de la qualité d'un réseau pluviométrique sont les suivants

- La répartition : le réseau doit être spatialement homogène afin de ne pas favoriser une région.
- La densité : les stations doivent couvrir le bassin de l'amont à l'aval. Pour ces stations, il est important de maintenir les interprétations aussi correctes que possible ;
- La durée : le choix est fait pour celles dont les périodes de mesure sont les plus longues (25 à 50 ans).

Les données pluviométriques collectées auprès de l'agence hydraulique de l'Oum Er Rbia sont des données ayant subi en principe des vérifications préalables avant d'être fournies aux utilisateurs.

Dans cette partie qui est relatif à l'analyse statistique des précipitations, nous traiterons successivement les étapes suivantes :

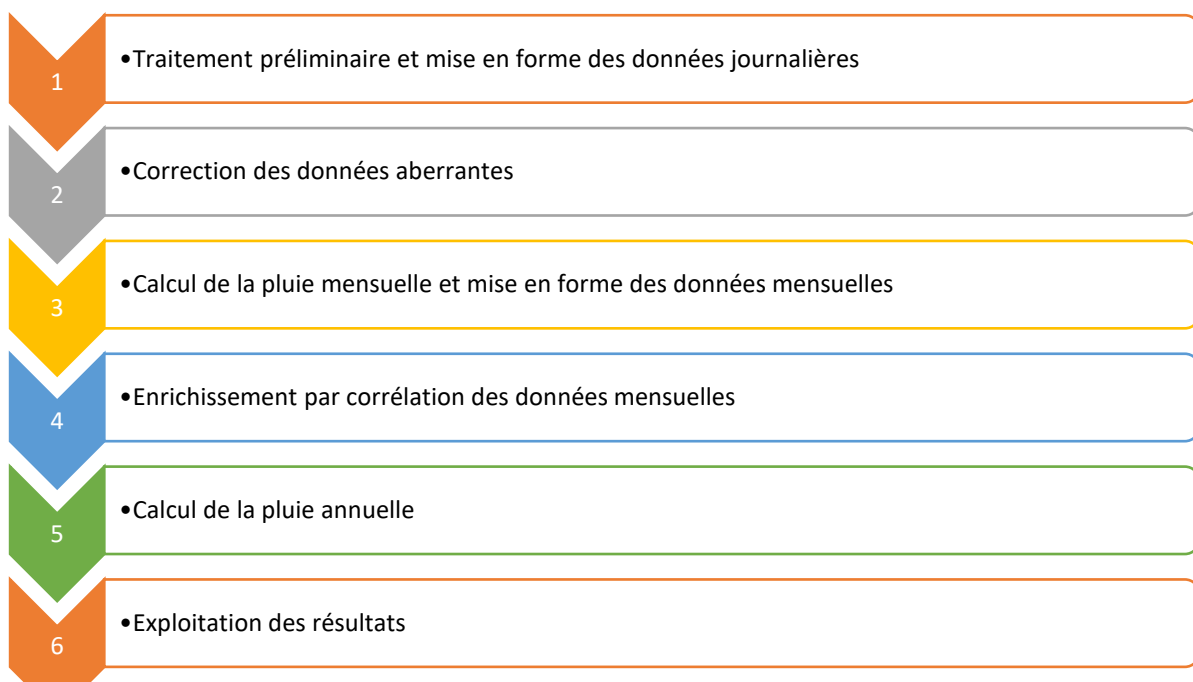


Figure 67: La démarche de l'étude statistique des précipitations

1.2.2. Étapes pour l'extraction des sub bassin du bassin d'Oum Er Rbia

Dans tous les cas, l'extraction des bassins a suivi la procédure décrite par l'algorithme de O'Callaghan & Mark, 1984 Les différentes étapes de cette procédure sont toutes des fonctions implémentées dans ArcMap(Figure 68). Ces différentes fonctions ont été réalisées sur ArcMap par le :

- Remplissage des "puits" du MNT (FILL) : Cette fonction permet de localiser les dépressions fermées (réelles ou créées par interpolation lors de la construction du MNT) et de les remplir ;
- Calcul des directions d'écoulement ;
- Calcul du taux d'accumulation pour chacune des cellules (nombre de cellules amont ;
- Choix d'un seuil d'accumulation pour l'individualisation du réseau hydrographique ;
- Les réseaux hydrographiques du MNT sont l'individualisation des cours d'eau en terrain plat.

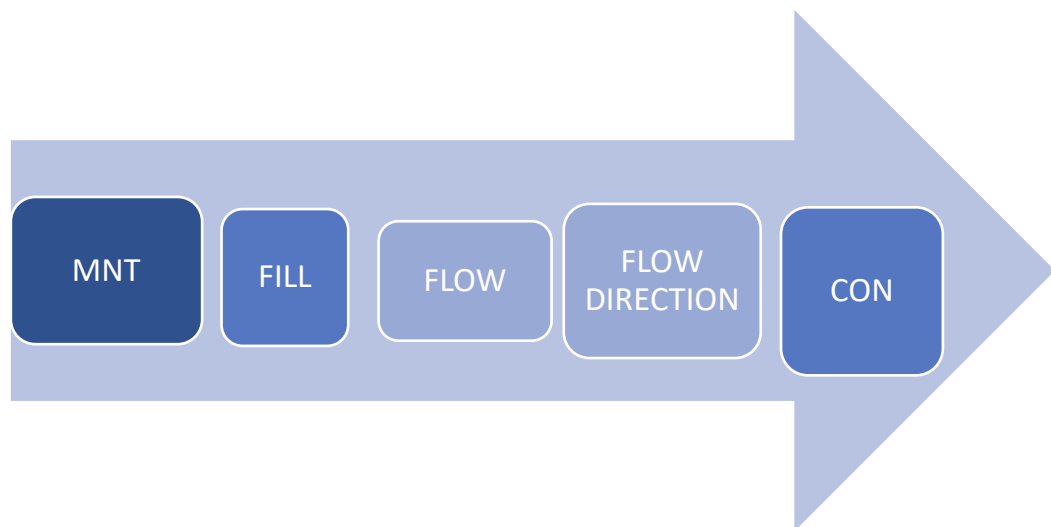


Figure 68:Les étapes d'extraire les sub bassins

Après l'application de la démarche d'extraction on a pour résultat 5 grands sous- bassins (zones homogènes) (Tableau 11) qui sont les mêmes que ceux pris en compte dans les études du Plan Directeur d'Aménagement :

Tableau 11:les sous bassins de l'Oum Er Rbia

Abréviation	Sou bassin
TS	(Oued Tessaout)
HO	(Haut Oum Er Rbia)
AB	(Oued El Abid)
CO	(Oum Er Rbia central)
BO	(Oum Er Rbia Bas)

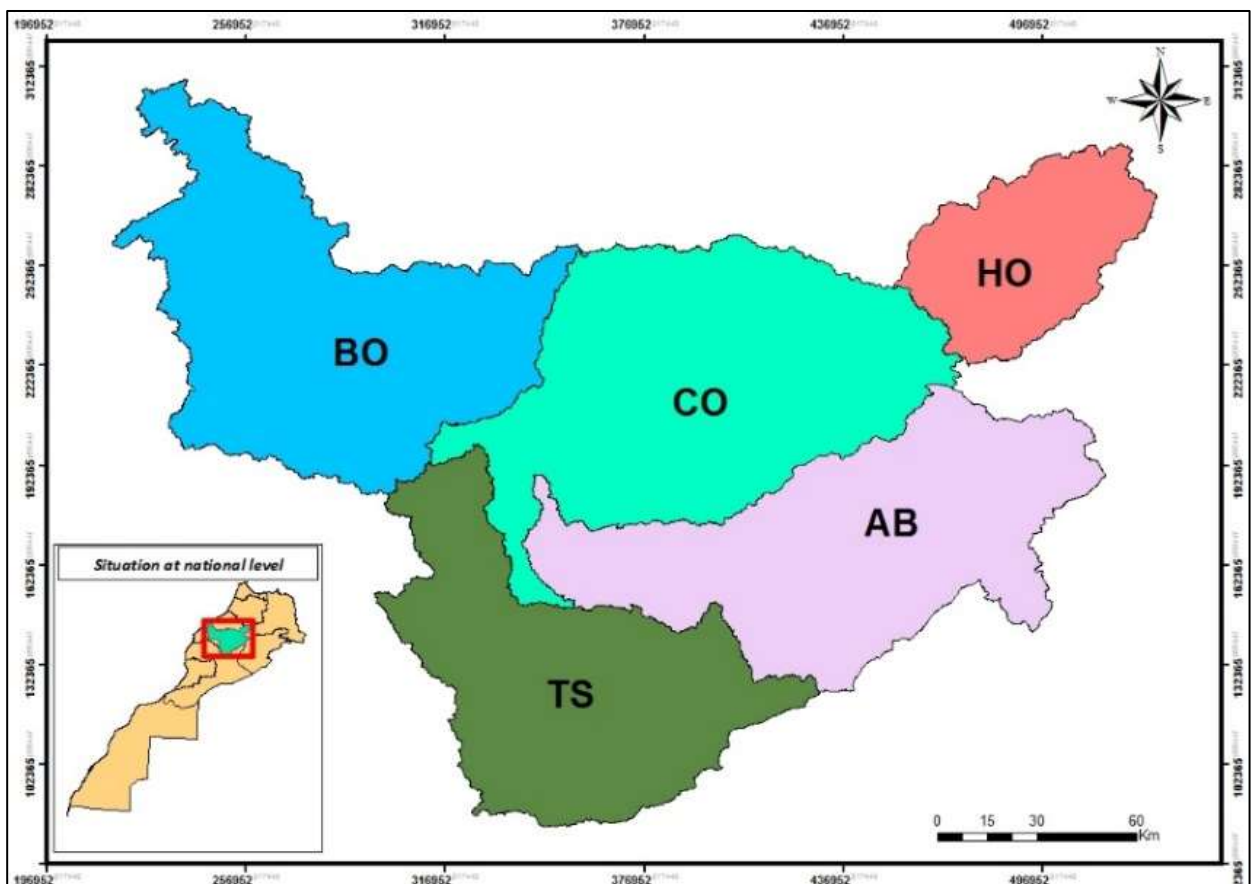


Figure 69:les sous bassins de l'Oum Er Rbia

Le bassin de l'Oum Er Rbia, l'un des plus grands bassins du pays, s'étend sur une superficie de 35 000 km² qui est plus grande que la superficie de Portugal. On ne peut pas appliquer cette démarche à la totalité du bassin, donc on a décidé d'extraire les sous-bassins de l'Oum Er Rbia et d'appliquer la démarche dans deux sous-bassins Oum Er Rbia central et Tessaout.

1.2.3. Oum Er Rbia central et Tessaout

1.2.3.1. Calcul et complétion des données mensuelles

Après le traitement préliminaire, la mise en forme et la critique des données journalières, on a procédé au calcul de la pluie mensuelle brute et à la mise en forme spécifique pour faciliter les calculs statistiques des données.

Les stations, dont on dispose seulement de données mensuelles, ont été ajoutées aux séries calculées pour avoir un bon réseau de stations pluviométriques et rassembler suffisamment d'informations afin d'enrichir les données brutes.

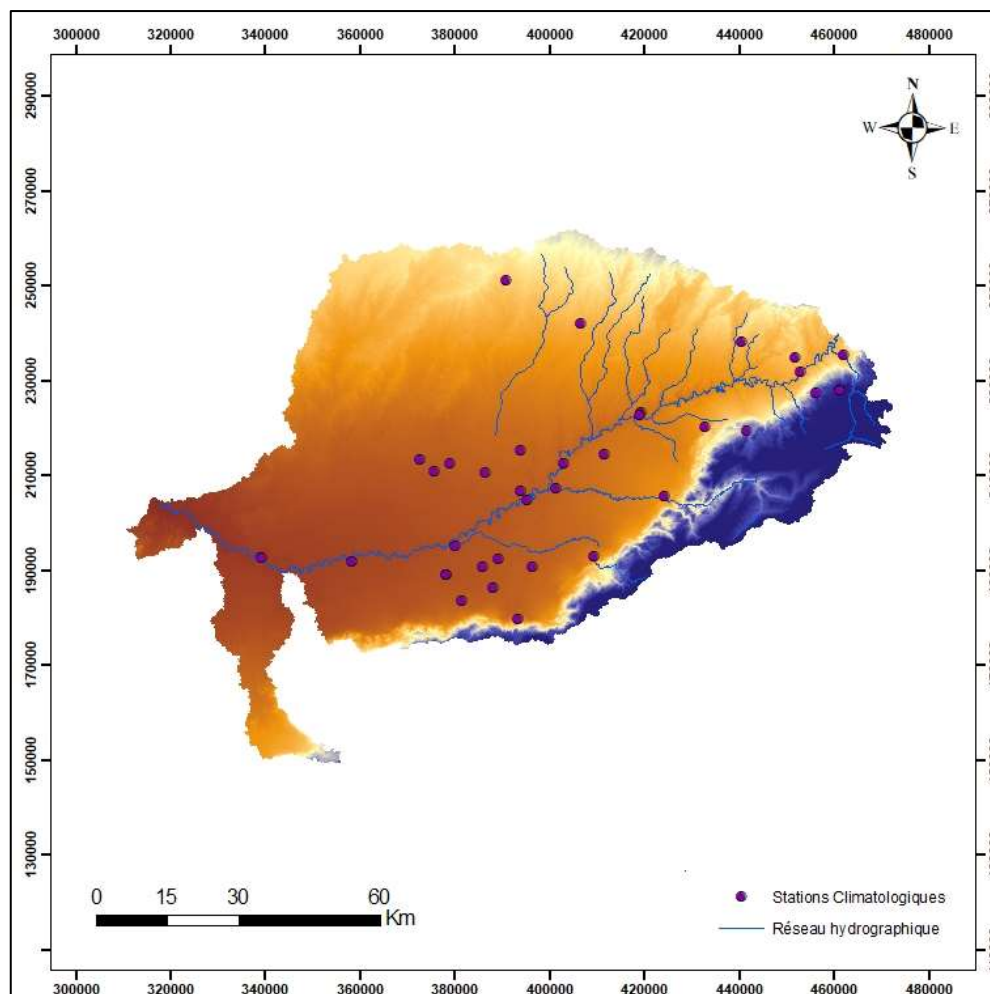


Figure 70: localisation des stations climatiques dans le sous bassin Oum Er Rbia central

Les stations retenues sont réparties par sous bassin comme suit :

- Tessaout :13 postes (Figure 71)
- Oum Er Rbia central:37 postes (Figure 70)

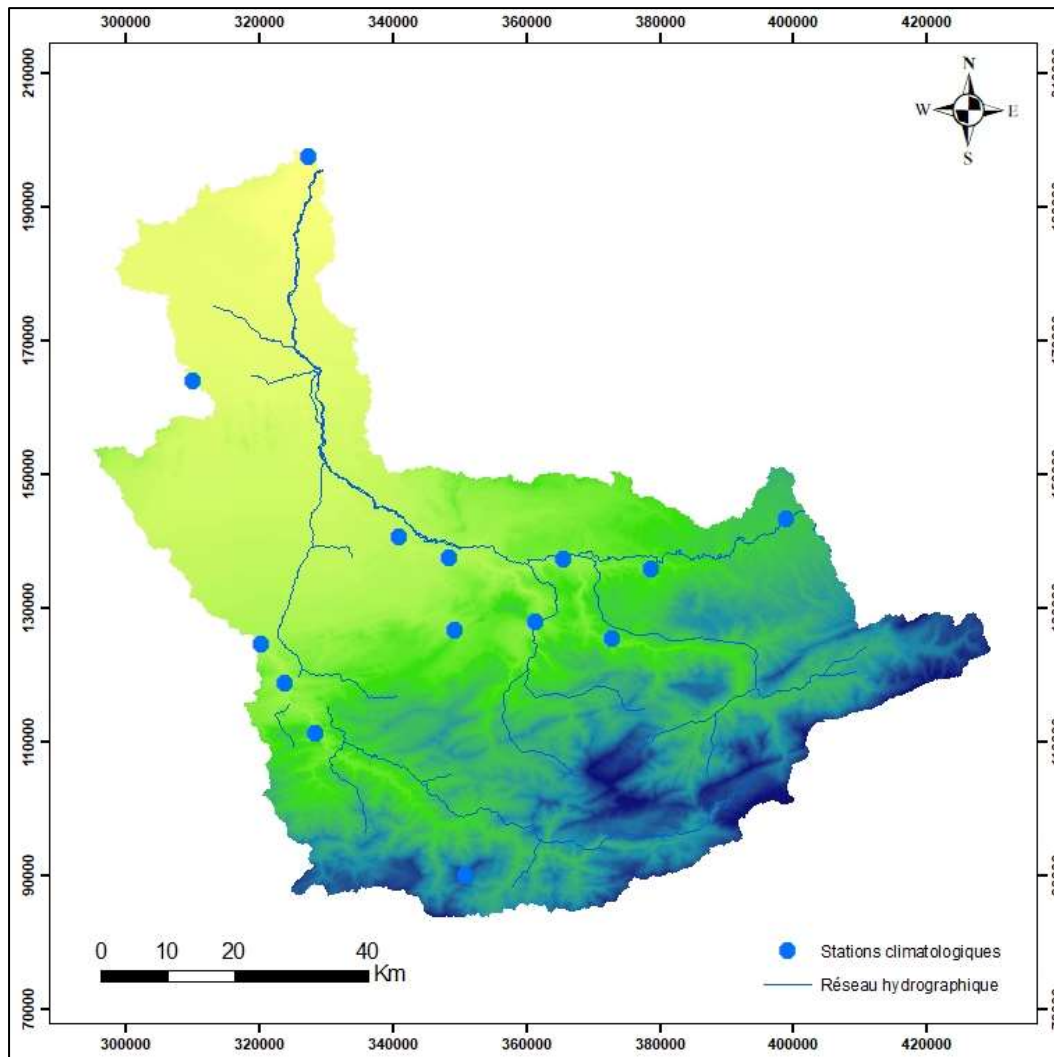


Figure 71: localisation des stations climatiques dans le sous bassin Tessaout

La répartition spatiale des différentes stations (Figure 70 et Figure 71) montre qu'il y a une bonne densité et une bonne répartition des stations pluviométriques au haut à l'amont et au centre du deux sous bassins. (Annexe 3)

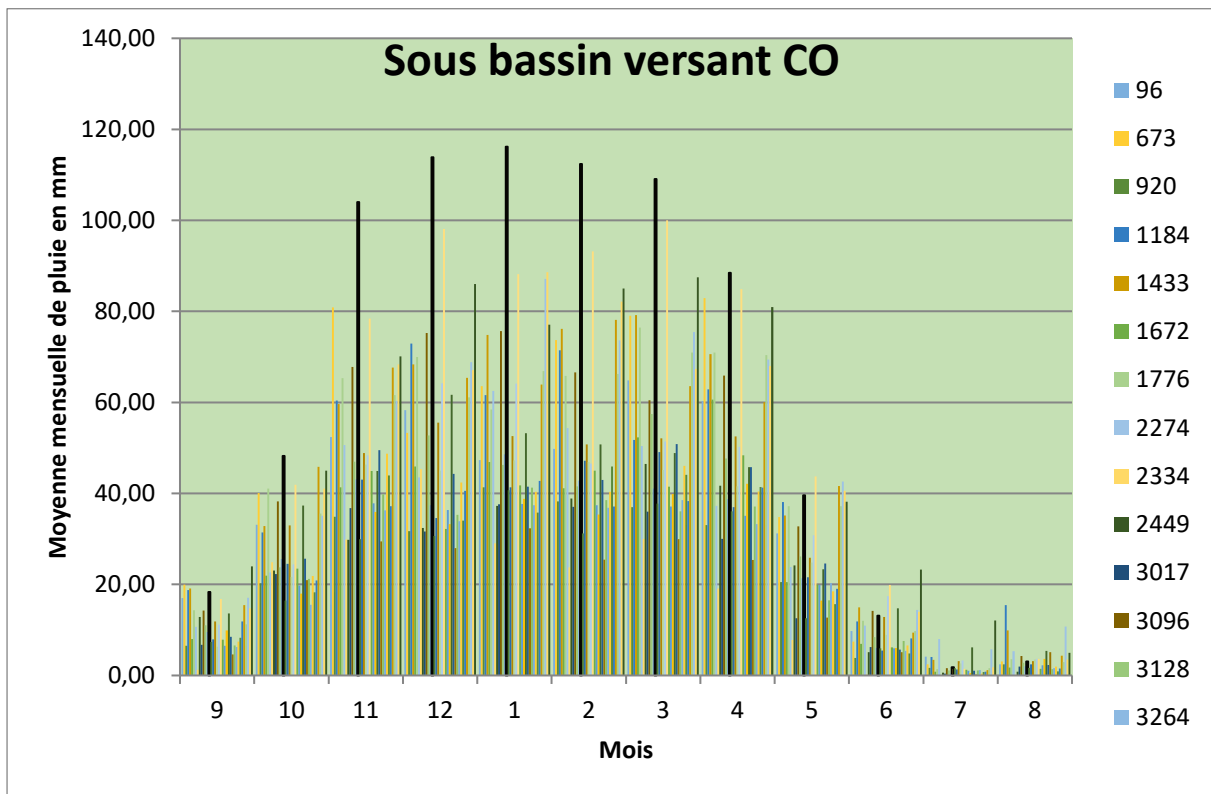


Figure 73: Moyennes mensuelles brutes des stations pluviométriques du sous bassins Oum Er Rbia Central (1932-2015)

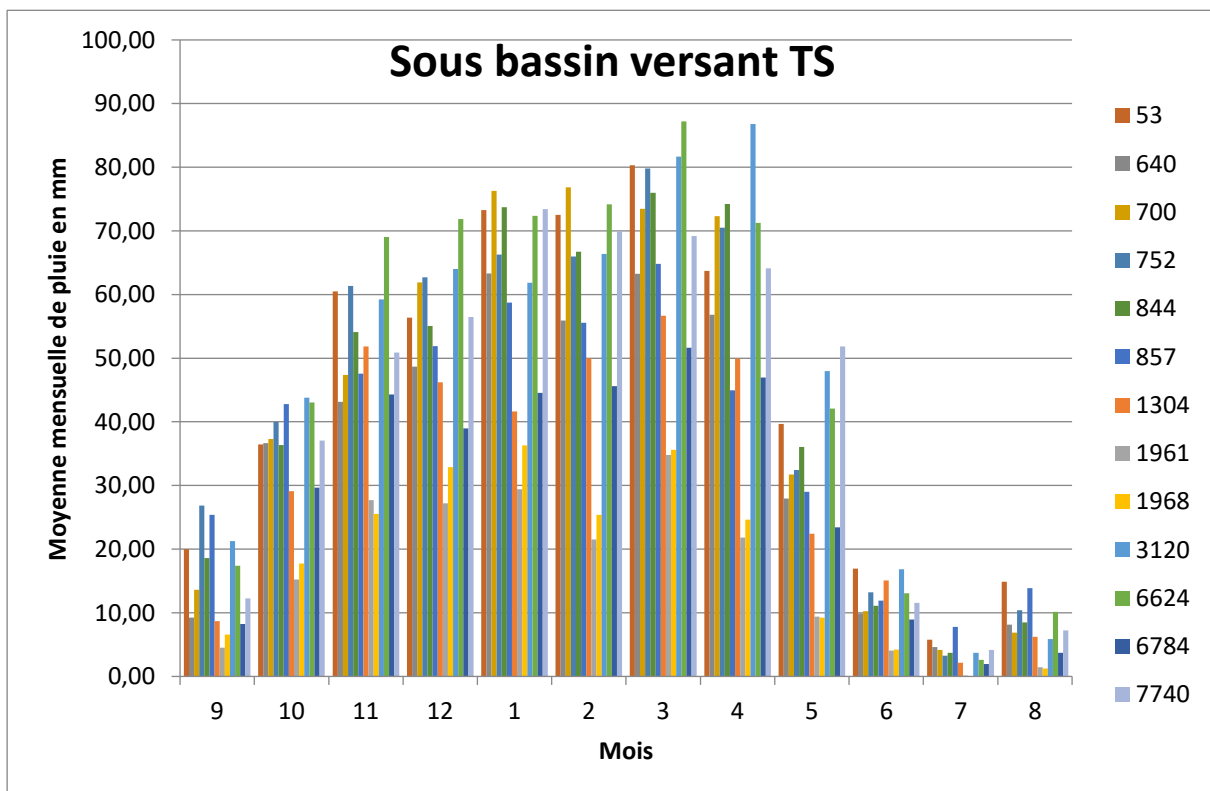


Figure 72: Moyennes mensuelles brutes des stations pluviométriques du sous bassins Tessaout (1932-2015)

La période de référence est de 80 ans, de 1935 à 2015, L'étendue des périodes pluvieuse et sèche a été déterminées par sous bassin sur la base des graphiques des graphiques 72 et 73, qui présentent les pluies moyennes mensuelles de tous les postes. Ces graphiques montrent que, pour les deux sous bassins, la période pluvieuse est comprise entre le mois de Novembre et le mois d'Avril, alors que la période sèche dure de Mai à Octobre.

1.2.3.2. Calcul des pluies annuelles

Il est également intéressant d'ajuster une courbe de tendance d'évolution sur les moyennes pluviométriques annuelles. Bien qu'il faille être prudent sur l'interprétation des coefficients de la droite de régression, on peut néanmoins constater que la pluviométrie, sur les 50 dernières années, a eu tendance à baisser en particulier au niveau des sous bassins :

- Tessaout : 7mm / an ;
- Oum Er Rbia central: 6mm / an.

Les tendances climatiques observées, calculées sur la période 1935-2015 (Figure 74 et 75) dans le sous bassin Oum Er Rbia central et Tessaout indiquent que :

- La pluviométrie interannuelle sur la période de 1935 à 2007, montre que la pluie moyenne annuelle très faible.
- La dégradation de la pluviométrie durant les 27 dernières années causées principalement par le réchauffement global de la terre qui a entraîné la succession des années sèches sur l'ensemble du bassin versant qui s'étend entre 1980 et 1995.
- La pluviométrie passe d'un intervalle de [275 – 1025] mm sur la période de 1935 à 1980 à un intervalle [175 – 625] mm sur la période 1980 à 2015.
- Les calculs de la pluviométrie moyenne interannuelle totale sur l'ensemble du bassin versant sur les deux périodes (de 1935 au 1980 et de 1980 au 2015) montrent que le taux de la dégradation de la pluviométrie sur sous bassin est en moyenne de l'ordre de 0.55 % par an (15 % durant les 27 dernières années).

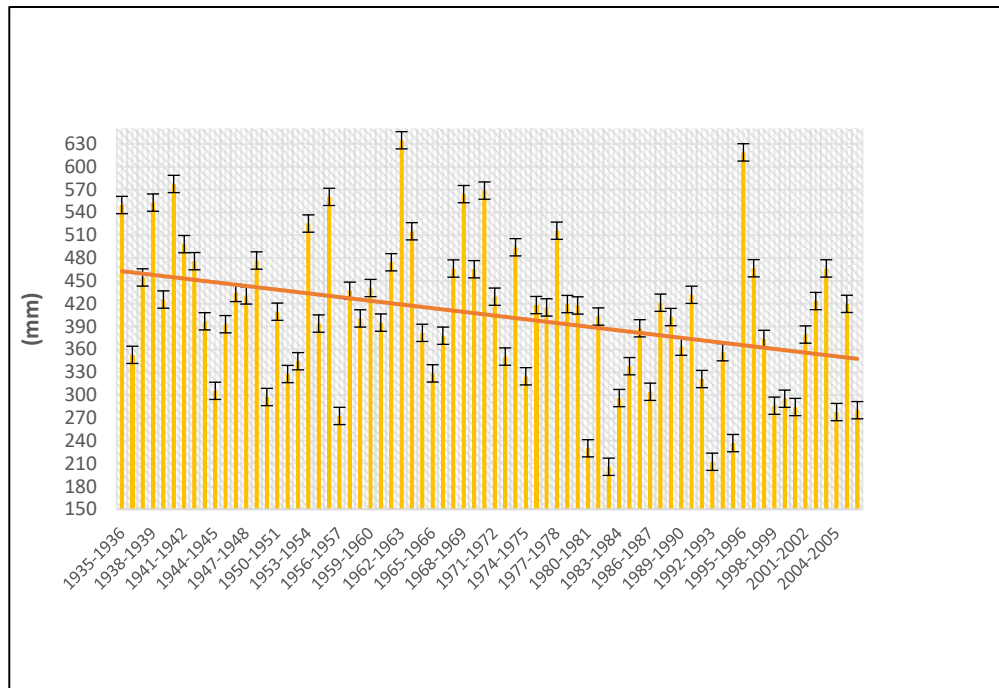


Figure 74: La pluviométrie interannuelle sur la période de 1935 à 2015(Oum Er Rbia central)

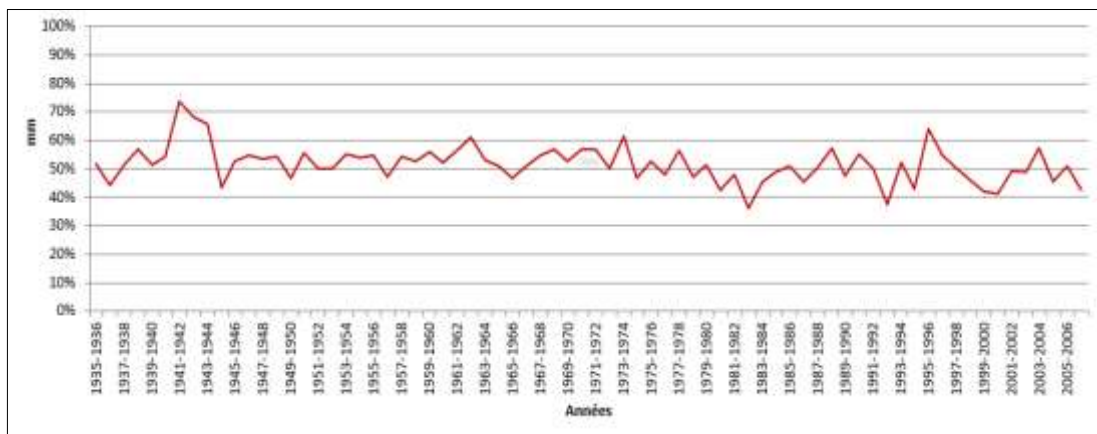


Figure 75: La pluviométrie interannuelle sur la période de 1935 à 2015 (Tessaout)

1.3. La variabilité des températures de 1970 à 2000

La répartition spatiale des températures mensuelles pour la période entre 1970 et 2000 (figure77) montre un effet de continentalité combiné avec l'effet lié à l'altitude au niveau de la chaîne de l'Atlas, D'après la figure les tendances observées varient de 0.4°C à 0.7°C par décennie.

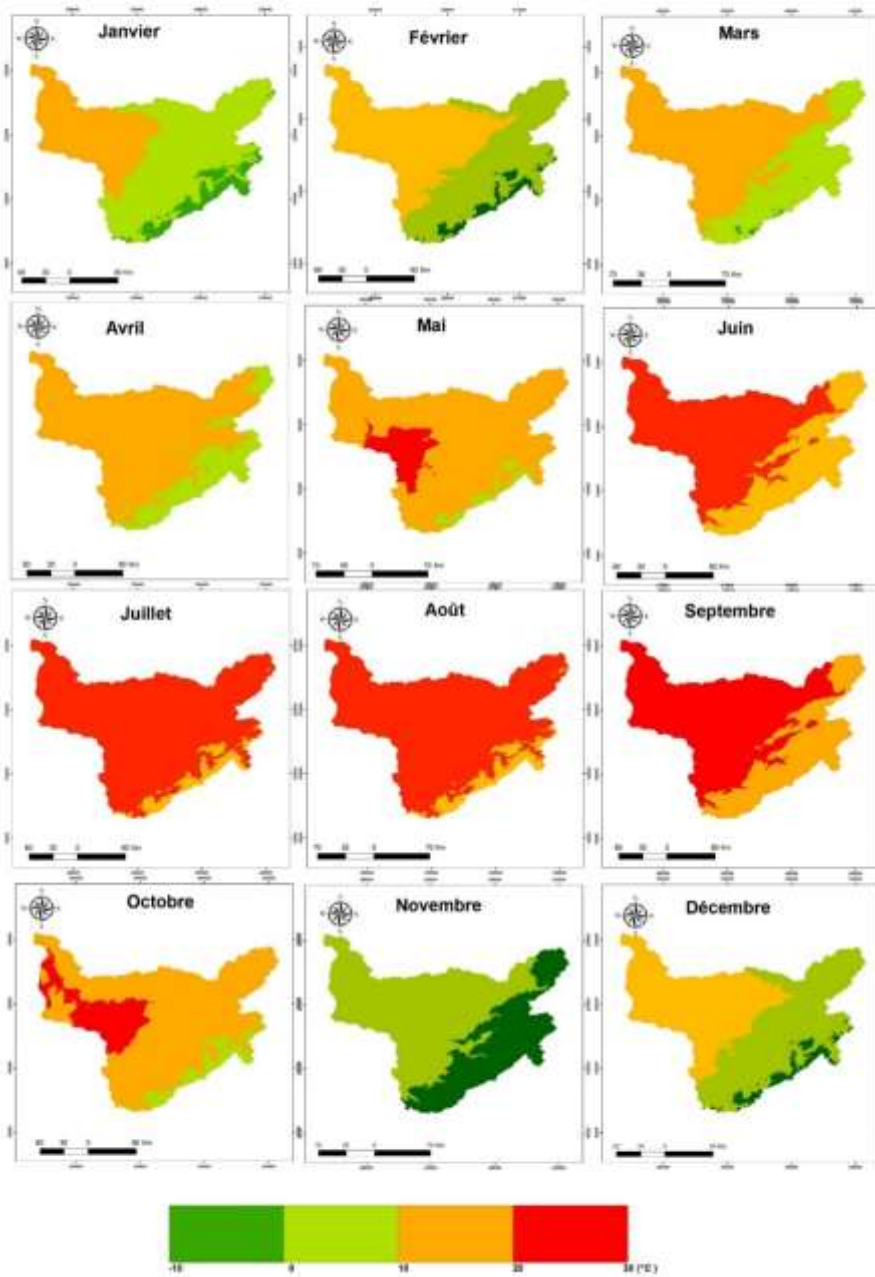


Figure 77: Distribution des températures moyennes dans le bassin OER (1970-2000)

Les tendances climatiques observées, sur la période 1970-2000 font état des indications suivantes :

A l'échelle annuelle, l'augmentation des températures moyennes observée s'est poursuivie durant la période 1971-2000 au taux de 0.4°C à 0.7°C par décennie ;

-A l'échelle annuelle, les changements des précipitations n'étaient pas significatifs et varient de manière importante d'une région à l'autre. Par contre, les précipitations de printemps ont enregistré une baisse significative dans la partie Nord du Maroc au taux de 0.5 mm/jour par décennie.

Notons cependant qu'une analyse de l'évolution des précipitations pour la période 1980-2015 a montré que le bassin OER a connu une réduction moyenne de la pluviométrie annuelle de 70 mm (20%) sur cette période par rapport à 1940-1980.

1.4. Evolutions projetées et conséquences des changements climatiques

1.4.1. Choix du modèle

Nous avons sélectionné le modèle BCC_CSM1.1 est la version 1.1 du modèle de système climatique du Centre climatique de Pékin (BCC_CSM1.1) développé au Centre climatique de Pékin (BCC), Administration météorologique chinoise (CMA), basé sur le NCAR CCSM2.0.1. Il s'agit d'un modèle global climat-carbone entièrement couplé, incluant la végétation interactive et le cycle global du carbone, dans lequel la composante atmosphérique BCC_AGCM2.1, la composante océanique MOM4-L40, la composante terrestre BCC_AVIM1.0, et la composante glace de mer SIS sont entièrement couplées et interagissent entre elles par des flux d'élan, d'énergie, d'eau et de carbone à leurs interfaces. Les informations entre l'atmosphère et l'océan sont échangées une fois par jour simulé. L'échange de carbone atmosphérique avec la biosphère terrestre est calculé à chaque pas de temps du modèle (20 min).(Xiao-Ge et al., 2013)

BCC_CSM1.1 a participé à la cinquième phase du projet CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) et a réalisé la plupart des expériences CMIP5 (Xin et al., 2008) Les sorties des modèles sont disponibles dans la passerelle PCMDI.

1.4.2. Projection des températures moyennes et des précipitations selon le modèle BCC_CSM1.1 a l'horizon 2050

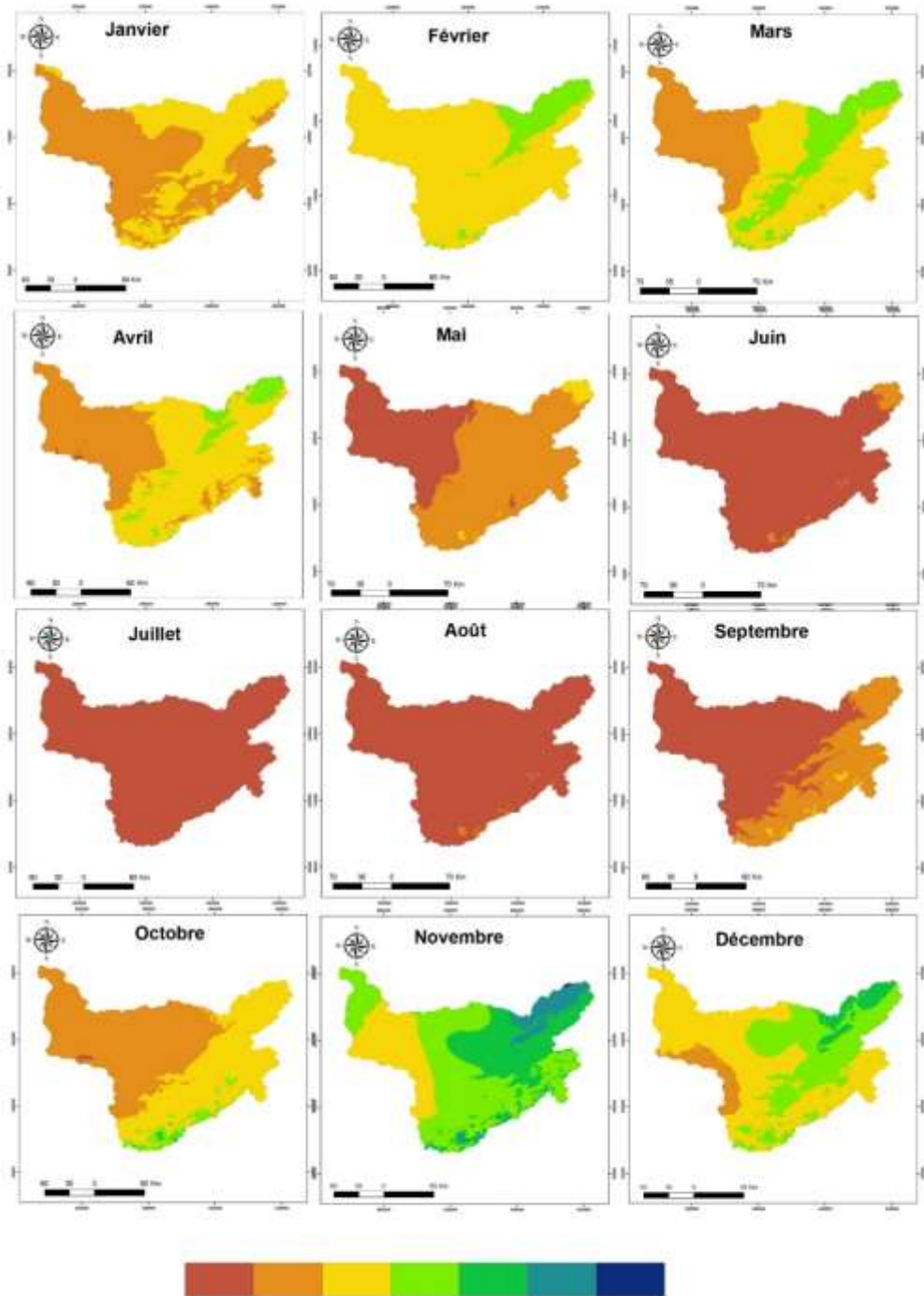


Figure 78: Tendances des précipitations en °C à l'horizon 2050 selon le modèle BCC_CSM1.1 tourné avec le scénario RCP 2.6

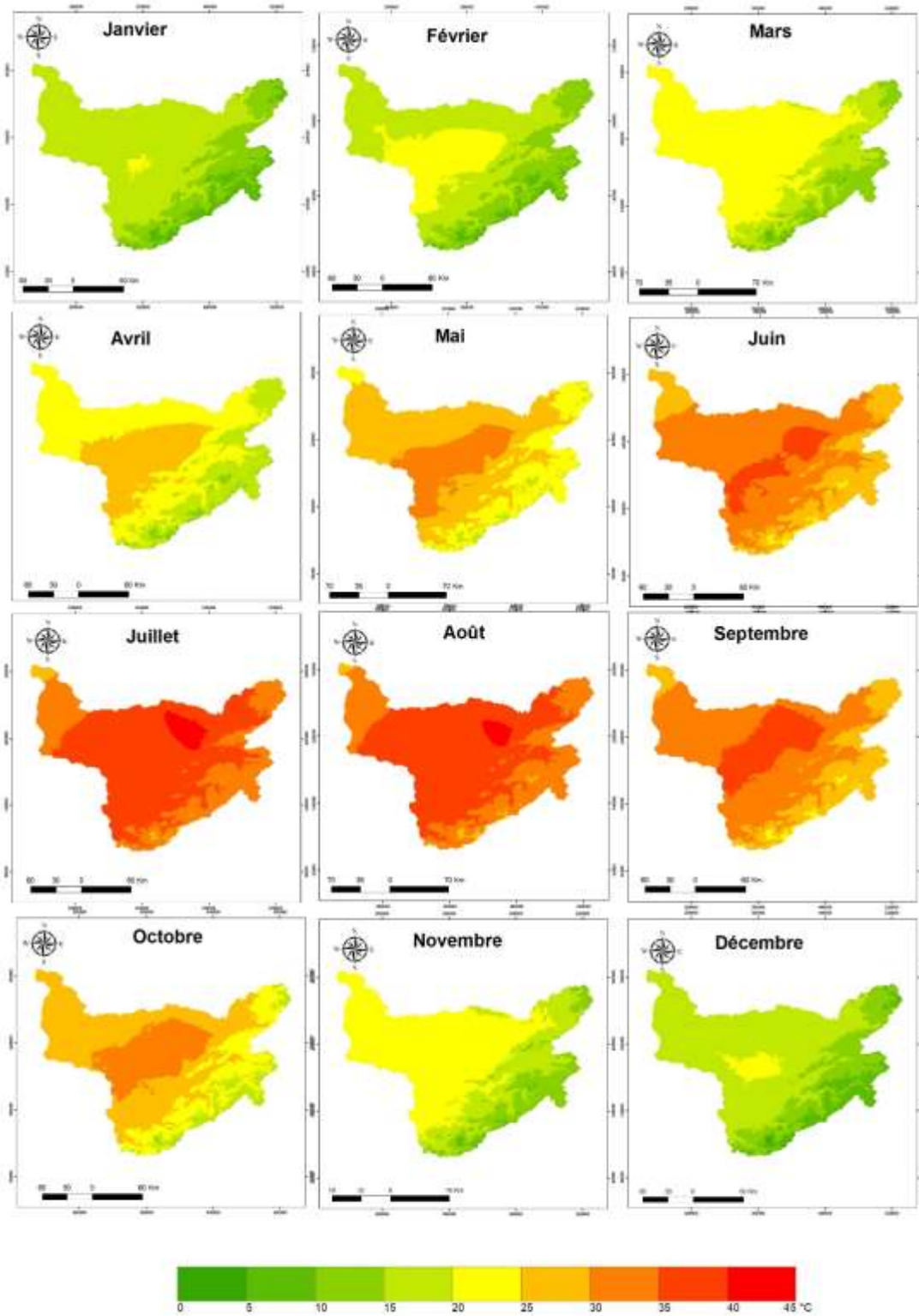


Figure 79: Tendances des températures en °C à l'horizon 2050 selon le modèle BCC_CSM1.1 tourné avec le scénario RCP 2.6

L'analyse des résultats des simulations effectuées avec le BCC_CSM1.1 amène au constat suivant :

- ↗ Pour ce qui est de la température, le modèle prévoit un réchauffement dans le bassin OER. Le bassin devrait connaître un accroissement moyen de la température entre 0.07 °C et 1 °C par décennie durant la période 1971 à 2050 (figures 1, 2 et 3). Considérant cela, on peut estimer que le bassin connaîtrait un réchauffement continu en particulier d'ici 2050 de l'ordre de 0.1 à 1.5 °C. (Figure 79°)
- ↗ Pour ce qui est des précipitations, le modèles prévoit une diminution des précipitations dans le bassin pour les prochaines décennies, s'oriente plutôt vers une très légère humidification. (Figure78)

Le bassin devrait s'attendre à une réduction des précipitations de 0.01 à 0.3 mm par jour par décennie durant la période 2050.

Considérant cela, on peut estimer que le bassin connaîtrait une variation des précipitations moyennes annuelles située entre une diminution de l'ordre de 200 mm (probabilité 2/3) et une augmentation de l'ordre de 60 mm (probabilité 1/3) pour 2050

Chapitre IV : l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia

1. Etat des lieux des ressources en eau

1.1. Bilan global

Le bassin de l'Oum Er Rbia dispose d'un potentiel en ressources en eau disponibles évalué en moyenne à 7.4 milliards de m³/an. La moitié de ce potentiel est constitué d'écoulements difficilement mobilisables dans des conditions économiques soutenables. La moitié restante, formant 3.7 milliards de m³/an, correspond au potentiel mobilisable constitué essentiellement des eaux superficielles et caractérisé par une forte disparité temporelle et spatiale. (Figure 80)

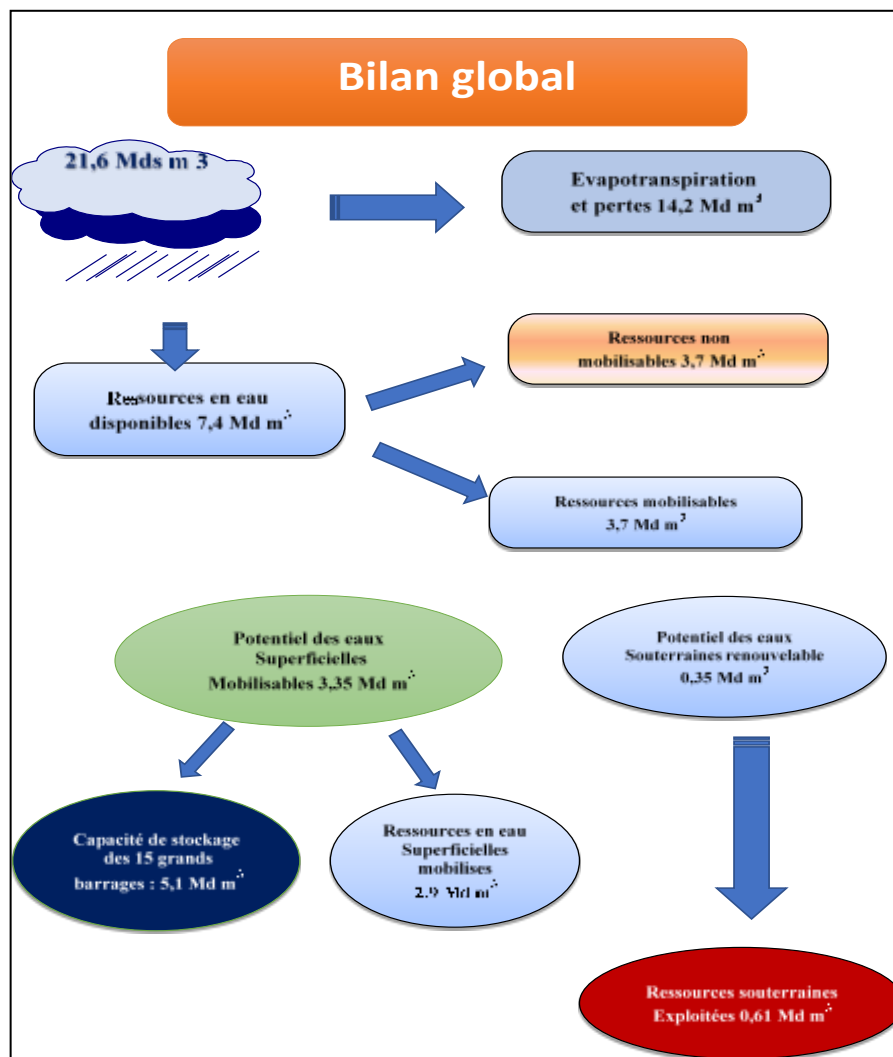


Figure 80:: Bilan global des ressources en eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia

1.2. Les barrages

Actuellement, le bassin dispose d'une quinzaine de grands barrages d'une capacité de stockage totale de 5.100 Mm³ (figure 81). Grâce à cette importante infrastructure le taux de mobilisation des ressources en eau superficielles dépasse 85 %. D'autre part, la zone dispose de près de 600 km de canaux adducteurs assurant des transferts intra et extra-bassins. Les principaux transferts existants (dotations moyennes annuelles) sont les suivants :

- A l'intérieur du bassin : 330 Mm³/an à partir de Bine El Ouidane pour l'irrigation de la Tessaout aval ; ce transfert représente à peu près 30 % des ressources en eau disponibles et les 70% restants sont destinés au périmètre des Béni Moussa ;
- A l'extérieur du bassin, il existe des transferts de l'OER vers plusieurs zones avoisinantes : 170 Mm³/an pour l'AEPI de Casablanca, Settat, Berrechid et Marrakech et 290 Mm³/an pour l'irrigation du Haouz.

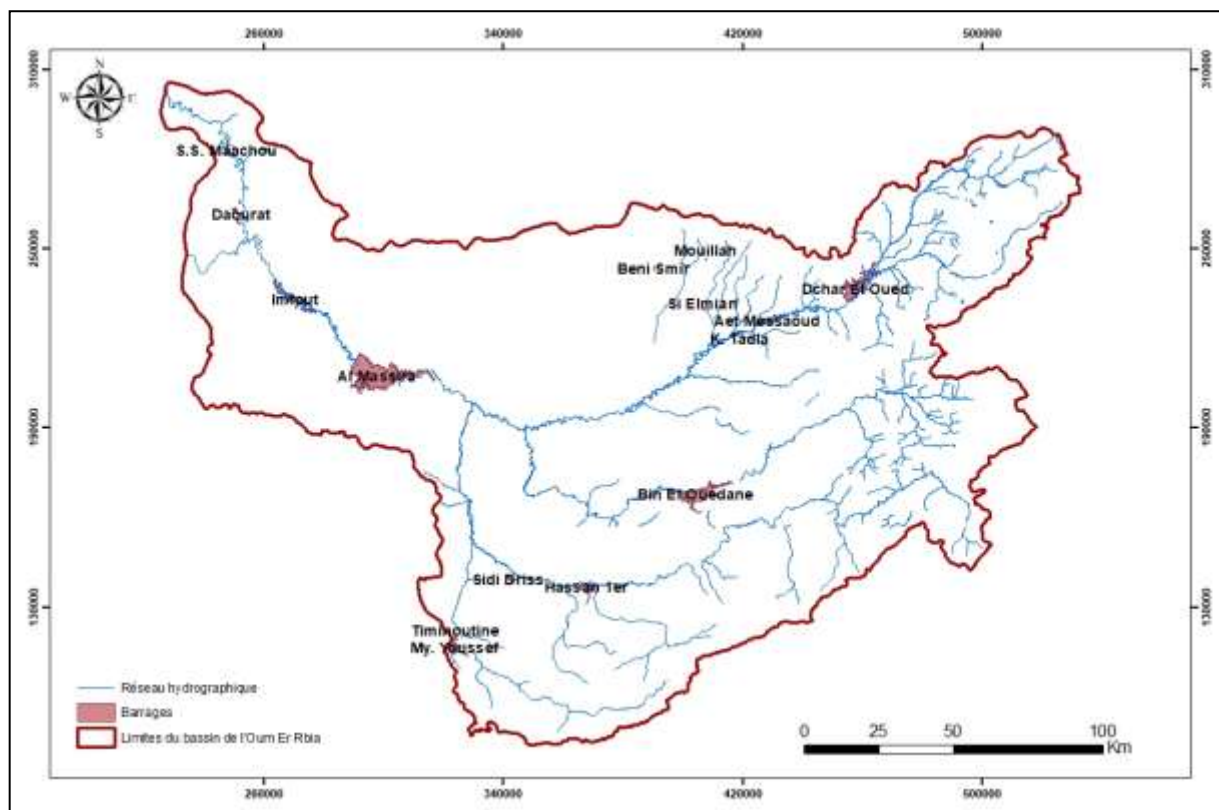


Figure 81: Les grands barrages du bassin de l'Oum Er Rbia

1.3. Les apports d'eau annuels

Les écoulements annuels moyens ont été de 3 300 Mm³ sur la période 1940-2008 et de 2 345 Mm³ sur la période 1981-2008. Sur la période 1941-1980, ils avaient été de 3 930 Mm³. La diminution entre ces deux dernières périodes est donc de 1 585 Mm³ soit près de 40% en valeur relative (Tableau 12).

Tableau 12: Evolution des apports d'eau annuels

Bassin	1941 – 2008	1941 - 1980	1981- 2008	Ecart relatif (%)
Barrage Ahmed El Hansali	817	996	544	-45
Station Taghzirt	70	76	52	-31
Barrage Bin El Ouidane	993	1229	632	-49
Barrage Hassan 1 ^{er}	256	314	168	-46
Barrage Sidi Driss	130	138	112	-19
Barrage My Youssef	270	311	206	-34
Barrage Kasbat Tadla	237	259	205	-21
Bassin entre Kasbat Tadla et Mechraâ Eddahk -	94	115	62	-29
Bassin entre Mechraâ Eddahk et Ouaouirhint (y compris O. Abid)	229	300	119	
Bassin entre Ouaouirhint et El Massira (y compris O. Tessaout)	90	51	151	
Bassin aval El Massira	62	62	63	+3
Bassins cotiers atlantiques	50	80	30	-37
Total bassin	3300	3930	2345	-40

1.4. Bilans des nappes d'eaux souterraines

Le bassin de l'Oum Er Rbia comprend les principales nappes d'eau souterraines suivantes :

- Les nappes phréatiques du Tadla qui sont les nappes des Béni Amir (600 km²), du Dir (500 km²) et des Béni Moussa (885 km²) ;
- Les nappes profondes du Tadla qui comprennent successivement en dessous de la nappe phréatique les niveaux aquifères de l'Eocène (6.400 km²), du Sénonien et du Cénomano-Turonien (10.000 km²) ;
- Les « nappes centrales » composées des nappes de la Tessaout aval, de la Bahira, du Haouz, de Khemisset-Chaouïa ;
- Les « Nappes de montagne » (Dogger d'Azilal et Aït M'hamed, Turonien d'Aït Attab, Dogger et Lias dans la région de Demnate, Lias dans les provinces de Khénifra et Béni Mellal) ;
- Les nappes de la région El Jadida-Safi (du Sahel et des Doukkala) ;
- L'ensemble « Sahel-Doukkala-Abda » ;
- La nappe de la Chaouïa côtière.

Les nappes phréatiques connaissent une surexploitation. Les prélèvements atteignent les 610 Mm³, alors que le potentiel des eaux souterraines renouvelables n'est que de 350 Mm³. Cela entraîne une chute des niveaux d'eau et une réduction de la productivité des ouvrages de mobilisation. (Tableau 13)

Tableau 13: Bilans moyens (Mm³/an) des nappes du bassin de l'Oum Er Rbia

Nappe	Entrées (Mm ³ /an)							Sorties (Mm ³ /an)						
	Sous Ecoulement	Infiltration oueds	Retour d'Irrigation	Pluie	Total (1)	Pertes en Mer	Drainage par les cours d'eau et les nappes	Sources	Sous écoulements	Prélèvements		Total (2)	Bilan	Volume Exploitable
										Irrigation	AEP			
Béni Amir	0	0	94	8	102	0	74	0	11	65	0.7	150.7	-49	30
Dir	0	0	22	21	43	0	5	0	5	67	0	77	-34	40
Béni Moussa	5	0	164	26	195	0	140	0	0	104	2	246	-51	55
Eocène	154	0	5	154	313	0	121	0	146	110	15	392	-79	55
Sénonien	182	0	0	149	331	0	6	0	326	3	0	335	-4	5
Turonien	2	17	0	127	146	0	37	12	57	18	44	168	-22	35
Tessaout Aval	5	5	70	10	90	0	47	0	25	25	2	99	-9	30
Bahira	5	7	24	42	78	0	25	0	3	78	15	121	-43	40
Khemisset Chaouia	0.7	0	0	2.3	3	0	0	0.5	0	2.5	0.2	3.2	0	2
Nappes de montagnes	0	0	0	5.6	5.6	0	0	0.7	0	0.1	1.2	2	4	5
Sahel Doukkala	5	3	35	100	143	90	0	3	0	50	5	148	-5	50
Total	358.7	32	414	645	1450	90	455	16.2	573	523	85	1742	-292	347

1.5. Utilisation de l'eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia

Les besoins propres en Alimentation en Eau Potable dans le bassin s'élèvent aujourd'hui à près de 200 Mm³/an. Quant aux besoins extérieurs au bassin et qui concernent les villes de Casablanca, Marrakech, Settat et Berrechid, ils étaient en 2010 de l'ordre de 170 Mm³/an. Ceux de l'irrigation, ils s'établissent actuellement à environ 3,5 Milliards de m³ par an, non compris le Haouz central (290 Mm³). Ils correspondent à 90% des besoins. Ils (Srinivasan & George, 2015), entre autres, les besoins des grands périmètres suivants :

- La région de Tadla (139 725 ha) : 1060 Mm³ ;
- La région de Doukkala (108 922 ha) : 880 Mm³ ;
- La région de Haouz (145 496 ha) : 290 Mm³.

2. L'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia

Une modélisation des impacts possibles des changements climatiques au niveau du bassin a été faite avec QSWAT qui est une mise en œuvre de l'Outil d'évaluation des sols et de l'eau (SWAT) à QGIS. Le modèle a été élaboré pour quantifier l'impact de la gestion des terres dans les grands bassins. Il combine un modèle hydrologique avec un modèle de qualité de l'eau. Il travaille sur des UDI ou des unités de réponse hydrologique, une unité computationnelle de zone avec des conditions hydrologiques homogènes et une couverture terrestre. QSWAT n'est disponible que sur la version 32 bits de QGIS 2.6 sous forme de plugin QGIS.

QSWAT peut simuler le cycle de l'eau dans les bassins pour déterminer les impacts dans un laps de temps en tenant compte de multiples variables. De plus, ce modèle est utilisé pour prédire les effets de l'utilisation et de la gestion des terres dans le débit d'eau, la quantité de sédiments et la chimie dans les bassins, principalement dans les bassins qui n'ont pas d'information de surveillance antérieure. Il est également utilisé dans les grands bassins complexes qui ont une variété de différents types de sols et de pratiques de gestion. (Srinivasan & George, 2015)

L'étude a exploré l'impact direct des changements des précipitations et des températures sur le cycle hydrologique du bassin de l'OER en utilisant le modèle QSWAT. Ce modèle qui a été calé sur les observations collectées sur le terrain (précipitations, débits enregistrés dans les stations de jaugeage, retenues de barrages, etc.) a permis de modéliser les écoulements superficiels futurs, issue d'une réponse hydrologique du climat attendu à l'horizon 2050.

2.1. Impacts sur les réserves de barrages

Les apports dans les barrages seront impactés aussi bien en module (valeur moyenne) qu'en pointe (valeur maximale).

Les simulations réalisées ont permis d'avoir une estimation du pourcentage de changement dans la réserve de fin d'année pour une probabilité de 50% dans les différents barrages (tableau 14). Globalement, on peut noter qu'en fin d'année, les barrages en 2050 disposeront plutôt de moins d'eau.

Tableau 14: Les changements dans la réserve de fin d'année dans différents barrages selon le modèle BCC_CSM1.1

	Bin Ouidane	El Hansali	Moulay Youssef	Massira
BCC_CSM1.1	-30	-120	-6	-50

2.2. Impacts sur l'AEP

Les simulations réalisées ont permis d'estimer les impacts exprimés en termes d'aggravation de la pénurie en eau potable pour certaines villes. Elle se situe pour le BCC_CSM1.1 entre 4 Mm³ pour Safi et 25 Mm³ pour Casablanca à l'horizon 2050 (tableau 15).

Tableau 15: Pénurie maximale annuelle en Mm³ d'eau potable

	Safi	El Jadida	Casa/Settat	Casa	Marrakech
BCC_CSM1.1	4	9	20	25	23

2.3. Impacts sur l'eau d'irrigation

Les simulations réalisées ont permis d'estimer les impacts exprimés en termes d'aggravation de la pénurie en eau agricole pour différents périmètres irrigués. Ce calcul a été fait considérant comme ligne de base l'offre en eau de l'année 2010 et la demande prévue pour 2030. Le tableau 16 récapitule les résultats pour deux périmètres irrigués Tessaout Amont et Haouz. Le pourcentage de réduction des eaux allouées à l'irrigation dans ces deux périmètres par rapport à la ligne de base est entre 80 et 200 %.

Tableau 16: Pourcentage de réduction des eaux allouées à l'irrigation par rapport à l'offre 2010-demande 2030 (pour une probabilité de 50%)

	Tessaout Amont	Haouz
BCC_CSM1.1	108	217

2.4. Impacts sur les eaux souterraines

Les simulations réalisées ont permis d'estimer les impacts exprimés en termes de baisse du niveau de la nappe pour différentes unités hydrogéologiques.

Le tableau 10 récapitule les résultats pour trois unités *Tessaout Aval*, *Béni Moussa* et *Tadla*. Ces nappes devraient s'attendre à un abaissement de leurs niveaux d'ici à 2050 selon **BCC_CSM1.1** (tableau 17).

Tableau 17: Profondeur de la nappe (en m) sous l'hypothèse de l'offre 2010-demande 2030 (pour une probabilité de 50%)

	Tessaout Aval	Beni Moussa	Tadla
Ligne de référence	13	12	20
BCC_CSM1.1	48	50	72

2.5. Bilan des simulations réalisées

Ces simulations présentées dans l'étude réalisée ont montré que les impacts du changement climatique sur les écoulements du bassin OER à l'horizon 2050 sont significatifs. Cependant, il était difficile de tirer les amplitudes réelles de ces impacts au niveau des différentes régions hydro-climatiques constitutives du bassin de l'OER avec leurs différentes nuances géomorphologiques, climatiques et topographiques (montagnes du Moyen Atlas, plaines centrales, côtes, etc.).

Tout au plus, cette étude donne des renseignements sur la réduction des apports dans les grands ouvrages, notamment les barrages. Ces apports seront réduits de façon significative sous le contexte du changement climatique.

Les impacts sur les aquifères ont été simulés et traduits en termes de baisse des nappes importantes au sein du bassin. Cette baisse ne découle pas d'une modélisation hydrogéologique proprement dite mais d'une simple simulation d'allocation des ressources souterraines.

Les indicateurs de baisse des nappes (exprimée en mètres de profondeur des aquifères) donnent quelques renseignements sous forme de tendances ou d'ordres de grandeur sur la situation de stress hydrique que connaîtra le bassin dans un contexte de changement climatique à l'horizon 2050.

En ce qui concerne les volumes mobilisés en ouvrages de surface, l'étude a documenté les aspects relatifs à l'évolution des réserves de retenues de barrage. Les volumes seraient alors significativement impactés à différents degrés de fréquence. Si on choisit une fréquence centrale de 50%, l'étude nous fonde à affirmer que les manques à gagner en fin d'année hydrologique sont généralement de l'ordre de 0 à -50%. Cependant, même si le déficit est largement reporté par les modèles, on rencontre aussi des excédents !

Pour les usages de l'eau, la pénurie de l'eau potable et de l'eau d'irrigation serait exacerbée par rapport à l'offre 2010. Les indicateurs de pénurie sont cependant trop imprécis pour nous forger une connaissance spatiale des impacts. En plus de cette imprécision, inhérente aux incertitudes entachant toute étude de ce genre, nous n'avons pas de données sur l'AEP rurale ni sur l'eau agricole en dehors des grands périmètres irrigués.

Chapitre V : Stratégie d'Adaptation de la Gestion des Ressources en Eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia

1. Introduction

L'Adaptation au Changement Climatique signifie « l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques » (GIEC, 2008). La définition de l'adaptation s'applique au changement climatique graduel à long terme, ainsi qu'aux variabilités du climat ou phénomènes climatiques extrêmes.

Le concept d'adaptation au changement climatique n'est pas un concept nouveau. Les populations, les entreprises et les gouvernements ont toujours cherché des moyens d'y faire face et de se développer en période de sécheresse, d'inondation ou d'autres extrêmes climatiques. Toutefois, il est désormais admis que même si nous parvenons à réduire les émissions de GES à l'avenir, les émissions de GES déjà libérées dans l'atmosphère continueront à participer à la hausse des températures, ce qui provoquera des changements climatiques à court et long terme. Une hausse relativement faible des températures moyennes est susceptible de provoquer une augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles et des phénomènes climatiques extrêmes telles que les inondations, les sècheresses et les fortes précipitations. La difficulté particulière de l'adaptation est qu'il existe une forte incertitude sur les conséquences régionales et locales de ce changement, même à un horizon de 20 ans familier aux entreprises. (GIZ, 2017)

Les mesures d'adaptation tentent de réduire la vulnérabilité d'un système ou d'une organisation face aux risques climatiques. Elles peuvent s'exercer à différentes échelles et sont le résultat d'un processus d'analyse des risques et d'identification des actions à mener pour réduire ou éliminer ces risques.

Le bassin de l'Oum Er Rbia a connu ces dernières décennies un développement économique et social important qui a induit une forte pression sur les ressources en eau tant au niveau de la demande ; en croissance continue ; qu'au niveau de la dégradation de la ressource en relation avec les différentes formes de pollution auxquelles cette ressource a été soumise. La forte variabilité climatique qu'a connu la zone durant ces décennies ; avec un réchauffement

continu et des épisodes fréquents de sécheresses et d'inondations ; a accentué cette pression et fragilisé plus l'équilibre offre-demande.

La forte vulnérabilité de la ressource eau du bassin face aux aléas climatiques a été fortement ressentie les années 80 avec de longues et fréquentes sécheresses et puis les années 2000 avec d'importantes inondations. Le bilan d'eau réalisée en 2015 pour la zone d'action de l'ABHOER a montré que le niveau moyen des apports d'eaux annuelles dans le bassin a connu une baisse notable entre 1940-1980 et 1980-2010. Il est passé d'une moyenne de 3930 Mm³ à 2330 Mm³ après 1980. Soit une chute de la moyenne de l'ordre de plus de 40%. (PDAIRE, 2010)

Pour faire face à ces irrégularités climatiques, des actions d'adaptation réactives ont alors été menées avec des résultats non négligeables. Cela a concerné la gestion des ressources et conflits d'eaux en période de sécheresse, la lutte contre les effets des inondations, l'octroi de financements pour réparer les dégâts engendrés par ces événements sur les infrastructures. Ces actions ont permis de créer un savoir-faire, de tester des approches et d'acquérir une expérience en la matière.

Aujourd'hui, cette tendance au réchauffement du climat avec des impacts significatifs sur le cycle de l'eau se confirme pour tout le royaume et en particulier pour cette zone. Aussi l'adaptation de la gestion de la ressource eau au changement climatique ne doit plus être réactive mais plutôt proactive et anticipative. Il y'a un besoin d'approches structurelles d'adaptation et non de réactions conjoncturelles car le défi climatique futur pour la zone est fort. Les actions conjoncturelles d'adaptation deviendront vite inefficaces et trop coûteuses devant les risques qui la menacent.

Cette anticipation au niveau de l'adaptation de la gestion des ressources en eau doit se retrouver au niveau de la planification et de la gestion de l'eau. Ceci a été initié de façon qualitative au niveau national dès 2009 dans la Stratégie Nationale de l'Eau avec :

- Un axe stratégique consacré à la réduction de la vulnérabilité aux risques naturels ;
- Cinq axes stratégiques allant implicitement vers une adaptation aux effets potentiels du changement climatique.

La stratégie d'adaptation proposée, ici, pour ce bassin a été basée sur le besoin :

- D'analyser la vulnérabilité au changement climatique du bilan hydrique ;
- De disposer d'un processus et de mécanismes permettant d'intégrer de façon systématique le risque climat dans les étapes futures de planification et de mise en œuvre de la gestion des ressources en eau de la zone.

2. Objectif

La stratégie d'adaptation de la gestion des ressources du bassin de l'Oum Er Rbia visée a pour objectif de : « Garantir une gestion rationnelle et durable des ressources en eau du bassin permettant d'assurer une disponibilité en eau pour l'ensemble des usagers dans des conditions acceptables considérant le changement climatique et ses effets physiques, écologiques et socio-économiques potentiels ».

3. Les Principes de la stratégie

La stratégie d'adaptation de la gestion des ressources en eau du bassin de l'Oum Er Rbia proposée ici repose sur la mise en œuvre de mesures techniques et de politiques flexibles, régulièrement évaluées et corrigées à mesure que les connaissances scientifiques se développent et que les conditions climatiques et socio-économiques évoluent. Cette stratégie doit s'appuyer sur plusieurs principes dont les suivants :

- Une stratégie qui garantit l'utilisation la plus efficace de la ressource eau ;
- Une stratégie qui protège les personnes et les biens ;
- Une stratégie basée sur le principe de précaution ;
- Une stratégie qui vise l'action préventive et l'anticipation des situations de crise ;
- Une stratégie qui évite les inégalités sociales devant les risques ;
- Une stratégie basée sur le principe d'équité et de solidarité humaine et territoriale ;
- Une stratégie qui favorise l'éducation, l'accès à l'information, et la recherche ;
- Une stratégie basée sur une approche participative tant au niveau de sa conception qu'au niveau de sa mise en œuvre associant les différents acteurs concernés au niveau du bassin :

- ↗ Élus territoriaux
 - ↗ Ministères et administrations
 - ↗ Chercheurs
 - ↗ Industriels
 - ↗ Agriculteurs
 - ↗ Représentants de la société civile.
- Une stratégie qui doit par ailleurs être conforme et complémentaire avec les autres stratégies nationales et régionales traitant de la gestion des ressources en eau en particulier : La Charte Environnementale, la SNDD, la SNCC, Le PNLCRC, La SNE, Le PDAIRE, le Plan Maroc vert, le PNDM et le PNA.

4. Démarche adoptée pour élaborer la Stratégie d'Adaptation

La démarche adoptée pour l'élaboration de la stratégie d'adaptation de la gestion des ressources en eau du bassin est une démarche participative associant les différents acteurs de la zone concernés et permettant une appropriation de celle-ci.

Elle a été menée en utilisant un outil utilisé généralement pour intégrer le risque climat dans les politiques/programmes et projets de développement : `Climate Proofing For Development` (CP4Dev). Le principe de base de la démarche a été de réaliser, dans un cadre participatif et de concertation, les actions suivantes et ce selon 4 phases :

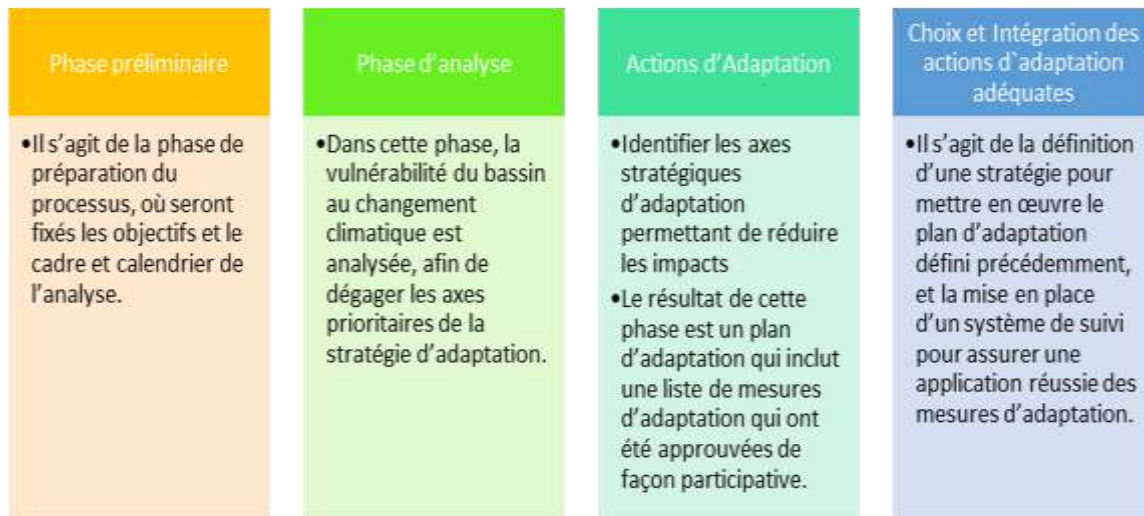


Figure 82: La démarche d'élaboration de la stratégie d'adaptation

4.1. Phase 1 : La phase préliminaire

- Déterminer les tendances climatiques au sein du bassin de l'Oum Er Rbia
- Décider de l'opportunité d'utiliser le CP4Dev pour limiter les risques liés au changement climatique.

4.2. Phase 2 : Analyse de la vulnérabilité

- Identifier les unités particulièrement exposées au risque Climat ;
- Déterminer les impacts négatifs des tendances climatiques sur les ressources en eau dans le bassin de l'Oum Er locales sur les unités exposées du PDAIRE (stimuli climatiques) ;
- Déterminer les effets biophysiques et socio-économiques possibles de ces tendances climatiques sur les unités exposées.

4.3. Phase 3 : Actions d'Adaptation

- Identifier les axes stratégiques d'adaptation permettant de réduire les impacts de ces changements climatiques ;
- Identifier des actions de mise en œuvre de la stratégie d'adaptation par axe stratégique.

- Hiérarchiser les différentes actions d'adaptation identifiées considérant en particulier :
 - ✓ Le cout de l'action ;
 - ✓ Le degré de réduction de la vulnérabilité que l'action pourrait induire ;
 - ✓ L'échelle spatiale de la portée de l'action ;
 - ✓ La nature sans regret ou pas de l'action ;
 - ✓ La maîtrise de la mise en œuvre de l'action.

4.4. Phase 4 : Choix et Intégration des actions d'adaptation adéquates

- Choisir les actions les plus adéquates tenant compte de la hiérarchisation faite et de la nécessaire conformité des actions avec les principes de base et avec les autres stratégies nationales ;
- Proposer une démarche visant à intégrer les mesures d'adaptation trouvées dans le PDAIRE 2012 d'une manière appropriée ;
- Mettre en place un système de suivi et d'évaluation de l'efficacité de ces actions et de leurs performances.

5. Encadré 1 : Climate Proofing for Developemnt

Le Climate Proofing pour le développement est une approche méthodologique conçue pour intégrer les thèmes liés au changement cli - matique dans les plans de dé - veloppement. Cette approche permet d'analyser les mesures de développement par rapport aux défis et opportunités présents et futurs posés par le changement climatique. Elle peut être appliquée aux niveaux national, sectoriel, local ainsi qu'au niveau des projets, rendant ainsi les mesures plus efficaces et plus résilientes. Le Climate Proofing pour le développement est un moyen pour identifier et classer les options d'action lorsqu'on adapte la planification au changement cli - matique et qu'on réexamine les priorités. Cette approche peut s'appliquer lors de la phase de planification ou lors de la révision des mesures de planification. Bien appliqué, il rend un plan ou un investissement plus « climate proof », autrement dit plus résilient au changement climatique.(GIZ, 2011).

Cette méthode se compose de deux étapes :

- ✓ Étape 1 : Pré-Screening, une évaluation approximative et rapide des risques liés au climat est faite. A ce stade, les politiques/programmes/projets avec un faible risque CC sont éliminés. Tous les autres doivent passer à l'étape 2.
- ✓ Étape 2 : Évaluation détaillée de la Politique/Programme/Projet : C'est une évaluation plus approfondie des risques climat. Elle doit être menée au cours de la conception du programme/projet. Les objectifs de cette étape sont les suivants :
 - Identifier et analyser les risques climatiques pour les politiques/programmes/projets de développement (à tous les niveaux : produits, résultats et impacts) ;
 - Proposer et hiérarchiser les mesures d'adaptation possibles qui augmentent l'efficacité et la réussite de ces politiques/programmes/projets ;
 - Sensibiliser et encourager les acteurs en charge de ces programmes/projets de développement à inclure des mesures qui permettent de limiter les risques climatiques pour leurs projets et leurs durabilités ;
 - Fournir des orientations pour le suivi des mesures d'adaptation préconisées.

6. Encadré 2 : Bilan hydrique du Bassin OER et changement climatique

Au niveau des apports en eau possibles en 2030, il a été retenu de garder la moyenne de la période 1941-2011 (3300 Mm³) pour 2030. Or, si on se base sur les 30 dernières années le potentiel enregistré au niveau des eaux de surface n'a été que de 2330 Mm³. Connaissant la tendance à la diminution globale des apports prévue par toutes les simulations en relation avec le changement climatique, il est évident que l'hypothèse considérée, ici, est optimiste et non conservatrice.

Considérer ce changement climatique en tant qu'élément structurel devrait nous conduire en premier lieu à se baser sur des apports en 2030 avoisinant les 2330 Mm³ et même moins. En effet les premières simulations, même dans leur diversité, prévoient plutôt une diminution des apports pour 2030. Ainsi, il serait sage de se baser sur des apports moyens en 2030 de l'ordre de 2300 Mm³.

Avec cette hypothèse conservatrice et plus en conformité avec le changement climatique et ses retombés probables, le déficit prévu par le PDAIRE en 2030 serait plutôt de l'ordre de 1500 Mm³ (au lieu des 560 Mm³ maximum prévus). L'implication de ce constat doit être à différents niveaux :

- L'effort en matière d'optimisation de la demande et de préservation de la ressource dans la zone planifié et présenté dans le PDAIRE doit être renforcé et soutenu ;
- Pour compenser les 1000 Mm³ non considérées au niveau du déficit pour 2030, il faudrait :
 - d'une part prévoir des transferts d'eau vers cette zone dans des ordres de grandeurs supérieurs aux 560 Mm³ annoncés (dans les limites de ce que les bassins excédentaires peuvent permettre) et aussi un programme ambitieux de dessalement d'eau de mer pour répondre aux besoins en AEPI des villes côtières de la zone ;
 - d'autre part revoir à la baisse les quantités d'eau pouvant être allouées en 2030 pour l'irrigation et qui étaient de 2527 Mm³ (Préparer le secteur agricole à cette hypothèse).

7. Application de la démarche

7.1. Phase 1 : Préliminaire

Les résultats présentés dans le chapitre 2 de la partie 1 de cette étude, indiquent que le réchauffement climatique prévu en 2030 dans le bassin de l'Oum Er Rbia serait entre 0.1 et 1.4 degrés Celsius. Il sera accompagné d'une diminution des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 200 mm ou d'une très légère humidification (moins de 60mm) ;

Selon Le PDAIRE, Le bilan Offre-demande pourrait être modifié avec une baisse des précipitations agissant sur l'offre tant au niveau quantité que qualité et aussi une augmentation de la température pouvant agir sur la demande (en particulier pour l'irrigation). Le déficit offre-demande prévu autour des 560 Mm³ pour 2030 pourrait être plutôt autour des 1500 Mm³ avec la tendance hydro climatique constatée et les prévisions (Encadré 2) ;

7.2. Phase 2 : Analyse de la vulnérabilité

7.2.1. Les unités exposées au risque des changements climatiques

Les unités du particulièrement exposées au risque des changements climatiques sont :

- ↻ Offre en eau : Apports, Mobilisation, eaux non conventionnelles ;
- ↻ Demande en eau : AEPI et irrigation ;
- ↻ Qualité de l'eau ;
- ↻ Territoire, populations, activités économiques et infrastructures (barrages, habitats, routes, Industries, ...)
- ↻ Gouvernance de la gestion des ressources en eau dans le BHOER.

Les tendances climatiques locales qui ont des impacts des impacts négatifs sur le bassin sont :

- ↻ Température moyenne annuelle plus élevée ;
- ↻ Températures extrêmes plus fortes (Faibles) ;
- ↻ Vagues de chaleur (plus longues, plus fréquentes et plus étendues spatialement) ;
- ↻ Précipitations annuelles moins importantes ;
- ↻ Répartition saisonnière des précipitations modifiée ;
- ↻ Précipitations extrêmes plus élevées et plus concentrées dans le temps (sécheresses, Inondations) ;
- ↻ Modification de l'intensité et de la forme d'enneigement des zones montagneuses.

7.2.2. Les effets directs des changements climatiques

Les effets directs, ces tendances climatiques pourraient avoir différents impacts qui vont agir négativement sur les unités exposées du PDAIRE :

- ↻ Diminution des apports annuels ;
- ↻ Sécheresses plus nombreuses, plus répandues et plus longues ;
- ↻ Inondations plus aigües et plus intenses ;

- ↻ Disponibilité en eau plus faible et détérioration de sa qualité ;
- ↻ Elévation du Niveau de la Mer (ENM) avec érosion de certaines zones côtières ;
- ↻ Salinisation de certaines nappes côtières en relation avec l'ENM ;
- ↻ Rareté de l'eau accentuée ;
- ↻ Vulnérabilité de certaines activités du littoral (Habitat, Tourisme, infrastructures portuaires, industries, agriculture, assainissement, etc.) ;
- ↻ Intensification des maladies hydriques et développement de nouvelles maladies ;
- ↻ Impact significatif sur l'agriculture et l'élevage (dates de semis, cycles de cultures, nature des cultures, rendement, faible efficacité d'utilisation de l'eau suite à l'augmentation de l'ETP, utilisation des engrais, aspect pédologique du sol, etc.) ;
- ↻ Impacts importants sur la vie des populations des zones montagneuses en relation avec la modification attendue du cycle de l'eau et des écosystèmes (enneigement et fonte des neiges, variabilité des ruissellements, modification de la végétation (étages bioclimatiques), etc.).

7.2.3. Les effets biophysiques/socio-économiques :

Les effets biophysiques/socio-économiques possibles de ces tendances climatiques sur les unités exposées du PDAIRE identifiées sont les suivants :

Tableau 18: Effets biophysiques et socio-économiques possibles de ces tendances climatiques sur les unités exposées du PDAIRE

Les unités exposées au risque des changements climatiques	Effets biophysiques des tendances climatiques de la région	Effets socio-économiques des tendances climatiques de la région
<i>Offre en eau (Apports, Mobilisation, Eaux non conventionnelles)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution du potentiel en eaux de surface et souterraines ; - Augmentation de la fréquence et de la durée de périodes de sécheresses et/ou d'humidité excessives ; - Diminution de l'enneigement et de la fonte des neiges. 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation du coût de mobilisation et d'exploitation de l'eau - Augmentation des conflits entre les différents usagers de l'eau ; - Recours à des techniques sophistiquées non habituelles localement

		<ul style="list-style-type: none"> - Accentuation de l'exode rurale et de la pression sur les villes - Impacts négatifs sur l'Agriculture et l'industrie - Impacts importants sur la vie des populations des zones montagneuses en relation avec la modification attendue du cycle de l'eau et des écosystèmes (enneigement et fonte des neiges, variabilité des ruissellements, modification de la végétation (étages bioclimatiques), etc.).
<i>Demande en eau (AEPI et irrigation)</i>	Augmentation de la demande en eau pour l'irrigation, l'AEPI et le cheptel en relation avec l'augmentation de la température de l'air (ETP)	<ul style="list-style-type: none"> - Accentuation de l'exode rurale et de la pression sur les villes - Impacts négatifs sur l'Agriculture et l'industrie
<i>Qualité de l'eau</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Détérioration de la qualité de l'eau en relation avec : <ul style="list-style-type: none"> -L'augmentation de la Température des eaux et la diminution de l'oxygène à saturation qui en résulte : la capacité de biodégradation naturelle diminue - La diminution de la capacité de dilution des polluants dans les systèmes hydriques par manque d'eau par période. - L'augmentation du transport solide avec envasement des retenues de barrages et asphyxie de la faune benthique 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation du cout de traitement de l'eau potable pour l'ONEE avec une répercussion sur le cout d'accès de la population à cette eau. - Problème sérieux d'accès à l'eau posé aux populations rurales utilisant les eaux naturelles sans traitement pour répondre aux besoins domestiques, et Agricoles. - Intensification des maladies hydriques et développement de nouvelles maladies

	<p>-L'accélération de l'eutrophisation des eaux en relation avec l'augmentation de la Températures et l'enrichissement des eaux par les éléments minéraux résultant de l'érosion des sols</p> <p>- L'augmentation de la salinisation des eaux par intrusion saline suite à l'augmentation du niveau de la mer et la diminution du niveau des nappes surexploitées</p>	
<p>Territoire, populations, activités économiques et infrastructures (barrages, habitats, routes, Industries, ...)</p>	<p>- Possibilité d'endommagement des infrastructures de base suite aux inondations (routes, habitats, barrages, STEPs, industries, ...)</p> <p>- Pertes de champs agricoles et de cheptel en relation avec les événements extrêmes (sécheresses, inondations)</p> <p>- Dégradation des écosystèmes et une perte de la biodiversité</p>	<p>-Perte de l'attractivité industrielle, Agricole et urbaine de zones vulnérables de la zone en relation avec les événements extrêmes</p> <p>-Surcout économique pour réparation des dégâts engendrés par les événements extrêmes</p> <p>-Chute des revenus économiques de la zone en relation avec les événements extrêmes (agriculture, industrie)</p> <p>-Des pertes en vies humaines et en moyens de subsistance</p> <p>-Une mobilité croissante des populations</p>
<p>Gouvernance de la gestion des RE dans le BOER</p>	<p>-Insuffisance du cadre institutionnel actuel pour faire face aux contraintes engendrées par le CC au niveau de la gestion de l'eau dans la région</p> <p>-Insuffisance des capacités humaines maîtrisant les CC, ses</p>	<p>- Gestion des RE inadaptée au nouveau contexte avec des effets néfastes sur les différents usages de l'eau.</p> <p>- Besoin supplémentaire en financements pour permettre</p>

	effets potentiels sur la gestion des RE et comment y faire face - Insuffisance des connaissances climatiques, hydriques et économiques sur la zone	d'adapter la gestion des RE de la zone au nouveau contexte climatique.
--	---	--

7.3. Phase 3 : Actions d'Adaptation

Cinq axes stratégiques d'adaptation ont été identifiés pour réduire les impacts de ces changements climatiques sur la gestion des ressources en eau du bassin de l'Oum Er Rbia :

Tableau 19: Les axes stratégiques d'adaptation

Axes	Description
Axe stratégique d'adaptation 1	Gestion et développement de l'offre pour répondre aux besoins futurs en eau du bassin considérant les limites pouvant résulter de l'impact possible du changement climatique sur cette composante ;
Axe stratégique d'adaptation 2	Optimisation de la demande et augmentation de l'efficience de l'utilisation des ressources en eau dans le bassin considérant en particulier la tendance au réchauffement climatique et l'alternance de périodes sèches et de périodes très humides prévues ;
Axe stratégique d'adaptation 3	Préservation des ressources en eau et lutte contre la pollution de l'eau dans le bassin en particulier durant les périodes de sécheresse, de vagues de chaleur et d'inondations pouvant survenir en relation avec le changement climatique ;
Axe stratégique d'adaptation 4	Prévention et réduction des risques hydro-climatiques pour le territoire, les populations, les activités économiques et les infrastructures publiques et industrielles pouvant

	<p>résulter d'événements extrêmes engendrés par le changement climatique ;</p>
Axe stratégique d'adaptation 5	<p>Amélioration de la gouvernance au niveau de la gestion des ressources en eau pour faire face aux effets du changement climatique, avec la mise en place :</p> <ul style="list-style-type: none">• D'un cadre institutionnel, juridique et financier pouvant permettre de considérer le risque climat dans la politique de l'eau au niveau de la zone ;• D'une banque de données et informations sur l'eau et le climat de la zone et leur évolution et qui soit accessible par les différents acteurs concernés ;• De programmes d'éducation, de sensibilisation et de communication sur la synergie climat-eau dans la zone et ses perspectives et sur les actions devant être menées pour adapter l'utilisation de l'eau au contexte climatique actuel et futur de la zone ;• De programmes de formations universitaires spécialisées dans le domaine eau-climat pour doter la zone de cadres maîtrisant cet aspect ;• D'études et de recherches associant des universités/écoles d'ingénieurs, la DMN et l'ABHOER pour suivre le changement climatique et ses effets possible sur l'eau dans la zone.

Une hiérarchisation des différentes actions d'adaptation identifiées a, par la suite, été faite tenant compte des critères et des notations du tableau 18.

Tableau 20: Critères de notation utilisés pour hiérarchiser les actions d'adaptation

Désignation	Qualitatif	Note
Cout de l'action de 1 à 5	+ Très important : le cout très élevé supportable par l'état	1
	+ Important : le cout est supportable par la région	2
	+ Moyen : le cout est supportable par l'agence du bassin	3
	+ Faible : le cout est supportable par la commune	4
	+ Très faible	5
Efficacité	+ Intensité d'envergure	5
	+ Intensité très forte	4
	+ Intensité forte	3
	+ Intensité moyenne	2
	+ Intensité faible	1
Champ d'action	Village	1

	Commune	2
	Province	3
	Région	4
	National	5
Action avec ou sans regret	Action avec regret	1
	Action sans regret	2
La mise en oeuvre	Difficile à mettre	1
	Facile à mettre	2

7.4. Phase 4 : Choix et Intégration des actions d'adaptation adéquates

7.4.1. Axe stratégique d'adaptation I

↗ Nouveaux aménagements de mobilisation des ressources en eau

Action 1 : Barrages

La réalisation des quatre barrages projetés dans l'amont du bassin de l'OER avec un volume utile totale prévu de 242.5 Mm³. Il s'agit des barrages de Taghzirt, de Wandz, de Ouzoud et de Tioughza. Ce sont des barrages destinés principalement à l'irrigation et à la protection contre les inondations des zones aval.

↗ Développement local par les petits et moyens barrages

Action 2 : Petits et moyens Barrages

La réalisation d'une centaine de sites de petits et moyens barrages (de capacité 50 000 à 300 000 m³) pour :

- L'irrigation
- Lutter contre les inondations

Action 3 : Entretien et maintenance des ouvrages hydrauliques

La Réalisation du programme annuel des travaux d'entretien, de réparation des ouvrages de génie civil et d'équipements hydromécaniques et électromécaniques nécessaire pour la sauvegarde du patrimoine hydraulique et de son bon fonctionnement.

Action 4 : Dessalement

La réalisation du projet de dessalement de l'eau de mer de 100 Mm³/an programmé par l'OCP au niveau des villes d'El Jadida et de Safi. Cela va correspondre à 25% de la dotation en eaux potables et industrielles pour 2030.

⇒ **Programme de promotion du captage et d'exploitation directe des eaux pluviales**

Action 5 : Captage et exploitation directe des eaux pluviales

La réalisation d'un programme d'action concernant le captage et l'usage direct des eaux de pluies pour satisfaire des besoins pour l'abreuvement du cheptel, la lutte contre les incendies de forêts, l'arrosage des jardins, le lavage, le nettoyage des surfaces (Promotion et vulgarisation, réalisation de projets pilotes).

⇒ **Programme de prospection et de mobilisation des eaux souterraines dans les zones montagneuses**

Action 6 : Eaux souterraines dans les zones montagneuses :

La réalisation de projets d'appui pour permettre l'accès de populations locales aux eaux souterraines dans les zones montagneuses (puits et forages) en particulier en périodes de sécheresses pour subvenir à leurs besoins (Eau Potable, cheptel, micro-irrigation).

⇒ **Réutilisation des eaux usées épurées**

Action 7 : Eaux usées épurées :

Mettre en œuvre le programme de réutilisation des eaux usées qui devrait concerner, en 2030, 35 Mm³.

↗ **Transfert d'eau à partir de bassins excédentaires**

Action 8 Apports d'eaux de bassins excédentaires

Assurer un transfert d'eaux à partir d'autres bassins excédentaires du royaume d'au moins 560 Mm³ en 2030.

En réalité et considérant le changement climatique prévu et son effet possible sur le potentiel en eau du bassin vers 2030, il sera nécessaire de prévoir un transfert vers la zone d'au moins 1500 Mm³.

↗ **Mise à jour continue du potentiel réel en eau de la zone**

Action 9 : Modélisation de l'évolution du potentiel en eau du bassin

Pour pouvoir répondre de façon adéquate et correcte à la demande en eau de la zone et réussir dans ce sens une planification de la gestion de la ressource pour le moyen terme, il est indispensable de doter l'agence de moyens lui permettant de connaître de façon continue comment le potentiel en eau évolue/évoluera considérant le changement climatique et ses effets potentiels sur le bilan hydrique.

Aussi un modèle, réalisé et suivi dans le cadre d'une coopération entre l'agence, la DMN et des universités, devrait être élaboré et mis à jour progressivement. Ce modèle doit intégrer les prévisions des grands modèles de circulation générale au niveau de la région, la modélisation hydrologique du bassin et une modélisation hydraulique considérant ces prévisions.

↗ **Recharge artificielle des nappes souterraines**

Action 10 : Recharge artificielle de nappes

Procéder à des recharges artificielles de nappes pour protéger les eaux d'une évaporation qui va s'accroître avec l'élévation prévue des températures. Sensibiliser, former sur cette pratique.

7.4.2. Axe stratégique d'adaptation II :

↗ **Programmes d'économie d'eau en irrigation**

Action 11 : Economie d'eau en irrigation

Agir au niveau de la maîtrise de l'utilisation de l'eau dans les périmètres de la zone. 92% des eaux mobilisées y sont utilisées pour l'irrigation. Il s'agit d'actions d'amélioration des performances des systèmes d'irrigation et de reconversion de parcelles du système gravitaire à l'irrigation localisée. Tenir compte au niveau de la conception et de la mise en œuvre de ces actions de l'augmentation prévue en relation avec le changement climatique :

- Des températures de l'air et donc de l'évapotranspiration et de la demande en eau d'irrigation qui en résulte ;
- De la fréquence et de l'intensité des sécheresses et des inondations.

↗ **Programmes d'économie d'eau potable**

Action 12 : Economie d'eau potable

Mettre en œuvre trois types d'action allant dans le sens de l'économie de l'eau potable :

- Réhabilitation et modernisation des réseaux de distribution ;
- Assistance technique au profit des gros consommateurs : industries, tourisme ;
- Développement de l'équipement en bornes fontaines en milieu rural.

↗ **Programme de préservation des eaux souterraines au niveau des périmètres irrigués**

Action 13 : Préservation des eaux souterraines

Mettre en œuvre deux types d'action en vue de limiter la baisse continue des niveaux des nappes de plaines et l'intrusion marine au niveau des nappes côtières :

- Limiter les prélèvements de ces nappes ;
- Interdire de nouveaux points de prélèvement et l'extension des périmètres au niveau de ces nappes.

Ceci doit être fait d'une part à travers une plus grande participation/responsabilisation des usagers dans la gestion des eaux souterraines de la zone, d'autre part avec le renforcement du système de contrôle et sanctions, la création des périmètres de sauvegarde et d'interdiction (contrats de nappe, Police de l'eau).

Action 14 : Redevance de l'usage de l'eau au niveau de l'irrigation

Mettre en place et appliquer une redevance au niveau de l'utilisation de l'eau pour l'irrigation qui amène les consommateurs à maîtriser leur usage de l'eau tout en différenciant les cas du petit agriculteur du gros exploitant. La démarche devant être adoptée reste à définir pour éviter des conséquences néfastes sur le pouvoir d'achat des citoyens pouvant résulter d'une augmentation possible du prix des produits agricoles.

Action 15 : Recours aux cultures économes d'eau (Action nouvelle) :

Promotion du recours aux cultures agricoles plus économes en eau et résistantes aux sécheresses et aux inondations. Dans ce sens, Il y'a un besoin évident d'appuis techniques et financiers et aussi d'une vulgarisation des résultats des travaux acquis sur ces aspects par l'INRA.

7.4.3.Axe stratégique d'adaptation III :

✦ **Plan d'action pour la préservation de la qualité des ressources en eau et la lutte contre la pollution :**

Action 16 : Dépollution domestique

Avec l'augmentation de la température et la forte variation des débits d'eau prévus en relation avec le changement climatique, le pouvoir épurateur des milieux hydriques naturels sera amoindri. Une adaptation du niveau d'épuration devant être réalisé à travers ces STEPs doit être considérée.

Action 17 : Dépollution industrielle (Prévue dans le PDAIRE)

La dépollution industrielle prévue concerne la mise en place d'installations de traitement des rejets des huileries avec l'élimination des margines ; des sucreries et des autres industries (abattoirs, tanneries, etc.) connectées aux réseaux d'assainissement domestique.

Action 18 : Lutte contre la pollution d'origine agricole

Une action de lutte contre la pollution d'origine agricole à travers le développement de la connaissance/recherches sur le comportement des polluants d'origine agricole, la sensibilisation, et la vulgarisation des bonnes pratiques agricoles préservatrices de la qualité de l'eau.

La pollution des nappes et l'eutrophisation des eaux résultant de la pollution agricole devraient être accentuées avec l'augmentation de la température et la forte fluctuation des débits

d'eaux prévues avec le changement climatique. Ce sont des volets devant être traités de près dans cette action.

Action 19 : Mise en place de décharges contrôlées et réhabilitation des anciennes

Mise en place de nouvelles décharges contrôlées et réhabilitation d'anciennes avec pour effet direct la limitation de la pollution des systèmes hydriques avoisinants.

Avec l'augmentation de la température et la forte fluctuation des débits d'eau prévus en relation avec le changement climatique, le pouvoir épurateur des milieux hydriques naturels sera amoindri. Une adaptation du niveau et de la forme de traitement des rejets pouvant résulter de ces décharges doit être considérée.

Action 20 : Traitement des bassins versants

Aménagement des Bassins Versants pour lutter contre l'érosion et par la suite l'envasement des systèmes hydriques.

Ces traitements des bassins versants trouvent plus leur importance avec le changement climatique prévu qui risque d'accentuer les événements hydro-climatiques extrêmes (sécheresses/inondations) et d'intensifier ainsi l'érosion.

Action 21 : Préservation des lacs naturels et artificiels et accompagnement de leur valorisation

Suivre et accompagner la préservation des lacs naturels et artificiels de la zone et leur valorisation.

En périodes de sécheresses, devant être plus fréquentes avec le changement climatique prévu, ces lacs représentent des alternatives importantes pour les populations avoisinantes. Aussi leur préservation/valorisation est une action importante allant vers l'adaptation au CC.

7.4.4. Axe stratégique d'adaptation IV

↗ Programme de prévention et lutte contre les inondations

Action 22 : Protection des zones exposées aux inondation

Mise en œuvre de mesures structurelles qui concourent à la protection des zones exposées aux inondations pour atténuer l'aléa naturel.

Réalisation de mesures préventives pour contrôler les actions anthropiques ayant pour conséquence d'étendre ou d'aggraver les impacts des inondations : Délimitation du domaine public hydraulique, Contrôle et réglementation de l'occupation des sols au niveau des zones inondables, Amélioration de la prévision et de l'annonce des crues.

Action 23 : Contrôle des actions pouvant étendre l'impact des inondations

Réalisation de mesures préventives pour contrôler les actions anthropiques ayant pour conséquence d'étendre ou d'aggraver les impacts des inondations : Délimitation du domaine public hydraulique, Contrôle et réglementation de l'occupation des sols au niveau des zones inondables, Amélioration de la prévision et de l'annonce des crues.

↗ **Inondations, sécheresses et aménagement du territoire**

Action 24: Risques hydro-climatiques (inondations et sécheresses) et urbanisme

Intégration systématique des risques hydro-climatiques en relation avec les inondations et les sécheresses dans les politiques/documents d'urbanisme (SDAU, PA, PDAR, ...)

7.4.5.Axe stratégique d'adaptation V :

↗ **Mise en place d'un cadre institutionnel, juridique et financier pouvant permettre de considérer le risque climat dans la politique de l'eau au niveau de la zone**

Action 25 : Renforcement de la commission provinciale de l'eau

Renforcer la commission provinciale de l'eau instituée par la loi 10/95, tant au niveau de ses attributions qu'au niveau des moyens humains et matériels dont elle dispose pour lui permettre de jouer son rôle au niveau territorial en synergie avec l'agence de bassin hydraulique.

Action 26 : Création du comité de la zone d'action de l'ABHOER

Créer un comité de la zone d'action de l'ABHOER rassemblant des représentants des différentes administrations, des différents groupes d'usagers, d'universités et d'ONGs locales pour permettre des concertations approfondies qui guideraient dans la gestion globale des ressources en eau de la zone en particulier durant les situations critiques prévues en relation

avec le changement climatique. Cet organe jouerait le rôle de parlement de l'eau au niveau de la zone. Il soutiendrait le conseil d'administration de l'agence dans sa mission.

Action 27 : Plan de sécheresse et plan de lutte contre les inondations

Mise en place de plans de sécheresse : Des plans de sécheresse devraient être établis. Ils permettraient de définir les seuils d'alerte et les priorités d'intervention et d'allocation de l'eau. Pour accompagner leur mise en œuvre et leur suivi, un comité sécheresse sera formé au niveau de la zone. Il veillera au contrôle de la mise en application des décisions et recommandations du plan sécheresse et à la gestion des situations de crises.

Amélioration et renforcement de la mise en œuvre du plan de lutte contre les inondations considérant les points noirs.

Action 28 : Procédures de gestion des eaux et des conflits au niveau des retenues

Mise en place de procédures claires, précises et transparentes au niveau de la gestion des eaux des retenues en particulier durant les périodes de crues, d'inondations et de sécheresses. L'objectif est de :

- Protéger les populations et les biens ;
- Maximiser le profit au niveau de l'utilisation de la ressource avec des priorités préétablies et approuvées par l'ensemble des intervenants ;
- Optimiser ainsi l'utilisation des ressources disponibles dans ces retenues ;
- Assurer une bonne gestion des conflits entre les différents usagers de l'eau.

Action 29 : Lutte contre les pollutions accidentelles

Mise en place d'un système organisationnel et de moyens humains et financiers pour protéger les ressources en eau de la zone des différentes formes de pollutions accidentelles.

Action 30 : Intégration du risque climatique dans les études d'impact

Intégration du risque climatique dans les études d'impact environnementales/évaluations environnementales stratégiques des grands projets/politiques/programmes en relation avec les ressources en eau de la région.

Action 40 : Réglementation des rejets :

Mesures réglementaires et institutionnelles pour réglementer les rejets et protéger ainsi les milieux récepteurs

Opérationnaliser la Police de l'eau pour surveiller la pollution et la doter de moyens humains et juridiques.

Action 41 : Assurances sécheresses et inondations

Amélioration du système d'assurances sécheresses et inondations et renforcement du fonds de catastrophes en relation avec ces événements hydro-climatiques extrêmes.

Action 45 : Technologies adaptatives

Création d'incitations financières pour promouvoir le recours aux technologies et approches adaptatives dans la gestion des ressources en eau (détaxes, subventions, ...).

Action 46 : Financements additifs

Développement de nouveaux mécanismes de financement pour opérationnaliser les actions d'adaptation :

- Au niveau international (Fonds d'adaptation, coopération internationale, Fonds vert) ;
- Au niveau national avec une implication du secteur privé.

Action 47 : Commission de suivi de la stratégie

Mise en place d'une commission relevant du comité de la zone d'action de l'ABHOER chargée du suivi de la mise en œuvre de la stratégie d'adaptation de la gestion des ressources en eau dans la zone hydraulique de l'OER, de l'évaluation de l'efficacité de ses actions et de leurs performances, et de la mise à jour périodique des axes stratégiques considérant l'évolution du climat et de l'eau dans la zone.

⇒ **Renforcement du système d'information : Amélioration des techniques de mesures quantitatives et qualitatives, des moyens de traitement et d'archivage des données et leur mise en commun entre les différentes parties agissant dans le secteur de l'eau à l'échelle régionale**

Action 48 : Réseau de mesures des ressources en eau de la zone

Renforcement du réseau de suivi quantitatif et qualitatif des eaux de surface et souterraines de la zone gérée par l'agence avec aussi la mise en place de systèmes de suivi :

- Du manteau neigeux de la zone et de son évolution inter et intra annuelle en partenariat avec la DMN ;
- Du transport solide dans la zone en partenariat avec le haut-commissariat aux eaux et forêts ;
- Des maladies hydriques de la zone en partenariat avec le ministère de la santé

Action 49 : Banque de données Climat/Eau pour la zone

Renforcement de la banque de données et d'informations sur l'eau et le climat de la zone (BADRE 21) et amélioration de sa mise à jour et de son accessibilité par les différents acteurs concernés. Cette action doit être mise en œuvre dans le cadre d'une collaboration entre l'agence et les différents pourvoyeurs de données hydro-climatiques dont la DMN, le ministère de l'agriculture, les eaux et forêts, le département de l'environnement, etc.

✎ **Programmes d'éducation, de sensibilisation et de communication**

Action 50 : Réalisation d'un programme de sensibilisation et de communication sur la gestion de l'eau et le risque changement climatique

Ce programme pourrait intégrer des séminaires et des actions médiatiques destinés aux acteurs locaux et aux ONGs autour des aspects suivants :

- + Changement climatique et ressources en eau, perspectives pour la zone : Vulnérabilité et besoins d'adaptation ;
- + Possibilités d'économie de l'eau au niveau des différents usages ;
- + Prévention et la réduction des pollutions à la source ;
- + Pratiques de captage des eaux pluviales et leurs efficacités dans les conditions climatiques extrêmes ;
- + Techniques de recharges artificielles de nappes ;
- + Possibilités d'épuration des eaux usées industrielles pour les secteurs présents dans la zone ;

- + Cultures agricoles plus économes en eau et résistantes aux sécheresses et aux inondations ;
- + Moyens et approches pouvant permettre une limitation et une maîtrise de la pollution agricole : Bonnes pratiques agricoles préservatrices de la qualité de l'eau ;
- + Importance de la collecte et du traitement des déchets pour la préservation des ressources en eau de la région.

Pour donner plus d'efficacité à cette action, il est recommandé d'organiser un Forum annuel de l'eau dans la zone associant les ONGs locales, les universités et les différents intervenants dans le domaine de l'eau ou les thématiques précitées pourraient être présentées et débattues.

↗ **Programme de formation continue**

Action 51 : Réalisation d'un programme de formation sur les moyens et méthodes de gestion de l'eau en relation avec le changement climatique

Ce programme serait destiné aux ingénieurs de l'administration, aux techniciens communaux, aux cadres de la commission provinciale de l'eau, aux membres du comité régional des EIE, aux membres du service environnement de la gendarmerie (police de l'eau) et aux cadres des bureaux d'études de la zone et universitaires. Ce programme pourrait intégrer des formations sur les aspects suivants :

- Dimensionnement et gestion des ouvrages hydrauliques considérant le changement climatique ;
- Gestion de l'eau et événements hydro-climatiques extrêmes ;
- Nouvelles technologies adaptatives dans la gestion des ressources en eau ;
- Dessalement de l'eau de mer ;
- Techniques de recharges artificielles de nappes.

↗ **Programme de formation/recherches**

Action 52 : Développement des programmes de recherche scientifique

Il s'agit, ici, de mener des études et recherches associant l'ABHOER, la DMN, l'INRA et des universités/écoles d'ingénieurs et des ONGs spécialisées pour suivre le changement climatique et ses effets possibles sur l'eau dans la zone. Un programme de recherche global 'EAU/CLIMAT BHOER' pourrait être établi et suivi dans le cadre d'un partenariat entre ces différents acteurs. Ce programme traiterait des aspects suivants :

- + La Modélisation des prévisions climatiques en relation avec le changement climatique dans la zone hydraulique de l'OER ;
- + La Modélisation hydro-climatique du bassin ;
- + La Pollution et Qualité des eaux de la zone et changement climatique ;
- + Les outils d'aide à la gestion de l'eau considérant les risques climatiques ;
- + Les indicateurs de vulnérabilité et d'adaptation de l'eau dans la région ;
- + Possibilités agricoles pour la zone avec le risque climat et ses conséquences sur l'eau

Action 53 : Formation universitaire spécialisée

Il s'agit, ici, de mettre en place une licence professionnelle et un master au niveau de la zone dans le domaine eau-CC pour la doter de cadres maîtrisant cet aspect.

7.5. Hiérarchisation des actions identifiées

Une hiérarchisation qualitative des actions de mise en œuvre de la stratégie d'adaptation de la gestion des ressources en eau au changement climatique a été faite considérant les critères de notations :

Le tableau 13 résume et illustre les résultats de cette hiérarchisation avec 7 groupes d'actions identifiés. Il est important de noter que les actions situées dans les groupes 5, 6 et 7 ne sont pas nécessairement des actions facultatives ou non urgentes, souvent c'est leur coût important qui les décline. La recherche d'investissement important pour les réaliser s'impose.

Les actions relevant de l'axe stratégique gouvernance se démarquent largement dans cette hiérarchisation. Elles représentent, en effet, 100% des actions du groupe le plus prioritaire 1 et

puis respectivement 60%, 43% et 40% des actions des 3 groupes qui suivent. Notons par ailleurs que sur les 17 actions de gouvernance.


Aussi, ce qui semble prioritaire pour réussir une adaptation de la gestion des ressources en eau aux changements climatiques est plutôt une action forte en matière de gouvernance permettant de relever les défis politiques, institutionnels, juridiques, humains et financiers. Ceci doit concerner en particulier les aspects suivants :


- Une plus grande intégration des enjeux hydro-climatiques dans les politiques sectorielles de la zone d'action de l'ABHOER en synergie et de façon complémentaire : Cela doit concerner, en particulier, le développement envisagé de l'agriculture irriguée dans la zone ;
- Une amélioration du cadre institutionnel de la gestion des ressources en eau de la zone à travers la concrétisation du cadre et des principes définis par la loi 10-95 tant pour maîtriser/optimiser les prélèvements et l'utilisation de l'eau que pour préserver la ressource (police de l'eau) ;
- Un renforcement de la base de données et d'informations sur l'eau et le climat permettant d'avoir une meilleure visibilité sur le comportement hydro-climatique actuel et futur de la zone et l'organisation de son accessibilité par les différents acteurs concernés ;
- Une sensibilisation et une éducation des différents acteurs de la zone sur le risque climat et les moyens et approches existants pour y faire face en matière d'utilisation et de préservation de l'eau ;
- La formation de techniciens et de cadres maîtrisant les pratiques de gestion de l'eau les plus adaptées aux changements climatiques et ses effets potentiels attendus pour la zone ;
- Le développement d'études et de recherches sur le comportement hydro-climatique de la zone et son devenir en relation avec les changements climatiques, et sur les moyens et méthodes les plus adéquats permettant de maximiser l'efficacité d'utilisation de l'eau et de protéger la ressource, la population locale, les milieux naturels et les infrastructures


- La mise en place d'un dispositif de financement de l'adaptation de la gestion des ressources en eau de la zone et le développement de l'accès aux fonds internationaux d'adaptation.
- Cette priorité à donner à l'amélioration de la gouvernance pour réussir l'adaptation de la politique de l'eau de la zone d'action de l'ABHOER, résultant de la hiérarchisation, n'enlève en rien le besoin et l'urgence pour la zone d'actions fortes et durables en matière de mobilisation de l'eau, de maîtrise de la demande, de préservation de la ressource, et de protection des risques hydro-climatiques comme cela est suggéré dans le PDAIRE. Bien au contraire, les actions de gouvernance proposées ici joueront le rôle de levier permettant de mieux relever les défis des autres axes stratégiques.


Partie II : Chapitre V : Stratégie d'Adaptation de la Gestion des Ressources en Eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia


Niveau	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7
Actions d' adaptation	Programme de sensibilisation/ communication sur la gestion de l'eau et le risque CC	Création du comité de la zone d'action de l'ABHOER	Entretien des ouvrages hydrauliques	Recharge artificielle de nappes	Nouveaux barrages	Réutilisation des eaux usées épurées	Dessalement des eaux marines
	Programme de formation/ moyens et méthodes de gestion des RE CC	Procédures de gestion des eaux et des conflits	Apports d'eaux de bassins excédentaires	Traitement des bassins versants	Préservation des eaux souterraines	Lutte contre la pollution d'origine agricole	Technologies adaptatives
	Commission de suivi de la stratégie	Plan de sécheresse et plan de lutte contre les inondations	Modélisation de l'évolution du potentiel en eau de la région	Préservation des lacs naturels et artificiels et accompagnement de leur valorisation	Recours aux cultures économes d'eau	Mise en place de décharges contrôlées et réhabilitation des anciennes	
		Recherche de Financements additifs pour l'adaptation	Amélioration de la tarification au niveau de l'irrigation	Commission provinciale de l'eau	Dépollution domestique		
		Banque de données Climat/Eau pour la région	Economie d'eau en irrigation	Assurances sécheresses et inondations	Dépollution industrielle		
		Risques hydro-climatiques (inondations et sécheresses) et urbanisme	Contrôle des actions pouvant étendre l'impact des inondations		Lutte contre les pollutions accidentelles		
		Développement de Petits et moyens Barrages	Protection des zones exposées aux inondations		Economie d'eau potable		
		Captage et exploitation directe des eaux pluviales	Réglementation des rejets				
		Mobilisation des eaux souterraines dans les zones montagneuses	Réseau de mesures des ressources en eau de la région				
			Développement des programmes de recherche scientifique au niveau de la région				
			Formations universitaires spécialisées				
		Etudes d'impact et risque climatique					

-  Actions relatives à l'axe stratégique d'adaptation I « Gestion et développement de l'offre pour répondre aux besoins futurs en eau du BHOER considérant les limites pouvant résulter de l'impact possible du changement climatique sur cette composante »

-  Actions relatives à l'axe stratégique d'adaptation II « Optimisation de la demande et augmentation de l'efficacité de l'utilisation des ressources en eau dans le BHOER considérant en particulier la tendance au réchauffement climatique et l'alternance de périodes sèches et de périodes très humides prévues »

-  Actions relatives à l'axe stratégique d'adaptation III « Préservation des ressources en eau et lutte contre la pollution de l'eau dans le BHOER en particulier durant les périodes de sécheresse, de vagues de chaleur et d'inondations pouvant survenir en relation avec le changement climatique »

-  Actions relatives à l'axe stratégique d'adaptation IV « Prévention et réduction des risques hydro-climatiques pour le territoire, les populations, les activités économiques et les infrastructures publiques et industrielles pouvant résulter d'événements extrêmes engendrés par le changement climatique »

-  Actions relatives à l'axe stratégique d'adaptation V « Amélioration de la gouvernance au niveau de la gestion des ressources en eau pour faire face aux effets du changement climatique »

Conclusion et perspectives

Le bassin de l'Oum Er Rbia est un bassin hydraulique qui connaît déjà actuellement un déficit hydrique. La diminution forte constatée des apports d'eaux depuis les années 1980-2010 (de l'ordre de 40% par rapport aux années 1940-1980) et l'augmentation de la demande et la dégradation des eaux par différentes formes de rejets explique cette situation.

Les prévisions concernant le changement climatique pour cette région vont dans le sens d'une augmentation du réchauffement de la région d'ici 2050 avec l'augmentation des pertes par évaporation et par évapotranspiration que cela induit. Le niveau des précipitations doit selon ces prévisions stagner ou diminuer légèrement par rapport à la situation actuelle. Aussi, la rareté de l'eau qui caractérise cette région et les sécheresses récurrentes feront partie du paysage hydro-climatique de la région pour les 20 années à venir. La stratégie d'adaptation de la gestion des ressources en eau du bassin face au changement climatique doit considérer cette nouvelle donne hydro-climatique.

Le travail réalisé a permis de définir l'objectif devant être visé par une stratégie d'adaptation de la gestion des ressources en eau du bassin OER et plusieurs principes de base devant guider les choix stratégiques devant être faits.

Ce travail a montré que la prise en compte du risque changement climatique pour le bassin doit nous amener à agir dans deux sens au niveau de la planification de la gestion des eaux durant les décennies à venir :

- Être autant que possible conservateur au niveau de l'évaluation du potentiel en eau du bassin. Dans ce sens, bâtir le PDAIRE pour 2030 considérant les apports en eau moyens de la période 1941 - 2011 est une approche qui paraît trop optimiste. Il serait plus judicieux de se baser sur le potentiel moyen pour les années 1980-2010. Avec cette hypothèse et considérant les projets et initiatives prévus dans le PDAIRE, le déficit du bassin serait plus autour des 1560 Mm³ que les 560 Mm³ prévus actuellement. Ce déficit doit être comblé par un transfert plus important que prévu à partir de régions excédentaires, par la mise en place d'un programme ambitieux de dessalement d'eau de mer pour répondre aux besoins en AEPI des villes côtières de la zone, et aussi par la baisse des quantités d'eau

pouvant être allouées en 2050 pour l'irrigation (Préparer le secteur agricole à cette hypothèse) ;

- Une grande partie des actions prévues par la version actuelle du PDAIRE sont adaptatives, elles nécessitent parfois de légères modifications/renforcements. L'action importante à renforcer dans le PDAIRE concerne la gouvernance : l'organisation institutionnelle, la sensibilisation, la formation, la recherche, l'acquisition de données et leur mise à disposition, la recherche de financements supplémentaires pour financer ces efforts d'adaptation. Un grand nombre de nouvelles actions sont prévues, ici, pour aller dans ce sens.

Notons que cette stratégie d'adaptation vise avant tout la mise en place d'un processus itératif de suivi et de mise à jour du risque climat/eau pour cette région et son intégration au fur à mesure dans les politiques de l'eau projetées. Il est donc essentiel que les structures de gouvernance de ces aspects proposés soient mises en place dès que possible.

Bibliographie

- A brief history of climate change - BBC News.* (n.d.). Retrieved October 2, 2020, from <https://www.bbc.com/news/science-environment-15874560>
- Albédo. (2019). *Le bilan énergétique terrestre Albédo , Effet de serre.* 1–8.
- Alibou, J. (2002). Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau et les zones humides du Maroc. *Table Ronde Régionale En Méditerranée Athènes, Grèce*, 1–39.
- Allain-El Mansouri, B. (2001). *L'eau et la ville au Maroc : Rabat-Salé et sa périphérie.* <http://books.google.fr/books?id=RwloRill7RwC&lpg=PA203&ots=jFU8TIo8IJ&dq=tarif onep 1977&hl=fr&pg=PA203#v=snippet&q=RED R2GIE&f=false>
- André Musy, C. H. et E. R. (2014). *Hydrologie 1 - Une science de la nature, une gestion sociétale.*
- Aykut, S. C., & Dahan, A. (2014). La gouvernance du changement climatique. Anatomie d'un schisme de réalité. *Gouverner Le Progrès et Ses Dégâts, Paris, La Découverte*, 97–132.
- Beniston, M. (2009). *Changements climatiques et impacts: de l'échelle globale à l'échelle locale.* PPUR presses polytechniques.
- Bhatti, N. B., Siyal, A. A., Qureshi, A. L., & Bhatti, I. A. (2019). Land Covers Change Assessment After Small Dam's Construction Based on the Satellite Data. *Civil Engineering Journal*, 5(4), 810–818.
- Biermann, F., Bai, X., Bondre, N., Broadgate, W., Arthur Chen, C. T., Dube, O. P., Erisman, J. W., Glaser, M., van der Hel, S., Lemos, M. C., Seitzinger, S., & Seto, K. C. (2016). Down to Earth: Contextualizing the Anthropocene. *Global Environmental Change*, 39, 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.11.004>
- Born, K., Christoph, M., Fink, A. H., Knippertz, P., Paeth, H., & Speth, P. (2008). Moroccan climate in the present and future: combined view from observational data and regional climate scenarios. In *Climatic changes and water resources in the Middle East and North Africa* (pp. 29–45). Springer.

- Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., Jarlan, L., Chaponnière, A., Maisongrande, P., Boulet, G., & Chehbouni, A. (2010). Long-term analysis of snow-covered area in the Moroccan High-Atlas through remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S109–S115.
- Brondizio, E. S., O'Brien, K., Bai, X., Biermann, F., Steffen, W., Berkhout, F., Cudennec, C., Lemos, M. C., Wolfe, A., Palma-Oliveira, J., & Chen, C. T. A. (2016). Re-conceptualizing the Anthropocene: A call for collaboration. *Global Environmental Change*, 39, 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.02.006>
- Brucker, L., Dinnat, E. P., Picard, G., & Champollion, N. (2014). Effect of snow surface metamorphism on aquarius l-band radiometer observations at dome C, antarctica. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11), 7408–7417. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2312102>
- Brulebois, E. (2016). *Impacts du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau en Bourgogne: aspects quantitatifs et qualitatifs*.
- Butler, J. H., & Montzka, S. A. (2018). *The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI)*. NOAA Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. National Oceanic & Atmospheric Administration.
- CAP-NET. (2006). PLANS DE GESTION RESSOURCES EN EAU Manuel de Formation et Guide Opérationnel Manuel de Formation et Guide Opérationnel. Cycle.
- Chavan, S. B., Dhyani, S. K., Prasad, R., Handa, A. K., Alam, B., Rizvi, R. H., Saroj, N., Jain, A. K., & Jha, A. (2020). *Carbon modeling of agroforestry systems at farmers' field in Indo-gangetic plains of India*.
- Chen, R. S., Boulding, E., & Schneider, S. H. (1983). *Social science research and climate change: an interdisciplinary appraisal*. Springer Science & Business Media.
- Choukri, F., Chikhaoui, M., Naimi, M., Raclot, D., Pepin, Y., & Lafia, K. (2016). Impact du changement climatique sur l'évolution de l'érosivité des pluies dans le Rif Occidental (Nord du Maroc). *European Scientific Journal*, 12(32), 79–93. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n32p79i>
- Christoforou, P., & Hameed, S. (1997). *Solar cycle and the Pacific "centers of action."* 24(3), 293–296.

- Ciesla, W. M. (1997). *Le changement climatique, les forêts et l'aménagement forestier: aspects généraux* (Vol. 126). Food & Agriculture Org.
- Cosandey, Claude, and M. R. (2012). *Hydrologie continentale*.
- Dauphiné, A., & Provitolo, D. (2013). *Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Armand Colin.
- DE MARSILY, G. (2006). *Continental Waters*.
- Driouech, F. (2010). *Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique: descente d'échelle et incertitudes*.
- 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.
- Dufour, E. (2010). *Adaptation aux changements climatiques dans le nord du Canada*.
- DUFRESNE, J.-L., SALAS Y MELIA, D., DENVIL, S., TYTECA, S., ARZEL, O., BONY, S., BRACONNOT, P., BROCKMANN, P., CADULE, P., CAUBEL, A., CHAUVIN, F., DEQUE, M., DOUVILLE, H., FAIRHEAD, L., FICHEFET, T., FOUJOLS, M.-A., GRANDPEIX, J.-Y., GUEREMY, J.-F., HOURDIN, F., ... FRIEDLINGSTEIN, P. (2006). Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*, 8(55), 45. <https://doi.org/10.4267/2042/20120>
- Eldin, M. (1971). Le climat. *Le Milieu Naturel de La Côte d'Ivoire*, 73–108.
- Ferguson, I. M., & Maxwell, R. M. (n.d.). *Human impacts on terrestrial hydrology: climate change versus pumping and irrigation*.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315.
- Geoscience, N. (2015). *volcaniques sur*. 17–18.
- Gérin, M., Gosselin, P., Cordier, S., Viau, C., Quénel, P., & Dewailly, É. (2003). *Environnement et santé publique: Fondements et pratiques*. Édisem/Tec & Doc.
- GIEC. (2008). *Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse*. GIEC.
- GIEC. (2013a). *CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2013 Les éléments scientifiques Résumé à*

- l'intention des décideurs Changements climatiques 2013 Les éléments scientifiques Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental*. www.ipcc.ch
- GIEC. (2013b). *CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2013 Les éléments scientifiques Résumé à l'intention des décideurs Changements climatiques 2013 Les éléments scientifiques Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat Résumé à l'intention des décideurs* Publié sous la direction de. www.ipcc.ch
- GIEC, Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. M. B., & Allen, S. K. (2013). *Changements climatiques 2013 Les éléments scientifiques*. *Giec*, 11. <https://doi.org/doi:10.1017/CBO9781107415324.024>
- GIZ. (2011). *Climate Proofing*.
- GIZ. (2017). *Guide méthodologique pour l'adaptation au changement climatique des zones industrielles*. 100.
- Hien, F. G. (1995). *La régénération de l'espace sylvo-pastoral au Sahel: une étude de l'effet de mesures de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso*. Hien.
- Huebener, H., & Kerschgens, M. (2007a). Downscaling of current and future rainfall climatologies for southern Morocco. Part I: Downscaling method and current climatology. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(13), 1763–1774.
- Huebener, H., & Kerschgens, M. (2007b). Downscaling of current and future rainfall climatologies for southern Morocco. Part II: Climate change signals. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(8), 1065–1073.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*. In *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415416>
- Ipcc. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*. In *Change* (Vol. 446, Issue November). <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- IPCC. (2013). *AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

- Jean-Pierre Garrec. (2000). *De Concentration Atmosphérique. 1.*
- Jiang, W., Deng, Y., Tang, Z., Lei, X., & Chen, Z. (2017). Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models. *Ecological Modelling*, 345, 30–40.
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailles, J., Hilal, M., & Wavresky, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Kettab, A., Mitiche, R., & Bennaçar, N. (2008). De l'eau pour un développement durable: enjeux et stratégies. *Revue Des Sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 21(2), 247–256.
- Laouina, A. (2006). *Prospective "Maroc 2030": Gestion durable des ressources naturelles de la biodiversité au Maroc.* 118.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C., Ivar Korsbakken, J., Peters, G. P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Boden, T. A., Tans, P. P., Andrews, O. D., Arora, V. K., Bakker, D. C. E., Barbero, L., Becker, M., Betts, R. A., Bopp, L., ... Zhu, D. (2018). Global Carbon Budget 2017. *Earth System Science Data*, 10(1), 405–448. <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>
- Liang, Y., Liu, L., & Huang, J. (2017). Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China. *PloS One*, 12(2), e0172494.
- MEMEE. (2019). *Deuxième Rapport Biennal Actualisé.*
- Ministère Délégué Chargé de l'Environnement. (2016). *Troisième communication nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.* 296.
- O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), 323–344.
- Organisation météorologique mondiale, O. (2013). *BULLETIN DE L' OMM SUR LES POUSSIÈRES ATMOSPHÉRIQUES.*
- Organisation météorologique mondiale, O. (2018). *TEMPS CLIMAT EAU BULLETIN DE L' OMM SUR LES GAZ. November.*
- Organisation météorologique mondiale, O. (2019). *Rapport annuel.*

- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse*. GIEC.
- Paeth, H., Born, K., Girmes, R., Podzun, R., & Jacob, D. (2009). Regional climate change in tropical and northern Africa due to greenhouse forcing and land use changes. *Journal of Climate*, 22(1), 114–132.
- Paeth, H., Hall, N. M. J., Gaertner, M. A., Alonso, M. D., Moumouni, S., Polcher, J., Ruti, P. M., Fink, A. H., Gosset, M., & Lebel, T. (2011). Progress in regional downscaling of West African precipitation. *Atmospheric Science Letters*, 12(1), 75–82.
- Paeth, H., & Pollinger, F. (2010). Enhanced evidence in climate models for changes in extratropical atmospheric circulation. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 62(5), 647–660.
- Patricola, C. M., & Cook, K. H. (2010). Northern African climate at the end of the twenty-first century: an integrated application of regional and global climate models. *Climate Dynamics*, 35(1), 193–212.
- PDAIRE. (2010).
- Peck, L. S. (2005). Prospects for surviving climate change in Antarctic aquatic species. *Frontiers in Zoology*, 2, 1–8. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-2-9>
- Pnue, O. M. M. (2007). *Changements Climatiques 2007 R a p p o r t d e s y n t h è s e*.
- Rabier, F., Mahfouf, J.-F., & Klinker, E. (2000).) CEPMMT Reading Royaume-Uni La Météorologie 8 e série-n° 30-juin. In *documents.irevues.inist.fr* (Issue 2). <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/36125>
- Roche, P.-A., Miquel, J., & Gaume, E. (2012). *Hydrologie quantitative: Processus, modèles et aide à la décision*. Springer Science & Business Media.
- Srinivasan, R., & George, C. (2015). QGIS Interface for SWAT (QSWAT) October 2015. *Setup for Robit Watershed, Lake Tana Basin, October*, 20–21. https://swat.tamu.edu/media/116091/qswat-manual_v16.pdf
- Tickell, C. (1996). Climate & History. *Oxford Today*, 8, 27–30. <http://www.scotese.com/Default.htm>
- UNEP. (1997). *World atlas of desertification 2ED*. UNEP London, UK.

- UNEP. (2012). *UNEP Annual Report 2012 - 1972-2012: Serving People and the Planet*.
- Vigaud, N., Richard, Y., Rouault, M., & Fauchereau, N. (2009). Moisture transport between the South Atlantic Ocean and southern Africa: relationships with summer rainfall and associated dynamics. *Climate Dynamics*, 32(1), 113–123.
- Vizy, E. K., & Cook, K. H. (2002). Development and application of a mesoscale climate model for the tropics: Influence of sea surface temperature anomalies on the West African monsoon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D3), ACL-2.
- Wu, T., Lu, Y., Fang, Y., Xin, X., Li, L., Li, W., Jie, W., Zhang, J., Liu, Y., Zhang, L., Zhang, F., Zhang, Y., Wu, F., Li, J., Chu, M., Wang, Z., Shi, X., Liu, X., Wei, M., ... Liu, X. (2018). The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): Main Progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development Discussions*, November, 1–50. <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-254>
- Xiao-Ge, X. I. N., Tong-Wen, W. U., Jiang-Long, L. I., Zai-Zhi, W., Wei-Ping, L. I., & Fang-Hua, W. U. (2013). How well does BCC_CSM1. 1 reproduce the 20th century climate change over China? *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 6(1), 21–26.
- Xin, Z., Xu, J., & Zheng, W. (2008). Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981–2006): Impacts of climate changes and human activities. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(1), 67–78.
- Zeino-mahmalat, E., & Bennis, A. (2012). *Environnement et Changement Climatique au Maroc Diagnostic et Perspectives*. 1–88.
- Zeng, S., Xia, J., & Du, H. (2014). Separating the effects of climate change and human activities on runoff over different time scales in the Zhang River basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(2), 401–413.

Annexe 1

⇒ La légende de la carte géologique

	ROCHES SEDIMENTAIRES SILURIEN
	ROCHES SEDIMENTAIRE CAMBRIEN MOYEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES CAMBRIEN INFERIEUR
	ROCHES SEDIMENTAIRES CAMBRO-ORDOVICIEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES CARBONIFERE MOYEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES CENOZOIQUE
	ROCHES SEDIMENTAIRES CRETACE CENOMANIEN-TURONIEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES CRETACE INFERIEUR
	ROCHES SEDIMENTAIRES CRETACE SENONIEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES DEVONIEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES DEVONIEN INFERIEUR
	ROCHES SEDIMENTAIRES DEVONIEN INFERIEUR-MOYEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES EOCENE
	ROCHES SEDIMENTAIRES HOLOCENE EOLIEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES HOLOCENE FLUVIATILE
	ROCHES SEDIMENTAIRES HOLOCENE MARIN
	ROCHES SEDIMENTAIRES JURASSIQUE CRETACE
	ROCHES SEDIMENTAIRES JURASSIQUE INFERIEUR
	ROCHES SEDIMENTAIRES JURASSIQUE MOYEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES MOCENE SUPERIEUR
	ROCHES SEDIMENTAIRES MOCENE SUPERIEUR-CONTINENTAL
	ROCHES SEDIMENTAIRES ORDOVICIEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES ORDOVICIEN INFERIEUR MOYEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES ORDOVICIEN SUPERIEUR
	ROCHES SEDIMENTAIRES PALEOCENE
	ROCHES SEDIMENTAIRES PERMIEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES PLEISTOCENE CONTINENTAL
	ROCHES SEDIMENTAIRES PLEISTOCENE EOLIEN
	ROCHES SEDIMENTAIRES PLIOCENE
	ROCHES SEDIMENTAIRES PLIOCENE CONTINENTAL
	ROCHES SEDIMENTAIRES PLIOCENE LACUSTRE
	ROCHES SEDIMENTAIRES TRIASIQUE

Annexe 2

⇒ Équation de Penman-Monteith

En 1948, Penman a combiné l'équilibre énergétique avec la méthode de transfert de masse et a dérivé une équation pour calculer l'évaporation d'une surface d'eau libre à partir des enregistrements climatologiques standard de l'ensoleillement, de la température, de l'humidité et de la vitesse du vent. Cette méthode dite de combinaison a été développée par de nombreux chercheurs et étendue aux surfaces recadrées en introduisant des facteurs de résistance.

La nomenclature de résistance fait la distinction entre la résistance aérodynamique et les facteurs de résistance à la surface. Les paramètres de résistance à la surface sont souvent combinés en un seul paramètre, le paramètre de résistance de surface « en vrac » qui fonctionne en série avec la résistance aérodynamique. La résistance à la surface, r_s , décrit la résistance du flux de vapeur à travers les ouvertures de stomates, la surface totale des feuilles et la surface du sol. La résistance aérodynamique, r_a , décrit la résistance de la végétation vers le haut et implique une friction de l'air qui coule sur les surfaces végétatives. Bien que le processus d'échange dans une couche végétale soit trop complexe pour être entièrement décrit par les deux facteurs de résistance, de bonnes corrélations peuvent être obtenues entre les taux d'évapotranspiration mesurés et calculés, en particulier pour une surface de référence uniforme de l'herbe.

La forme Penman-Monteith de l'équation de combinaison est :

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

où R_n est le rayonnement net, G est le flux de chaleur du sol, $(e_s - e_a)$ représente le déficit de pression de vapeur de l'air, ρ_a est la densité moyenne de l'air à pression constante, c_p est la chaleur spécifique de l'air, Δ représente la pente de la relation de température de pression de vapeur de saturation, γ est la constante psychrométrique, et r_s et r_a sont la surface (en vrac) résistances aérodynamiques. Les paramètres de l'équation sont définis au chapitre 3.

L'approche Penman-Monteith telle que formulée ci-dessus comprend tous les paramètres qui régissent l'échange d'énergie et le flux thermique latent correspondant (évapotranspiration) des étendues uniformes de végétation. La plupart des paramètres sont mesurés ou peuvent être facilement calculés à partir des données météorologiques. L'équation peut être utilisée pour le calcul direct de toute évapotranspiration des cultures, car les résistances de surface et aérodynamiques sont spécifiques aux cultures.

Annexe 3

⇒ **Les stations retenues du sous bassin Tessaout**

Nom- Station	X	Y	Mois manquants (%)
53	372 900,00	125 400,00	2%
640	323 800,00	118 800,00	9%
700	365 500,00	137 300,00	9%
752	398 900,00	143 300,00	14%
844	361 400,00	127 950,00	7%
857	351 000,00	90 000,00	1%
1304	348 400,00	137 500,00	40%
1961	327 300,00	197 650,00	0%
1968	320 350,00	124 550,00	5%
3120	349 200,00	126 800,00	9%
6624	378 600,00	135 900,00	7%
6784	340 800,00	140 600,00	9%
7740	328 300,00	111 200,00	15%

⇒ Les stations retenues du sous bassin Oum Er Rbia central

Nom- Station	X	Y	Mois manquants (%)
96	393 000,00	179 700,00	17%
673	379 500,00	168 600,00	69%
920	386 325,00	210 650,00	11%
1184	375 470,00	210 815,00	28%
1433	390 000,00	153 000,00	21%
1672	381 200,00	183 700,00	39%
1776	409 165,00	193 045,00	5%
2274	406 440,00	242 090,00	71%
2334	393 700,00	215 300,00	1%
2449	344 900,00	167 000,00	24%
3017	358 000,00	191 800,00	6%
3096	452 750,00	231 750,00	2%
3128	389 000,00	192 400,00	17%
3264	380 000,00	195 175,00	45%
3480	441 400,00	219 400,00	13%
3831	378 800,00	212 700,00	43%
4056	393 620,00	206 640,00	16%
4744	419 000,00	223 400,00	17%
4753	402 840,00	212 675,00	9%
4888	411 300,00	214 450,00	30%
4936	456 150,00	227 500,00	11%
4960	387 750,00	186 250,00	36%
5536	401 000,00	207 350,00	0%
5652	344 675,00	169 900,00	0%
5880	390 580,00	251 120,00	31%
6032	396 100,00	190 710,00	7%
6104	338 950,00	192 625,00	4%
6160	372 290,00	213 410,00	3%
6472	394 975,00	204 775,00	0%
6680	385 800,00	190 800,00	7%
7212	378 050,00	189 150,00	24%
7214	378 050,00	189 150,00	22%
7444	432 700,00	220 200,00	25%
7488	423 950,00	205 700,00	13%
7584	440 300,00	238 300,00	37%
8960	451 600,00	235 000,00	20%
8961	461 000,00	228 000,00	30%