

Présentation de thèse

Depuis plus d'un siècle, les rejets de Gaz à Effet de Serre (GES) en lien avec la croissance des activités humaines et au rythme de l'industrialisation qui se succède dans différents pays à l'époque moderne, n'ont cessé d'augmenter à l'échelle globale. L'effet de serre n'est autre que le piégeage par certains gaz d'une partie du rayonnement infrarouge terrestre, dont seulement 60 % s'évadent vers l'espace par le jeu des absorptions et des réémissions successives. L'ajout de gaz à effet de serre dans l'atmosphère comme du CO₂, intensifie l'effet de serre et fait augmenter la température et réchauffe les couches basses de l'atmosphère. Au cours des trente (30) dernières années, l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a fait augmenter la température moyenne à l'échelle du globe terrestre d'environ 0,2 °C par décennie (e.g, Hansen et al. 2006 ; Christensen et al. 2007). Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (GIEC, 2007), a attribué cette hausse de la température moyenne du globe, observée depuis le milieu du XXe siècle, à la hausse des concentrations des GES anthropiques. Cette augmentation des températures continuera dans le futur et tous les modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) prévoient une hausse de la température moyenne du globe, de 2 à 6 °C d'ici la fin du 21^{ème} siècle et une forte variabilité interannuelle du climat sera constatée (Giorgi, 2006), favorisant ainsi la recrudescence des évènements extrêmes (précipitations intenses, sécheresses, canicules).

De nombreuses interrogations se posent alors quant au fait que plusieurs changements résultants soient perceptibles aux échelles continentales et régionales et qui concerne différents aspects comme les modifications dans le fonctionnement des écosystèmes, le changement des précipitations et des régimes hydriques, les périodes d'extrêmes

climatiques plus longues, le décalage des saisons, la montée du niveau des océans, la désertification et les vagues de chaleur (IPCC, 2007a).

Cette évolution majeure modifie profondément l'équilibre climatique de la planète et ses conséquences sont dès aujourd'hui visibles dans le monde entier. À cet effet, le GIEC 2013, rappelle les gouvernements à trouver un accord pour réduire les émissions des gaz à effet de serre et à élaborer des stratégies d'adaptation aux conséquences des modifications du climat et au fonctionnement des écosystèmes quant à la hausse de la température. Les écosystèmes devront, soit s'adapter à des températures plus élevées, soit migrer vers de hautes latitudes ou altitude (Merot et al., 2012). Des nombreuses activités économiques, comme l'agriculture, le tourisme ou le développement côtier devront s'adapter à ce changement (Rosenweig et Hillel, 1998 ; Reddy et Hodge, 2000 ; Soussana, 2001).

Sur le continent africain, l'impact du changement climatique s'est illustré par les événements de sécheresse de plus en plus marquée et dont le nombre ne cesse d'augmenter, ce qui semble particulièrement sévère durant les deux à trois dernières décennies sur le Sahel et l'Afrique du Sud (Dai et al. 1998). Des augmentations considérables des superficies des zones arides ont été constatées suite à la sécheresse généralisée depuis les années 1970 sur l'Afrique (Dai, 2010). Au cours des 50 dernières années, l'Afrique a subi une des plus fortes variations de la pluviométrie observées à l'échelle du globe. Ces fluctuations climatiques ont, non seulement affecté le régime des précipitations, mais aussi engendré des conséquences sur les ressources hydrologiques et végétales. D'ici à la fin du siècle, selon les différents types de projections et type de modèle utilisé, on estime des baisses de l'ordre de 20 à 30 % sur les totaux annuels par rapport au niveau de référence 1961-1990 retenu par l'OMM (Christensen et al 2007). Si cette diminution des précipitations s'accompagne d'une forte variabilité interannuelle, elle

pourrait nuire au bilan hydrologique du continent africain et perturber de façon majeure plusieurs activités économiques (Christensen et al 2007).

Pour comprendre comment la variabilité du climat actuel interagit avec le milieu naturel, anticiper ce que pourraient être les conséquences des changements climatiques futurs et tenter de s'y adapter le mieux possible, il est nécessaire de faire des évaluations des impacts potentiels du changement climatique à l'échelle régionale et sur chaque secteur. Cette évaluation nécessite la disponibilité d'informations climatiques ; au moins deux variables, les précipitations et les températures, les plus importantes pour déterminer la disponibilité de l'eau, le climat et le type d'écosystème dans une région à des résolutions d'au moins une cinquantaine de km.

Le bassin méditerranéen, dont l'Algérie fait partie, du fait de sa situation géographique qui le place entre les régions arides (le Sahara entre autres) et humides (le nord de l'Europe), n'a pas échappé de ces changements (Folland, C. K., et al. 2001, Lionello, 2006a). Cette position le rend particulièrement vulnérable aux changements climatiques (Mariotti, 2015). Dans plusieurs études, le réchauffement de la région Ouest de la Méditerranée a été principalement enregistré en deux phases : à partir du milieu des années 1920 à 1950 et depuis le milieu des années 1970 (e.g. Brunet et al, 2001 ; Galan et al, 2001 ; Xoplaki et al, 2003, Brunet, 2007). Les mêmes constatations ont été signalées dans les bassins de l'Afrique méditerranéenne. Des tendances négatives de précipitations hivernales sur le bassin méditerranéen pour le 20^{ème} siècle ont été observées par plusieurs auteurs (Giorgi (2002a). Les précipitations moyennes du Maroc, par exemple, ont diminué et les saisons hiver-printemps sont les plus touchées (Driouech ; 2009).

En Algérie, l'importance du climat se fait sentir sur plusieurs sphères de la vie socio-économique de la société. Les événements de sécheresses prolongées qui ont frappé l'Algérie durant les dernières décennies ont généré des chamboulements dans les zones

climatiques, notamment des conditions de milieux semi-arides ont été constatées dans les régions côtières humides, et des conditions de milieux arides dans les hauts plateaux considérés auparavant comme semi-arides. Le processus de désertification est, aujourd'hui, décelable par l'œil de l'observateur. On a assisté à un ensablement progressif allant du léger voile éolien dans certaines zones à la formation de véritables dunes dans d'autres. En conséquence, cette sécheresse a eu des suites dramatiques sur les ressources naturelles, ce qui a affecté grandement l'autosuffisance alimentaire du pays suite à la baisse prononcée de la production agricole. De ce fait, de nombreux travaux sont de plus en plus consacrés à la caractérisation et aux causes climatiques potentielles de cette sécheresse aux échelles régionales et locales à travers l'analyse des séries pluviométriques) (e.g., Medjrab, 2005; Meddi et al., 2007; Meddi and Talia, 2007; Meddi and Hubert, 2003; Bekkoussa et al., 2008; Meddi et al., 2010).

En outre, différentes études des projections climatiques futures classifient l'Algérie comme une région pour laquelle les impacts potentiels du changement climatique sur l'environnement où les différents secteurs d'activité peuvent être particulièrement prononcés (e.g., Hulme et al. 1999). Ce changement pourrait, en effet, accentuer la variabilité spatiotemporelle et la dégradation quantitative et qualitative des ressources en eau et de l'écosystème. Selon Giorgi, 2006, l'Algérie est définie comme une région dont le climat est particulièrement sensible au changement global tant qu'elle connaît déjà des taux élevés de sécheresse et de déficits hydriques.

Malgré les expériences vécues et les projections des années à venir qui indiquent une réduction des cumuls pluviométriques algériens d'ici à la fin du siècle (IPCC, 2007 à), il reste encore des efforts à fournir pour améliorer la connaissance de la gravité du changement du climat à l'échelle régionale voire même locale. Les études en ce sens et ayant ciblé les changements climatiques en Algérie ne sont pas très nombreuses, et sont généralement perçues à travers l'analyse des séries pluviométriques dans quelques

régions du nord, et celles relatives à la régionalisation des scénarios futurs le sont encore moins. En outre, le manque de longues séries de données relatives au climat (précipitations, températures) et aux écoulements (débits) limite les possibilités pour les chercheurs algériens d'évaluer les incidences du changement climatique sur un pays à caractère physiographique particulièrement complexe. Il reste, néanmoins, difficile d'agir correctement pour nous préparer aux impacts constatés et attendus à court et à moyen terme sans quantifier la gravité du changement à l'échelle de tout le territoire.

Dans ce contexte, la présente thèse a pour objectif de contribuer à l'affinement des connaissances relatives au changement du climat au niveau de l'Algérie. Dans le cadre de cette thèse, nous sommes particulièrement intéressés à deux leviers de travail dont le premier semble être très remarquable durant les dernières décennies : il s'agit de la variabilité du climat dans le passé récent et la redistribution actuelle et future des conditions climatiques en Algérie. Le deuxième concerne la quantification des apports liquides à l'échelle du bassin-versant qui pose problème dans les études de mobilisation et l'élaboration des plans prévisionnelle de gestion, et ce, en raison, soit du manque appréciable des jaugeages, ou de l'absence des stations hydrométriques.

D'une part, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de sécheresse depuis quelques décennies est principalement due à la variabilité inter-décennale et multi-décennale du climat. Tel est le cas de l'évolution d'ENSO vers des épisodes plus chauds. Dans le contexte actuel du réchauffement, les tendances climatiques régionales peuvent différer fortement de la moyenne mondiale, étant le reflet des changements des circulations et des interactions de l'atmosphère et de l'océan et d'autres composantes du système climatique. La circulation atmosphérique à grande échelle aux moyennes latitudes, et ses principaux modes de variabilité impactent le climat, dont plusieurs auteurs proposèrent ainsi que les indices climatiques régionaux qui rendent mieux compte de la circulation atmosphérique générale dans le bassin

méditerranéen et par ricochet en Algérie. Par ailleurs, dans le contexte actuel du réchauffement climatique, on a tendance à associer la sécheresse à une hausse de la température. Or, à notre connaissance, il n'existe encore aucune étude qui compare la variabilité temporelle de la température et des pluies mesurées aux mêmes stations en Algérie. Pourtant, cette comparaison permettra d'établir un lien entre les ruptures des séries thermométriques et celles des séries pluviométriques. Ce type d'analyse permettra non seulement de mettre en évidence la covariation entre la température et les pluies mais aussi de vérifier si les deux variables climatiques sont influencées par la même composante de la circulation atmosphérique. Aussi, l'augmentation des températures et la modification des précipitations auront un effet sur les zones climatiques et les écosystèmes, certains climats vont disparaître entièrement, et de nouveaux climats sont attendus dans certaines régions (Williams, 2007). Certaines espèces suivent le rythme de climat comme ils se déplacent pour trouver leur écosystème adéquat (Pearson, 2006) et d'autres voués à l'extinction (Sandel et al, 201, Loarie et al 2009). L'Algérie dont le climat varie des conditions relativement humides à celles très sèches (désertiques), a connu des modifications caractéristiques dans son climat notamment dans sa zone humide. Par conséquent, Il est intéressant d'étudier comment le climat et les zones climatiques en Algérie ont évolué dans le passé récent et de vérifier leurs déplacements dans le futur suite à la baisse des précipitations prévue suivant les différents scénarios des gaz à effet de serre.

D'autre part, la modélisation des ressources en eau, que ce soit en Algérie ou dans d'autres pays au climat aride, n'a reçu que peu d'attention en raison de la complexité et du manque appréciable de données. Par conséquent, la quantification du bilan hydrique, la gestion des ressources en eau, et la prévision des débits dans les bassins-versant constituent des défis scientifiques majeurs à relever par les hydrologues. A cet effet, l'utilisation ou bien le développement des nouveaux modèles hydrologiques simples est

plus que nécessaire. Actuellement, les modèles hydrologiques «pluie-débit» constituent une autre issue pour les ingénieurs qui s'occupent des études des écoulements dans le présent et dans le futur portant sur des bassins-versants en Algérie (Zeroual et al 2013 ; Djaloul 2014, Malek2014, Attalah, 2015). Cependant, aucune adaptation des modèles existants ou bien de développement d'un nouveau modèle destiné à la modélisation de la relation «pluie-débit» pour le cas des bassins-versants algériens n'a été trouvé dans la littérature. L'utilisation de ces modèles (par exemple : le Génie Rural à 2 paramètres Mensuels 'GR2M', Probability-Distributed Model 'RS-PDM©') qui n'ont pas été élaborés pour un climat semi-aride, risque fort de ne donner guère matière à satisfaction. Les erreurs du fait de l'utilisation de ces modèles peuvent entraîner, soit une mauvaise utilisation de la ressource, soit une dépense inutile. A cela s'ajoute que les scientifiques et les ingénieurs qui utilisent en Algérie les données hydrométriques à des fins de la modélisation, disposent souvent de peu de connaissances sur la manière de produire ces données. La question de l'incertitude des données du débit est rarement abordée. Les visites sur le terrain menées de concert avec les gestionnaires hydrométriques, et le dépouillement des fiches de jaugeage dans dix-huit(18) stations hydrométriques situées dans le bassin Côtier Algérois, ont révélé qu'un certain nombre de facteurs est négligé pour la plupart des stations analysées. Cette situation se résume principalement en trois facteurs: (a) Dans tous les cas, même si la forme de la section de l'échelle change à certaines hauteurs, les gestionnaires hydrométriques seulement en considérant un seul segment de la courbe tarage; (b) un manque appréciable en jaugeages à grande hauteur a été observé, ce qui peut conduire à des erreurs systématiques aussi élevées que 100% au cours de l'extrapolation de la courbe de tarage pour les grands débits (Lang et al. 2010);(c) L'étalonnage de la courbe de tarage est continuellement faite sans l'inclusion des mesures de grands débits, et parfois les gestionnaires hydrométriques eurent à forcer la forme puissance de la courbe de tarage pour passer à travers le seul

jaugeage élevé enregistré. Néanmoins, la procédure utilisée en Algérie pour recueillir des données du débit soulignent la nécessité d'intégrer l'évaluation de l'incertitude comme une partie essentielle avant que les données ne soient utilisées dans la modélisation hydrologique et l'élaboration des plans de gestion des ressources en eau.

Ainsi, les deux thèmes se retrouvent dans l'objectif général de ma thèse, qui consiste à améliorer les connaissances relatives au changement du climat algérien et les outils de prédiction, afin d'agir respectivement sur les causes et les conséquences. Pour répondre à cet objectif, mon travail de thèse est articulé en cinq chapitres.

La circulation de l'atmosphère et de l'océan détermine les climats régionaux et assure le transport de l'énergie des tropiques vers les pôles, et plus généralement, des régions excédentaires vers les régions déficitaires. Les grandes caractéristiques du climat dans les tropiques sont associées à la circulation de Hadley-Walker qui module les saisons des pluies équatoriales et les déserts subtropicaux, et dans les moyennes latitudes, aux contrastes thermiques qui induisent des régimes de temps dominés par d'incessantes perturbations. L'ensemble des moyens qui assurent le fonctionnement de cette machine climatique seront présentés dans **le premier chapitre**, en insistant sur la météorologie des moyennes latitudes et tropicales qui suscitent notre intérêt dans le cadre de notre travail. Il s'agit, d'abord, d'établir un résumé des processus conduisant retraçant la dynamique du climat, de son origine à la dynamique moyenne des circulations atmosphériques méridiennes et zonales auxquelles s'ajoute la circulation plus lente de l'océan. Puis, on introduira la notion et le mode de variabilité du climat à l'échelle globale et au sein de la Méditerranée.

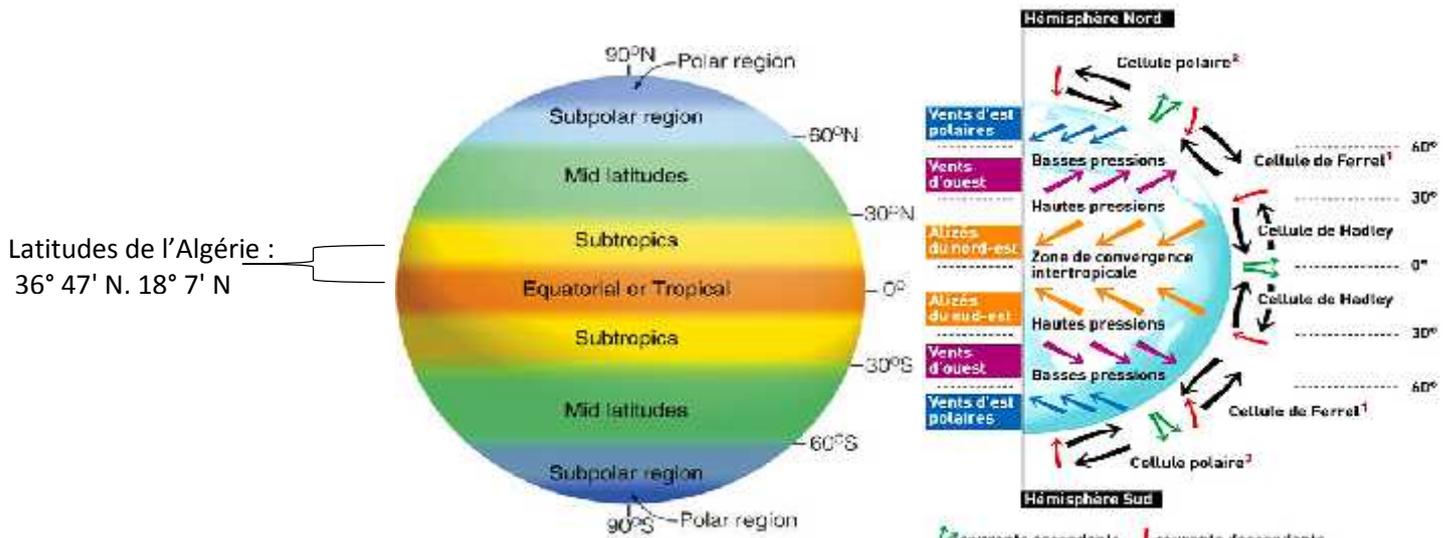


Figure 1 Régions terrestres et coupe schématique de la circulation atmosphérique générale

Le deuxième chapitre, intitulé Climat actuel de l'Algérie, dresse tout d'abord un état des connaissances sur l'élément le plus important de la vie qui conditionne le comportement et les décisions des individus et des groupes sociaux comme celui de l'ensemble des espèces vivantes et des écosystèmes. Nous regardons dans ce chapitre le climat actuel de l'Algérie à travers un certain nombre de variables climatiques telles que les précipitations, les températures (Figure 2), l'évaporation, et vent.

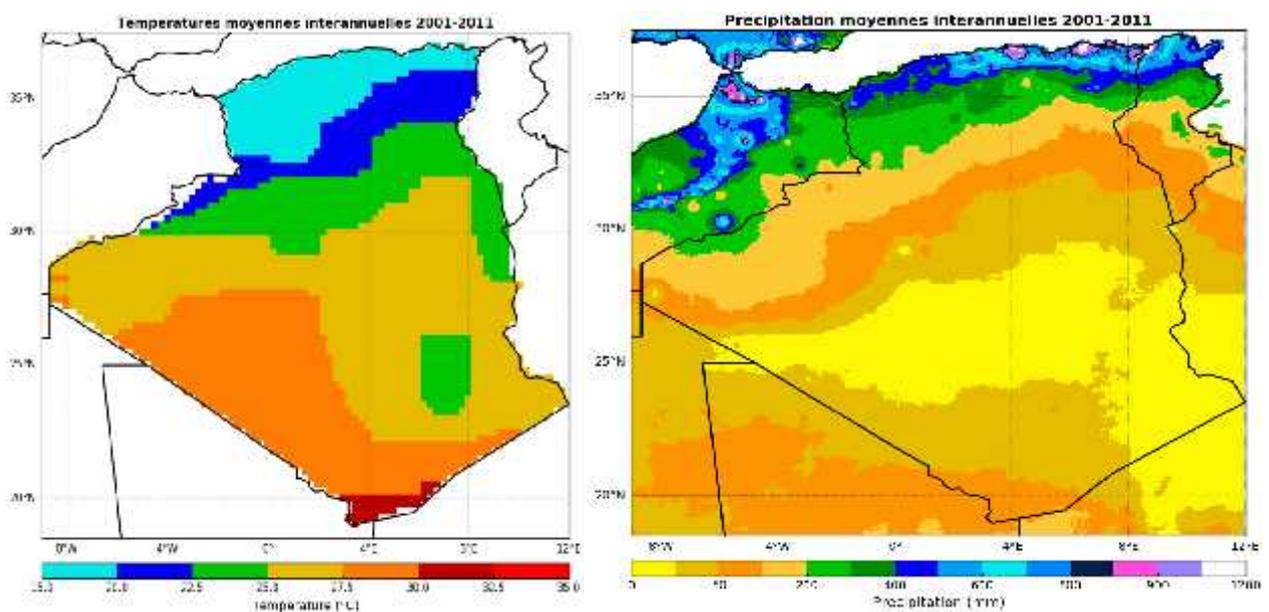


Figure 2 Températures et précipitations moyennes interannuelles en Algérie (2001-2011)

Ce chapitre est basé sur des données satellitaires. L'ensemble des paramètres étudiés et les résultats trouvés sont synthétisés en format de carte à deux dimensions sous le Système d'informations géographiques (SIG).

Étant donné que toute question sur le climat futur entraîne celle sur les évolutions passées et inversement, nous examinons **dans le troisième chapitre** les tendances prises par les précipitations et les températures que l'Algérie a connue, et ce, sur un certain nombre de stations. Le choix des stations de mesures (**figure 3**) est effectué en tenant compte de l'état d'homogénéité et de la qualité des séries d'observations disponibles sur des périodes récentes et communes.

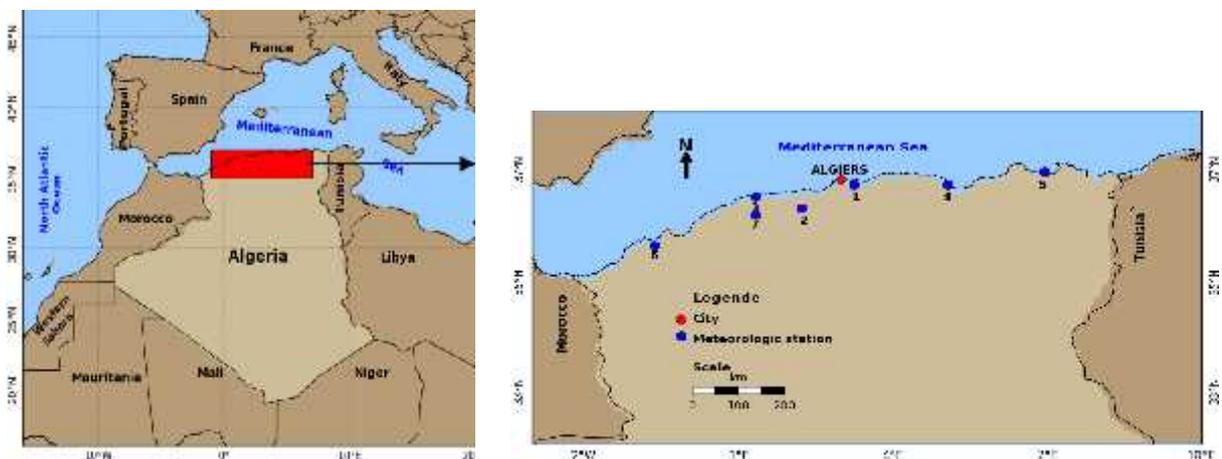


Figure 3 Localisation des stations météorologiques utilisées dans l'étude

Les méthodes de Mann-Kendall (analyse de la tendance à long terme) et de Lombard (analyse des ruptures des moyennes), ont révélé que les séries des températures sont globalement caractérisées par une tendance à long terme croissante avec des ruptures de moyennes progressives. Ceci traduit une hausse mais lente de la température depuis la décennie 1970. Quant aux pluies, aucune tendance à long terme significative ne fut observée (**figure 4**).

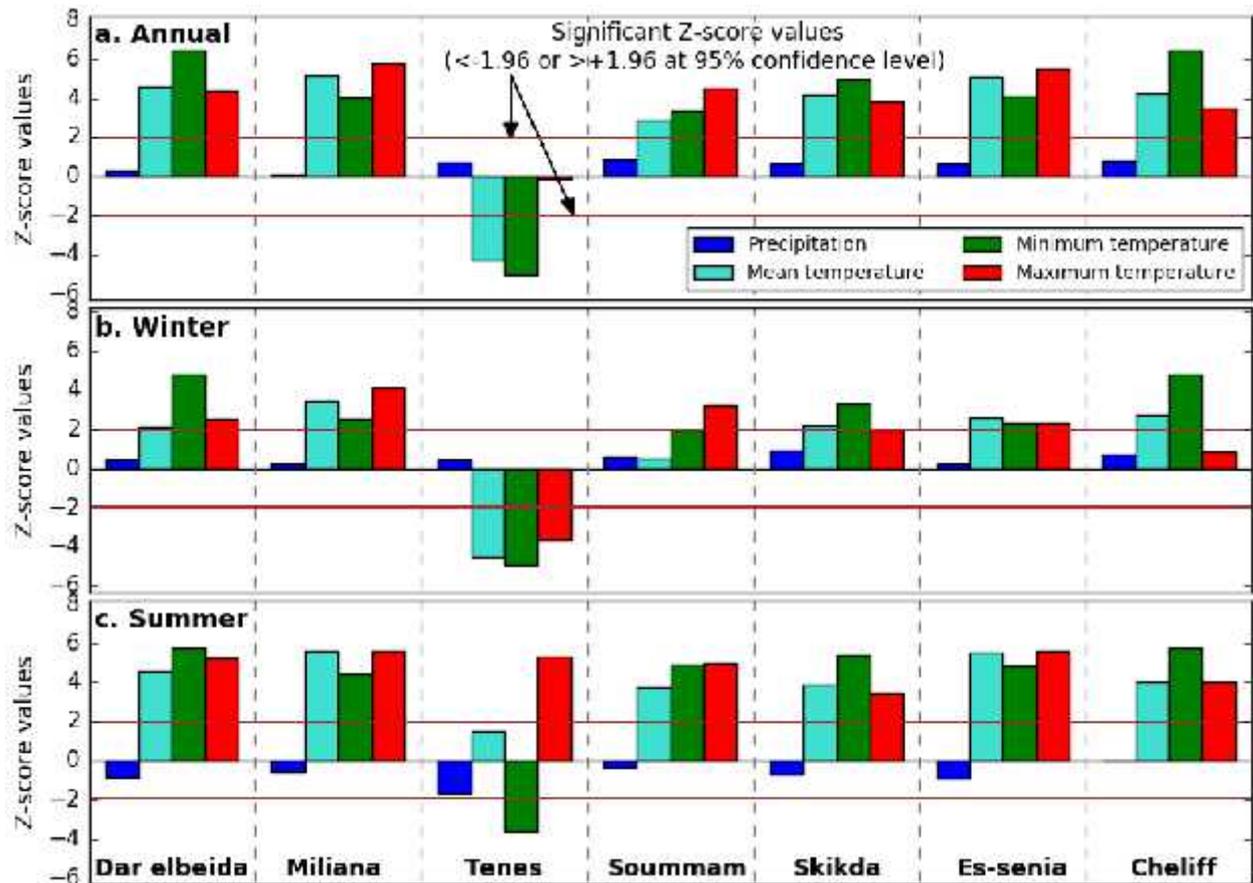


Figure 4 Valeurs de Z (scores) calculées par la méthode de Mann-Kendall appliquées aux séries des températures et des pluies pendant la période (1970-2013). Les deux lignes rouges représentent les valeurs critiques théoriques n du test de Mann-Kendall au seuil de probabilité de 5%.

L'analyse canonique des corrélations a révélé que les températures sont mieux corrélées avec l'indice climatique Western Mediterranean Oscillation (WeMOI) qui caractérise la circulation atmosphérique sur le bassin méditerranéen alors que les précipitations le sont avec large-scale atmospheric index (l'indice atmosphérique à grande échelle) tels que l'Indice d'oscillation australe (Southern Oscillation Index 'SOI'). Le chapitre est un résumé long en français de l'article rédigé par Zeroual et al. (2016), et publié dans la revue 'Hydrology Research'.

Dans le chapitre 4, l'évaluation des changements futurs (2006-2100) des précipitations et températures intervenant en Algérie est effectuée à partir des modèles climatiques régionaux CORDEX-Afrique en se basant sur deux scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre (RCP4.5 et RCP8.5), dont la résolution est de l'ordre de 45 km. Deux ensembles de données des températures et des précipitations

mensuelles provenant des données observées (CRU Version TS.3.22 et celles de l'Université du Delaware) sur une grille de résolution spatiale de 0,5°×0,5°, pour la période allant de 1951 à 2005, ont été utilisées afin d'évaluer la performance des modèles climatiques régionaux CORDEX-Afrique et de reproduire le climat actuel observé en Algérie. Aux horizons 2050-2100, une baisse généralisée des cumuls des précipitations dans tout le nord du pays concernerait la saison d'hiver (DJF) et un réchauffement se manifesterait à la fois aux échelles saisonnière et annuelle sur tout le territoire algérien. Cette modification du climat serait accompagnée de déplacement des zones climatiques en Algérie tel que défini par Köppen-Geiger (**figure 5**).

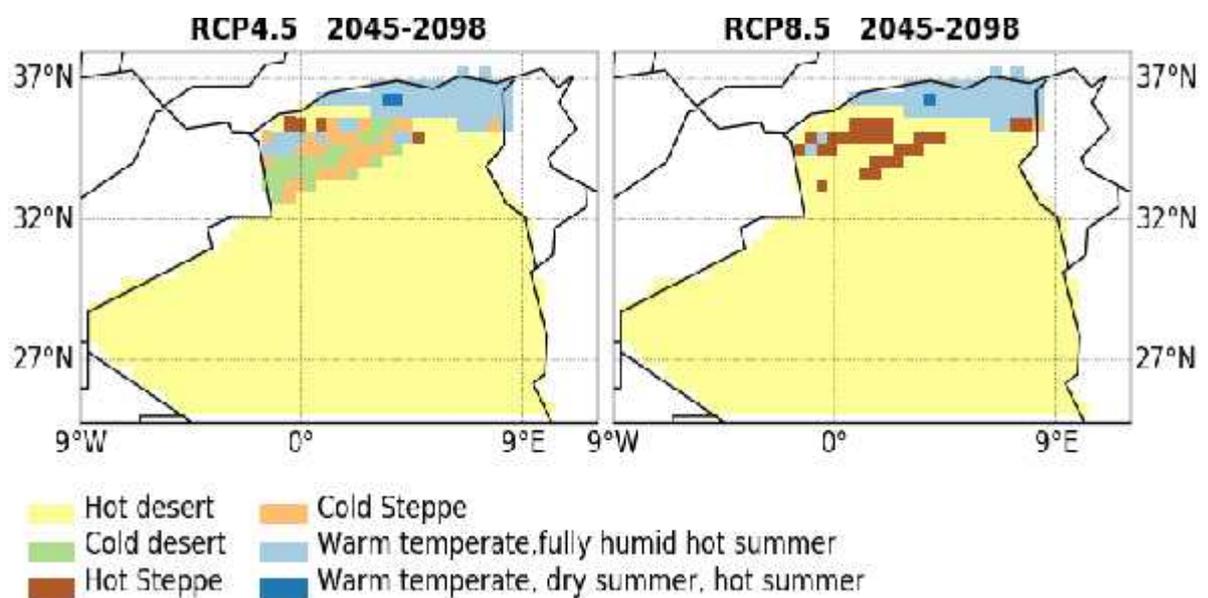


Figure 5 Estimation des zones climatiques moyennes de Köppen-Geiger en Algérie en utilisant les modèles cordex-africa sur 2045-2098 des deux scénarios (RCP 45, RCP 85).

En Algérie, les problèmes des ressources en eau ne sont pas analysés de manière adéquate à ce jour, à la fois dans le contexte du changement climatique et dans la formulation de la politique climatique. De nombreuses recherches se sont attachées à répondre à cette question, depuis plus d'un siècle, et une attention toute particulière est accordée aux processus de génération des débits et au fonctionnement du bassin-versant ; entité hydrologique de production et de concentration des écoulements.

Aujourd'hui, dans la littérature hydrologique, de nombreux modèles sont proposés pour la prévision des débits par le biais de deux approches, à savoir une approche dite physique, qui utilise le cadre théorique des équations de la physique et qui permet de donner une représentation des flux et stocks au sein du bassin, et une approche dite empirique. Cette dernière suspecte que l'emploi des connaissances physiques actuelles est loin de pouvoir apporter la solution et préfère découvrir directement, au vu de la pluie et des débits, le mécanisme des bassins-versants. Comme on vient de le voir, il existe un grand nombre de modèles hydrologiques «pluie-débit» comme le (déterministe, physique, stochastique statistique probabiliste, conceptuel, empirique, distribué, continu, événementiel, etc.) dans différentes échelles de temps (horaire, journalier, mensuel, annuel, pluriannuel), et parmi lesquels on trouve les modèles conceptuels ou empiriques qui restent l'outil le plus utilisé pour comprendre et prédire les réponses des bassins-versants (Beven, 2006). Ces modèles donnent actuellement des résultats satisfaisants, en comparaison à des approches plus complexes, comme les modèles physiques qui découlent de l'application des lois physiques à des milieux dont les caractéristiques sont mesurées (Perrin, 2000).

Les paramètres et les états initiaux du système sont les inconnues les plus importantes, et ont été déterminées lors de la phase de calage sur la base de données d'observations du débit. Il s'agit de choisir les paramètres de manière à minimiser les carrés des erreurs entre les débits simulés et observés sous hypothèse de la seule source d'erreurs qui suit une loi gaussienne. En réalité, la précision des simulations des modèles dépend de différentes sources d'erreurs (Di Baldassarre & Montanari 2009), incluant l'incertitude dans des données en entrée (les précipitations et la température par exemple), les données de calage/validation (par exemple, le débit), la structure du modèle et leurs paramètres (e.g. McMillan et al., 2010).

Au cours des deux dernières décennies, les hydrologues ont particulièrement examiné les erreurs produites par les paramètres du modèle, en raison de l'influence partielle que ces mêmes erreurs peuvent avoir sur la qualité de prédiction du modèle (Moyeed & Clarke 2005). Afin de surmonter la dépendance de la sortie du modèle avec leurs paramètres, de nombreux auteurs ont suggéré l'utilisation des réseaux de neurones artificiels comme un procédé alternatif pour la modélisation «Pluie-débit» (e.g. Hsu et al., 1995).

Dans le **4^{ème} chapitre**, nous exposons la méthode de RNA ainsi que la méthode de l'inférence bayésienne utilisées pour évaluer la performance du modèle résultant à l'incertitude des données de débit dérivées de la courbe de tarage 'méthode BaRatin'. Une revue de littérature sur la méthode RNA dans le contexte de la modélisation «pluie-débit» sera présentée dans **le chapitre 5**. Ce chapitre résume les mécanismes de transformation des précipitations en débit dans un bassin-versant en tant qu'entité hydrologique et les approches les plus courantes de la modélisation de cette transformation. Divers aspects de données et de conception qui se posent sont discutés en détail. En outre, les performances des modèles RNA «pluie-débit» avec trois algorithmes différents sont présentées. Ledit chapitre se termine par l'évaluation du meilleur modèle «Pluie-débit» qui a été trouvé sous l'angle de l'incertitude de la courbe de tarage. Les chapitres 4 et 5 sont un résumé détaillé en français de l'article rédigé par Zeroual et al. (2016), et publié dans la revue '**Water Resources Management**'. Dans cet article, un modèle «pluie-débit» à l'échelle mensuelle au moyen d'une approche de réseau de neurones artificiels propre au climat du nord algérien a été développé. Il a été, par la suite, procédé à l'examen de l'évaluation de l'impact de l'incertitude de la courbe de tarage sur la performance de prédiction du meilleur modèle (**figure 6**).

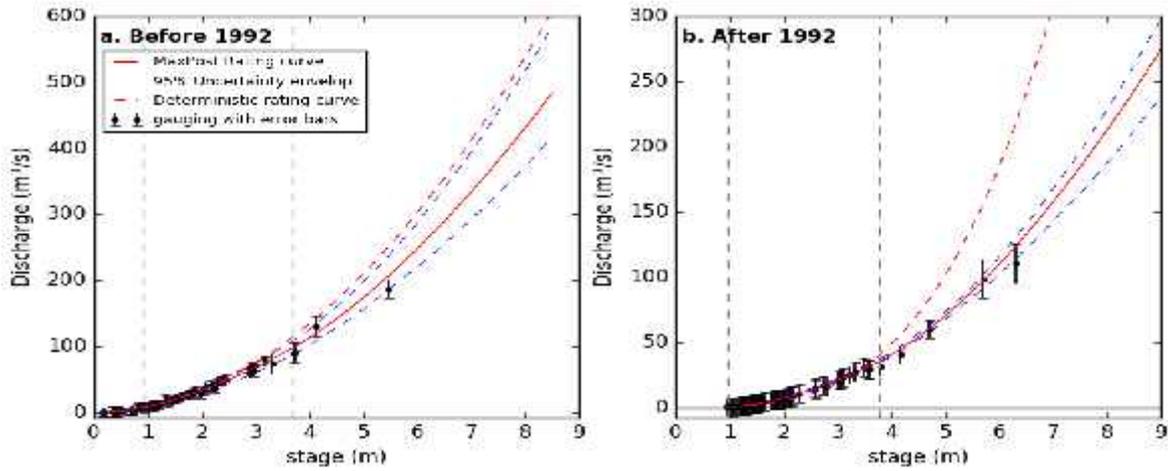


Figure 6 Analyse de l'incertitude de la courbe de tarage de Mazafran par la methode de BaRatin

L'incertitude de la courbe de tarage ; la courbe la plus probable, et l'incertitude associée ; au niveau de confiance 95%, ont été déterminées en employant la méthode de l'inférence bayésienne et des simulations Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC). Les résultats montrent que l'incertitude dans la courbe de tarage ont a un impact significatif sur la performance du modèle dans lequel l'erreur de prédiction a été améliorée non seulement dans la phase de l'apprentissage, mais aussi dans la phase de la validation du modèle (**figure 7**).

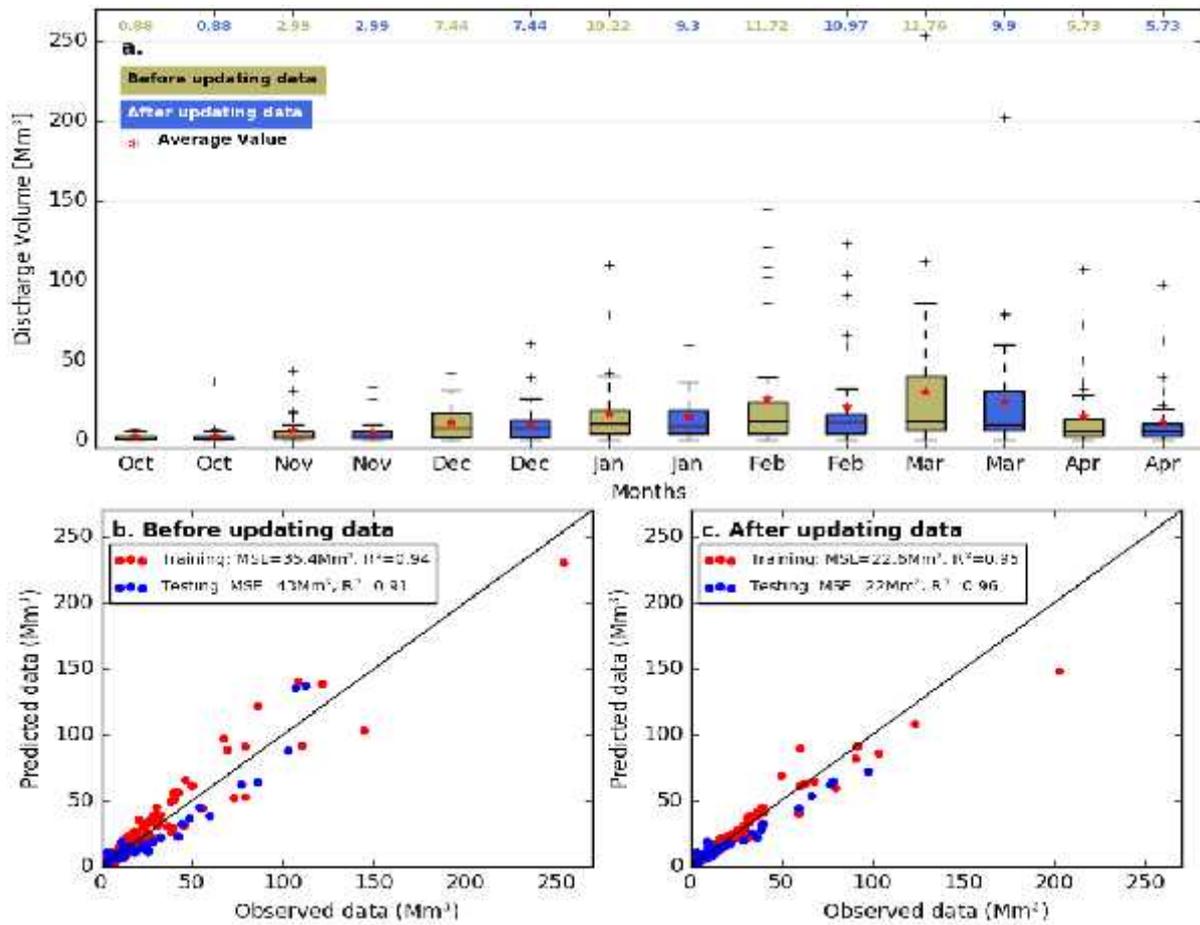


Figure 7 Boite à moustache des apports mensuelle avant et après la mise à jour des données par la courbe de tarage au niveau de l'oued de Mazafran (a) et comparaison des données des apports mensuelle observées et prévues par ANN_3 avant (b) et après (c) la mise à jour.