

UNIVERSITE SAAD DAHLAB - BLIDA 1
Faculté de Sciences et Technologies
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE L'EAU ET
ENVIRONNEMENT



MEMOIRE DE MASTER

FILIÈRE : HYDRAULIQUE

Option : Ressources Hydriques

THEME :

**Impact du changement climatique sur la
quantité des eaux du BV de Keddara et ses
conséquences sur le sol**

Réalise Par:

M. DIOP Mamadou Amadou

M. QUIMBELENGUE Osvaldo Francisco

Blida, Septembre 2020

Devant le jury composé de :

M. BESSENASSE Mohamed
M. GUENDOZ Abdelhamid
Mme BOUZOUIDJA Souad

PRESIDENT
EXAMINATEUR
ENCADREUR

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a aidé, nous a donné la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce projet. On remercie de tout notre cœur nos parents qui nous soutiennent dans tous nos projets et qui le feront toujours.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans le soutien indéfectible, la disponibilité constante et l'écoute attentive de notre chère promotrice Mme BOUZOUIDJA malgré une situation exceptionnelle dans nos vies, nous vous remercions pour la qualité exceptionnelle de votre encadrement, pour votre patience, rigueur, les conseils éclairés et les encouragements durant la préparation de ce projet.

On tient à remercier également l'ANBT pour la mise à notre disposition de données nécessaires pour mener à bien notre mission.

Ainsi que M. BESSENASSE et M. GUENDOZ de nous faire part de leur présence pour respectivement à la présidence du jury et l'examen de ce contenu, nous en sommes honorés.

Nous avons le plaisir et la fierté de remercier vivement les **Gouvernement Malien et Angolais**, qui soutiennent nos études, à travers les **Ambassades du Mali et d'Angola en Algérie**, qui nous donnent leurs appuis, nous encouragent et sont toujours là pour nous, sans oublier le **Gouvernement Algérien** qui nous a bien accueilli.

On a aussi une profonde gratitude envers tous nos professeurs qui nous ont inculqué leur savoir et l'amour pour notre spécialité si passionnante, tous nos collègues qui nous ont accueilli et aidé quand besoin il y avait, plus particulièrement notre ami et frère KONE Ibrahima pour son soutien sans failles.

On remercie aussi tous nos amis (es), aux nos familles et enfin tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à parachever ce projet.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à ma mère, mon socle dont je tire ma force
pour avancer vers mes objectifs, mon père ma source
d'inspiration,*

*Ma très chère sœur Haby, une femme d'exception à laquelle je
dois tellement ici-bas. À ma chère et tendre Haminatou. À tous
mes frères et sœurs, à ma famille, mes amis (es), mon pays le Mali,
à l'Afrique.*



M. DIOP Mamadou Amadou

Dédicaces

Je dédie ce mémoire premièrement à mon Dieu qui est ma source de vie.

Je dédie spécialement ce travail à ma mère qui est ma source d'inspiration, à mon père, à ma chérie Alzira qui me soutient dans tous les moments, à mes frères et sœurs et à toute ma famille.

Je dédie aussi ce travail à mon pays l'Angola, et à tous mes amis (es).



M. QUIMBELENGUE Osvaldo Francisco

ملخص

يأتي مشروع نهاية الدراسة هذا في سياق دراسة تغير المناخ في مستجمعات المياه ، وبشكل أوضح

مشروع كدرة الواقع في منطقة الجزائر العاصمة داخل ولاية بومرداس.

تتمثل الأهداف التي يتعين تحقيقها في هذه المهمة في تسليط الضوء على التأثير الناجم عن هذا التغير

المناخي على المستوى الكمي لتوافر المياه في وحدتنا الهيدرولوجية وتدهور التربة على الأخيرة.

للاوصول إلى هذه الأهداف ، سنبداً نهجنا بتوليف بيبليوغرافي يضع العمل في سياقه ، وستتطرق المرحلتان الثانية

والثالثة إلى الوسائل المستخدمة لدراسة التأثير الكمي في هذه الحالة النمذجة الهيدرولوجية وتنفيذها والتحقق من

صحتها. الخطوة الرابعة نحو هدفنا ستحدد التأثير على الأرض. بعد أن تتحقق هذه الأهداف بشكل واضح ، سنسعى

لتوفير وسائل لتخفيف هذه الظاهرة التي تشكل تحدياً كبيراً في عصرنا.

الكلمات المفتاحية: التأثيرات ، تغير المناخ ، مستجمعات المياه ، الكمية ، التربة.

Résumé

Le présent projet de fin d'étude s'inscrit dans la veine de l'étude du changement climatique sur un bassin versant, plus explicitement celui de Keddara, situé dans la région algéroise au sein la wilaya de Boumerdès.

Les buts à atteindre dans cette tâche est la mise en évidence de l'impact dû à ce changement climatique au niveau quantitatif de la disponibilité en eau sur notre unité hydrologique et la dégradation des sols sur cette dernière.

Pour toucher à ces cibles nous entamerons notre démarche par une synthèse bibliographique mettant en contexte le travail, les deuxième et troisième étapes toucheront au moyen employé pour étudier l'impact quantitatif en l'occurrence la modélisation hydrologique, sa mise en place et sa validation. La quatrième marche vers notre objectif mettra le doigt sur l'impact au niveau des sols. Après ces objectifs atteints de manière limpides nous nous emploierons à donner des moyens d'atténuation de ce phénomène qui constitue un grand défi de notre époque.

Mots clés : Impacts, changement climatique, bassin versant, quantitatif, sols.

Abstract

This end-of-study project focused on the study of climate change in a watershed, more explicitly that of Keddara, located in the Algiers region within the wilaya of Boumerdès which is a coastal wilaya.

One of the goals to be achieved in this task is to highlight the impact due to this climate change on the quantitative level of water availability on our hydrological unit and soil degradation on the latter.

To reach these targets we will begin our approach with a bibliographic synthesis putting the work in context, the second and third stages will touch on the means used to study the quantitative impact in this case hydrological modeling. The fourth step towards our goal will put the finger on the impact on the soils level. We will rely on remote sensing is the scientific discipline that brings together all the knowledge and techniques used for observation, analysis, interpretation and, management of the environment from measurements and images, it also brings new, different and spatially localized information to help us validate this step.

Keywords: Impacts, climate change, watershed, quantitative, soils.

ABSTRACT

This end-of-study project focused on the study of climate change in a watershed, more explicitly that of Keddara, located in the Algiers region within the wilaya of Boumerdès which is a coastal wilaya. From the center of the country with 100 km of coastline, it is located in the North-Center region, an integral part of the eastern part of the metropolitan area of Algiers, its overall area is 1,456.16 km², characterized by a Mediterranean climate (cold and wet winters and hot and dry summers).

One of the goals to be achieved in this task is to highlight the impact due to this climate change on the quantitative level of water availability on our hydrological unit and soil degradation on the latter.

To reach these targets we will begin our approach with a bibliographic synthesis putting the work in context, the second and third stages will touch on the means used to study the quantitative impact in this case hydrological modeling through the GR4J model which is a model, developed by IRSTEA, of the “rain-flow” type: it seeks to transform an input signal (precipitation) into an output signal (flow), based on empirical equations. It belongs to the family of global models, which means that it reproduces the flow at the outlet of the watershed non-spatially distributed data. Only two daily climatic parameters, averaged over the catchment area, are necessary to simulate the flow: precipitation and potential evapotranspiration (ETP). It has a production function, which makes it possible to transform "raw" precipitation into effective precipitation (fraction supplying the watershed), a transfer function, which calculates the delays of routing water in the system, and two reservoirs. interconnected, its implementation and validation will be discussed in these sections.

The fourth step towards our goal will put the finger on the impact on the soils level and we will rely on remote sensing is the scientific discipline that brings together all the knowledge and techniques used for observation, analysis, interpretation and, management of the environment from measurements and images, it also brings new, different and spatially localized information to help us validate this step.

Among the remote sensing satellites in service, “ours”, the Landsat8 from NASA covers the Earth every 16 days with images measuring 185 km x 185 km, in 16 bits, with 11 spectral bands.

The use of geographic information systems makes it possible - through the combination of the different spectral bands - to analyze and map different indices, among others:

The vegetation index (NDVI: normalized difference vegetation index).

The index of water bodies (NDWI: normalized difference build-up index). The index of built surfaces (NDBI: normalized difference build-up index).

The bare soil index (BSI).

To be able to highlight the impact of climate change on our study region, we will proceed, using ArcGIS Version 10.4 software, to the interpretation of the various LandSat-8 OLI (Operational Land representation) images taken on 18 / 04/2013 and 07/08/2020.

This temporal gap will make it possible, on the one hand, to better appreciate the degree of the changes that have occurred and, on the other hand, to be able to geo-locate the areas that have suffered degradation by the elaborate processes of digital cartography. These images were projected in UTM zone 31.

After these objectives achieved in a very specific way, we had as a result at the level of the GR4J model over the 20 years of our reference period quite significant fluctuations in the flows at the outlet of the watershed about the rainfall, thus highlighting the impact that the climate can have on the quantitative aspect of the availability of water resources in a watershed.

And remote sensing by 2 different indices: NDVI and BSI, If we compare the differences of the two values (which should theoretically correspond to bare areas, NDVI and BRI) namely: NDVI: 286 ha and BSI: 257.8 ha, we notice that the small difference lies (apart from errors due to various natural phenomena such as the diffusion and absorption of radiation by the atmosphere) in the margin of the index values taken into account for one or the other of the parameters This further attests to our work with two indices proving roughly the same consequence of soil degradation over the years, a phenomenon that can easily be attributed to climate change in our watershed, hence the achievement of another objective of our work.

Keywords: Impacts, climate change, watershed, quantitative, soils.

Table des matières

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	
Abstract	
Résumé en Arabe	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Liste des Abréviations	
Introduction Générale.....	16
Chapitre 1 : Contexte du Mémoire.....	18
Introduction.....	19
1. Le Cycle Hydrologique.....	19
1.1. Le bilan hydrologique : de l'échelle globale à l'échelle du bassin versant.....	19
1.2. Disponibilité de la ressource.....	21
2. Le changement climatique.....	24
2.1. Évolution des températures au nord l'Algérie.....	25
2.2. Évolution des précipitations au nord de l'Algérie.....	26
2.3. Évolution des débits en Algérie	26
3. D'autres facteurs occultés par le changement climatique.....	26
3.1. Oscillations décennales et multi-décennales.....	26
3.2. Influences des activités humaines.....	27
3.2.1. Occupation du sol.....	27
3.2.2. Aménagement et gestion hydraulique.....	27
3.2.3. Les pratiques agricoles et les rejets.....	28
4. Le changement climatiques et les sols.....	28
5. Le bassin versant de Keddara.....	28
6. Objectifs du travail.....	33
Conclusion.....	33
CHAPITRE 2 : Implémentation de la chaîne de modélisation.....	34
Introduction.....	35
1. Choix préalables.....	35
1.1. Choix du modèle hydrologique.....	35
1.1.1. Classification des modèles hydrologiques.....	35
1.2. Conceptualisation du modele.....	36
1.3. Distribution spatiale des paramètres.....	36
1.4. Résolution temporelle.....	37
2. Choix du modèle hydrologique et son fonctionnement.....	37

3. Le modèle GR4J.....	37
3.1. Données climatiques en calibration/validation	39
4. Méthodes de calibration et de validation du modèle hydrologique.....	39
4.1. Calibration de GR4J	40
4.1.1. Principe de calibration/validation	40
4.1.2. Critères de performance utilisés	40
Conclusion.....	41
Chapitre 3 : Validation du modèle GR4J sur la période de référence.....	42
Introduction.....	43
1. Simulation des débits sur le bassin versant de Keddara par le GR4J.....	43
1.1. Performance de GR4J en calibration.....	43
1 ^{ère} Période de calibration 2000-2008.....	43
2 ^{ème} Période de calibration 2000-2009	44
3 ^{ème} Période de calibration 2000-2010	45
1.2. Performance de GR4J en validation.....	45
1 ^{ère} Période de validation 2009-2019	46
2 ^{ème} Période de validation 2010-2019	46
3 ^{ème} Période de validation 2011-2019	46
1.3 Débits simulés par le modèle GR4J.....	46
1.3.1 Performance graphique en calibration-validation.....	47
1 ^{ère} Période de calibration 2000-2008.....	47
1 ^{ère} Période de validation 2009-2019.....	47
2 ^{ème} Période de calibration 2000-2009.....	48
2 ^{ème} Période de validation 2010-2019.....	48
3 ^{ème} Période de calibration 2000-2010.....	49
3 ^{ème} Période de validation 2011- 2019	49
2. Résultats obtenus et discussions.....	50
Conclusion	52
Chapitre 4 : Étude de l'impact du changement climatique sur les sols à travers la télédétection.....	53
Introduction.....	54
1. Présentation des outils et logiciel utilisé	54
1.1. La Télédétection	54
1.2. Satellite Utilisé : LandSat8.....	55
1.3. Présentation d'ArcGIS.....	56

2. La Méthodologie Utilisée pour notre travail.....	56
3. Les calculs des différents indices	59
3.1. Indice NDVI : Végétation.....	59
3.2. Indice BSI : Sols nus.....	60
3.3. Indice NDWI : L'eau.....	62
4. Interprétation et discussion	64
Conclusion.....	64
Conclusion Générale et Recommandations	65
Références Bibliographiques.....	68
ANNEXES.....	73

Liste des Figures

Figure 1: Cycle de l'eau d'après (Dingman, 2008). Les flèches représentent les flux (en km ³ /an), les nombres entre parenthèses représentent les volumes (km ³).....	19
Figure 2: Évolution de la disponibilité en eau par habitant (Pitman, 2002, modifié d'après Ashley and Cashman, 2006).....	22
Figure 3 : Découpage de l'Algérie du nord en quatre régions (source Remini, 2010).....	23
Figure 4 : Confrontation ressources-besoins pour différents horizons (source Remini, 2010).....	23
Figure 5 : Évolution de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre sur les derniers 2000 ans (U.S. Global Change Research Program, 2014).....	24
Figure 6 : Évolution des températures globales par rapport à la moyenne 1890-1919, observées et simulées à partir de plusieurs ensembles climatiques (Meehl et al., 2004)	25
Figure 7 : carte de situation du barrage de KEDDARA.....	29
Figure 8 : image satellitaire du barrage KEDDARA.....	30
Figure 9 : Bassin Versant de Keddara.....	30
Figure 10 : vue du barrage KEDDARA (aval).....	32
Figure 11 : vue du barrage KEDDARA (amont).....	32
Figure 12 : Classification des modèles hydrologiques selon leur structure.....	37
Figure 13 : Schéma de fonctionnement de GR4J (Perrin, 2007).....	38
Figure 14 : Débits observés et simulés sur la 1 ^{ère} Période de calibration.....	47
Figure 15 : Débits observés et simulés sur la 1 ^{ère} Période de validation.....	47
Figure 16 : Débits observés et simulés sur la 2 ^{ème} Période de calibration.....	48
Figure 17 : Débits observés et simulés sur la 2 ^{ème} Période de validation.....	48
Figure 18 : Débits observés et simulés sur la 3 ^{ème} Période de calibration.....	49
Figure 19 : Débits observés et simulés sur la 3 ^{ème} Période de validation.....	49
Figure 20 : courbes de l'évolution des débits moyens annuels à l'exutoire et des pluies moyennes annuelles.....	51
Figure 21 : Evolution annuelle des températures au fil des années sur notre période d'étude.....	52
Figure 22 : Explication du processus de télédétection.....	54
Figure 23 : Image du LandSat8.....	55
Figure 24 : Situation géographique du Bassin versant de Keddara par rapport au LandSat8.....	58
Figure 25 : Utilisation de ArcGis pour la mise en place de nos cartes.....	58
Figure 26 : Indice normalisé de la végétation (NDVI 2013) au niveau du bassin versant de Keddara.....	59
Figure 27 : Indice normalisé de la végétation (NDVI 2020) au niveau du bassin versant de Keddara.....	60
Figure 28 : Indice des sols nus (BSI 2013) du bassin versant de Keddara.....	61

Figure 29 : Indice des sols nus (BSI 2020) du bassin versant de Keddara.....	62
Figure 30 : Indice de l'eau normalisé (NDWI 2013).....	63
Figure 31 : Indice de l'eau normalisé (NDWI 2020).....	63

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres de GR4J, signification et valeurs par défaut (Perrin et al., 2003).....	38
Tableau 2 : Intervalles de confiance du modèle GR4J.....	43
Tableau 3 : Valeurs paramètres du modèle après optimisation.....	44
Tableau 4 : valeurs références du critère de Nash.....	44
Tableau 5 : Valeurs des taux de remplissage après optimisation.....	44
Tableau 6 : valeurs des paramètres du modele.....	45
Tableau 7 : valeurs des taux de remplissage.....	45
Tableau 8 : valeurs des parametres du modele.....	45
Tableau 9 : valeurs des taux de remplissage.....	45
Tableau 10 : Récapitulatif des valeurs des paramètres du modèle et des coefficients de Nash.....	46
Tableau 11 : valeurs moyennes annuelles des débits a l'exutoire et des pluies.....	51
Tableau 12 : Bandes du LandSat8.....	57
Tableau 13 : Tableau des résultats des surfaces générés par l'indice NDVI (végétation)	59
Tableau 14 : Tableau des résultats des surfaces générés par l'indice BSI (Sols nus).....	61
Tableau 15 : Évolution de la pluviométrie pour la saison pluvieuse.....	74
Tableau 16 : Évolution de la pluviométrie pour la saison sèche.....	75

Liste des Abréviations

1. AEP : Alimentation en Eau Potable ;
2. ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transfère ;
3. BSI: Bare Soil Index;
4. BV : Bassin Versant ;
5. ETP : Évapotranspiration Potentiel ;
6. F.O : Fonction Objectif ;
7. GES : Gaz à Effet de Serre ;
8. GIEC : Groupe International d'Expert sur le Climat ;
9. GIRE : Gestion intégré des Ressources en Eau ;
10. IRSTEA : Institut National de Recherche em Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture.
11. LDCM: LandSat Data Comunity Mission;
12. MCG : Modèle Climatique Globaux ;
13. MOD : Matière Organique Dissoute ;
14. NAO : North Atlantic Oscillation ;
15. NDBI: Normalized Difference Build up Index;
16. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index;
17. NDWI: Normalized Difference Water Index;
18. NS : Nash ;
19. OLI: Operational Land Imagery;
20. ONM : Office National de Métrologie ;
21. ONU : Organisation des Nations Unies ;
22. PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement ;
23. RU : Réserve Utile ;
24. SIG: Système d'Information Geographique;
25. USGS: United States Geological Survey;
26. UTM: Universal Transversa de Mercator;

INTRODUCTION GENERALE

Le changement climatique étant une réalité observée, sa prise en compte dans la gestion de la ressource en eau est de plus en plus appliquée au sein des politiques publiques à l'échelle mondiale grâce à la réalisation d'études d'impact du changement climatique. Depuis plusieurs décennies, de nombreuses études ont ainsi traité ces aspects à travers des travaux de modélisation utilisant toujours plus de ressources informatiques [5]. Ces études comprennent habituellement des simulations climatiques à l'échelle du globe, qui alimentent des modèles d'impacts tels que des modèles hydrologiques [17].

Outre la ressource en eau, le changement climatique est un facteur non négligeable dans la variation des sols dont les couvertures se trouvent fragiliser face à ce phénomène.

Ainsi, les impacts du changement climatique sur les grands fleuves mondiaux ont déjà été étudiés à plusieurs reprises. Cependant, en raison des difficultés de la prise en compte de la variabilité locale du climat, peu d'outils de modélisation sont implémentés sur l'emprise des petits bassins versants. Ces outils seraient pourtant un atout majeur pour aider la prise de décision à l'échelle locale [17].

Dans ce cadre, notre travail touche le bassin versant de Keddara dans la région algéroise située au nord-centre de l'Algérie, nous nous inscrivons pleinement dans ce sens de recherche et possédons trois objectifs :

- La mise en place et la validation d'un outil de modélisation sur le bassin versant de Keddara ;
- L'application de cet outil de modélisation afin de simuler les débits à l'exutoire du bassin versant pour l'impact quantitatif [17] ;
- La visualisation à travers des techniques de télédétection de l'impact sur la couverture des sols du bassin versant.

Nous présenterons dans le premier chapitre l'état des connaissances traitant du changement climatique, de l'étude du cycle hydrologique et des différents impacts que le premier peut avoir sur les différentes composantes du cycle hydrologique.

Puis nous expliciterons dans le second le choix du modèle hydrologique, des méthodes qui ont été mobilisés lors des travaux de modélisation et également la mise en place d'une chaîne de modélisation hydroclimatique sur le bassin versant de l'étude.

Le troisième chapitre touchera qu'à lui à la calibration et la validation de cette chaîne de modélisation hydroclimatique, cette partie se termine par les résultats et discussion de notre étude.

Le traitement de notre terrain par la télédétection sera recueilli dans le quatrième chapitre et une conclusion générale sera accompagnée de recommandations d'atténuation du phénomène.

CHAPITRE 1 : Contexte du Mémoire

Introduction

Cette partie vise à présenter les principaux concepts qui seront employés dans la suite du travail et fait un état des lieux de la connaissance liée aux impacts du changement climatique sur la ressource en eau et également les sols.

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 [29]. 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 [51]. Ces deux sciences sont intimement liées dans ce qu'on appelle l'hydroclimatologie. 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 [17].

1.1 Le bilan hydrologique : de 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 [41]. 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. 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" [13]. Mais la répartition de cette ressource est inégale (figure 1) [17].

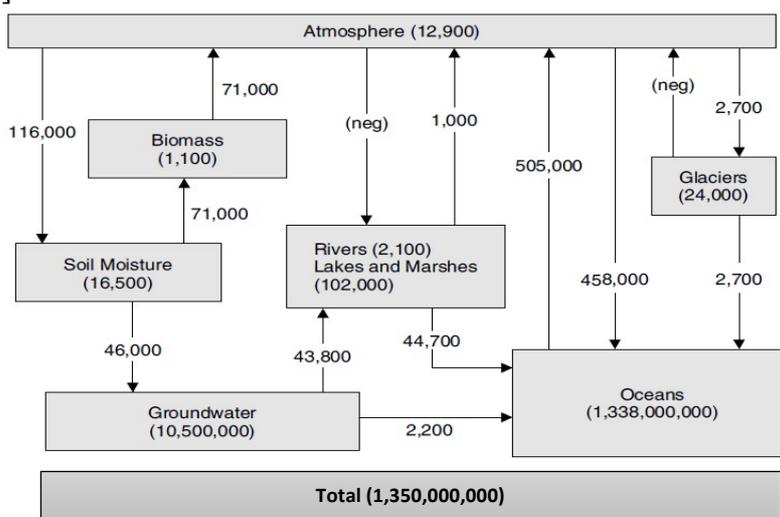


Figure 1 : Cycle de l'eau d'après (Dingman, 2008). Les flèches représentent les flux (en km^3/an), les nombres entre parenthèses représentent les volumes (km^3).

Le volume total représente près de 1.4 milliard de km³, mais la part qui compose le cycle hydrologique (précipitations, ou évapotranspiration) ne représente que 500 000 km³. Par définition, l'hydrologie est la science qui étudie l'eau. Mais pour des raisons évidentes, cette science ne s'est pas intéressée à tous les domaines où l'eau est présente [12]. Par exemple, elle ne couvre pas l'étude des océans (océanographie) ou l'étude de l'eau du corps humain (hydrologie médicale). Elle s'attache à décrire l'ensemble des nombreux processus affectant le cycle hydrologique. Par ses liens avec la climatologie, la météorologie, l'agronomie, la pédologie, la géologie, l'aménagement du territoire, et bien d'autres disciplines, l'hydrologie est une science pluridisciplinaire, dont les membres forment une famille qualifiée par Le Moine, (2008 d'après Klemes, 1986a) de "famille recomposée", tant les domaines d'origine des hydrologues sont variés.

L'échelle spatiale à laquelle s'étudie le cycle hydrologique a évolué avec les problématiques. D'abord étudié à l'échelle locale, puis à l'échelle intégrée des bassins, le cycle hydrologique est maintenant de plus en plus étudié à l'échelle globale, dans le cadre des études du changement climatique [51]. Néanmoins, l'échelle du bassin versant demeure incontournable pour l'hydrologue. Elle constitue une emprise spatiale cohérente pour aborder les questions relatives à la gestion de l'eau et à la prise de décision opérationnelle sur un territoire [25].

Par des mesures à son exutoire (débit, concentration en éléments), le bassin versant permet d'appréhender la relation "pluie-débit", mais il fournit aussi des informations sur les flux de polluants. Le concept de bassin versant peut se définir comme une unité hydrologique à l'intérieur de laquelle l'eau précipitée est drainée jusqu'à un point précis d'un cours d'eau, qu'on appelle son exutoire [17]. Idéalement, la ligne de crête bordant le cours d'eau définit sa zone d'alimentation, et donc l'emprise géographique du bassin versant. Le bilan hydrologique est alors réalisé entre la quantité d'eau précipitée sur son emprise, les écoulements mesurés à son exutoire, et la quantité d'eau évapotranspirée. Mais cette simplification n'est pas la réalité, des échanges de diverses origines sont possibles avec l'extérieur du bassin versant : soit d'origine naturelle (circulation souterraine, dans les zones karstiques par exemple), soit anthropique (prélèvements et/ou rejets en dehors de la surface d'alimentation du bassin versant).

En outre, plus la relation "pluie-débit" sera analysée à un pas de temps fin, plus les processus qui l'affecteront seront nombreux. Un bilan annuel est simple car il ne prend pas en compte le retard des écoulements et les variations de stock au cours de l'année hydrologique. Un bilan effectué à un pas de temps inférieur devra prendre en compte l'interception des précipitations par la végétation, la rétention de l'eau dans les sols, qui est fonction des conditions initiales d'humidité du sol, le retard des différents écoulements (faible pour le ruissellement de surface, modéré pour les écoulements de subsurface, et important pour les écoulements profonds), la présence de plans d'eau, dont le remplissage peut écrêter la réponse hydrologique du bassin versant.... A l'échelle infra-annuelle, le bilan hydrologique peut alors se révéler négatif (lorsque les pertes sont supérieures aux pluies efficaces, période d'épuisement des réserves) ou positif (période de reconstitution des réserves) [17].

La détermination des termes de ce bilan est entachée de nombreuses incertitudes [17]. La prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations est réduite aux mesures stationnelles au sein du bassin [17]. L'estimation des mesures de débit est soumise à la précision de la courbe de tarage des stations hydrométriques. De nombreux autres paramètres sont difficiles voire impossibles à mesurer [17]. L'évapotranspiration est la plupart du temps, déduite de bilans faisant intervenir les précipitations, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et le remplissage de la réserve utile des sols (RU). Cette ETP est un concept utilisé par de nombreuses communautés scientifiques : hydrologues, climatologues, agronomes, et peut se définir comme étant "*la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée dans des conditions climatiques données, par une surface d'eau libre ou un couvert végétal pour lequel l'eau n'est pas un facteur limitant*" [13]. Son utilisation même, à l'échelle des bassins versants, est reconnue comme source d'incertitude [43].

Calculer le bilan hydrologique d'un bassin est donc à la fois une façon d'appréhender les processus à l'œuvre, et donc de comprendre leurs interactions mais aussi un véritable challenge, étant donné les difficultés rencontrées dans l'estimation des différents paramètres du bilan hydrologique. Sa détermination devra toujours être considérée avec un œil critique sur la qualité des données utilisées dans le bilan. Cependant, depuis quelques décennies, aidés par les progrès réalisés en modélisation, les hydrologues ont pu réaliser des travaux avec toujours plus de données à leur disposition et donc améliorer la compréhension des processus à l'œuvre [17].

1.2 Disponibilité de la ressource

Bien que l'eau douce disponible ne représente qu'un faible pourcentage (0.0076%) de l'eau présente à la surface du globe [41] elle a toujours été un élément indispensable aux sociétés humaines. Les grandes civilisations ont prospéré lorsqu'elle était abondante, ont sécurisé son accès, ou se sont éteintes à cause de son absence [17].

Aujourd'hui, les activités humaines soumettent la ressource à une pression de plus en plus importante, jusqu'à poser de réels problèmes de disponibilité. Les usages de l'eau pour l'alimentation en eau potable (AEP), les besoins industriels ou agricoles, ont mené à une gestion non durable de la ressource. Pour preuve, la disponibilité en eau par habitant n'a cessé de décroître depuis les dernières décennies, avec une inégalité significative entre les pays du nord et ceux du sud (figure 2) [17].

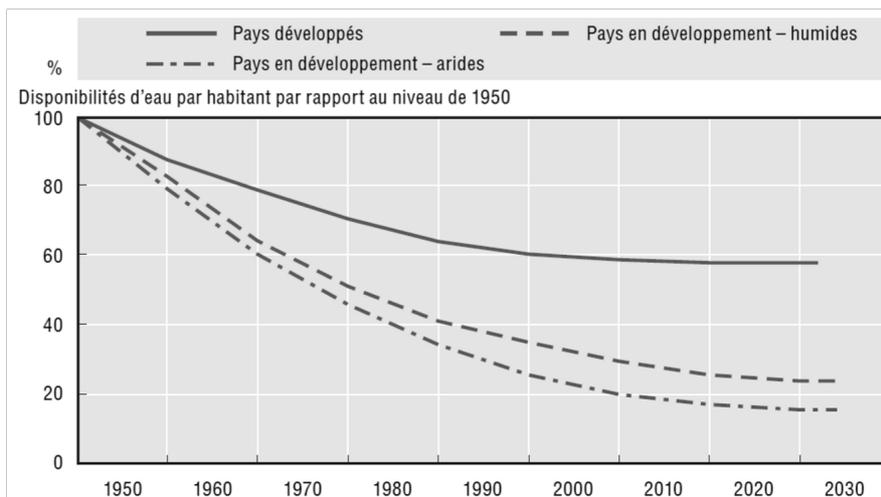


Figure 2 : Evolution de la disponibilité en eau par habitant (Pitman, 2002, modifié d'après Ashley and Cashman, 2006).

L'ONU, à travers le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), estime qu'environ 4 milliards de personnes seront en situation de stress hydrique d'ici 2050 (à savoir, une disponibilité en eau inférieure à 1700 m³ par an et par habitant). La prise de conscience de cette vulnérabilité a poussé les États à créer des normes ou à les mettre à jour pour réglementer les rejets et également assurer un débit minimum dans les cours d'eau.

En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse. La concurrence que se livrent l'agriculture, l'industrie et l'A.E. P pour avoir accès à des disponibilités limitées en eau gêne d'ores et déjà les efforts de développement de nombreux pays. La pluviométrie moyenne annuelle en Algérie du nord est évaluée entre 95 et 100 10⁹ m³. Plus de 80 10⁹ m³ s'évaporent, 3 10⁹ m³ s'infiltrent et 12.5 10⁹ s'écoulent dans les cours d'eau. Dans l'Algérie du nord, l'apport principal vient du ruissellement. Les eaux de surface sont stockées dans les barrages. En 2002, l'Algérie dispose de 52 grands barrages d'une capacité de 5,2 milliards de m³. Le reste (7.3 10⁹ m³) se déversent directement dans la mer. Le problème de l'eau est aggravé, ces dernières années par une sécheresse qui a touché l'ensemble du territoire de notre pays, et qui a montré combien il était nécessaire d'accorder la plus grande attention à l'eau. Le découpage de l'Algérie du Nord en quatre régions repose sur les critères suivants [9]:

- Les caractéristiques géographiques et naturelles des régions
- Le groupement des bassins versants et sous bassins hydrographiques, entre lesquels existent des nécessités de transfert (figure 3) [9].

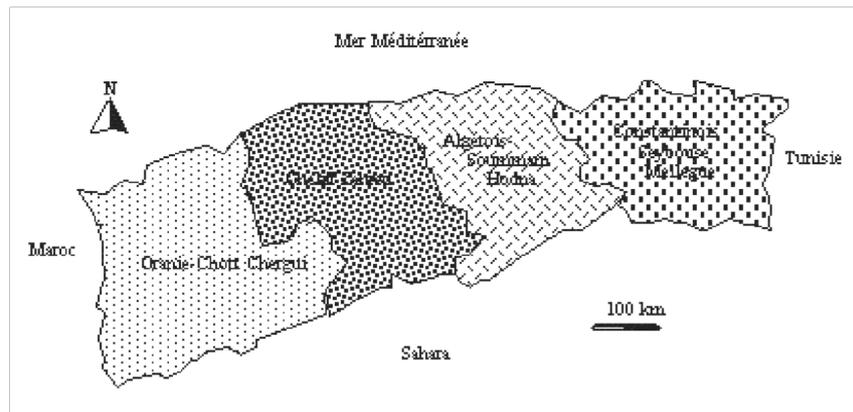


Figure 3 : Découpage de l'Algérie du nord en quatre régions (source Remini, 2010)

1. Oranie - Chott Chergui
2. Chellif - Zahrez
3. Algérois - Soummam - Hodna
4. Constantinois - Seybouse - Mellegue

Les confrontations sont établies en comparant les ressources en eau existantes avec les besoins en eau de façon à ce que les mesures à prendre pour satisfaire les demandes en eau puissent être évaluées. Les calculs de la confrontation présentent comme intérêt, l'évaluation de la situation de gestion des ressources en eau et de suivre le développement pour optimiser les choix de systèmes d'économie hydraulique et de déterminer la politique de l'eau [9].

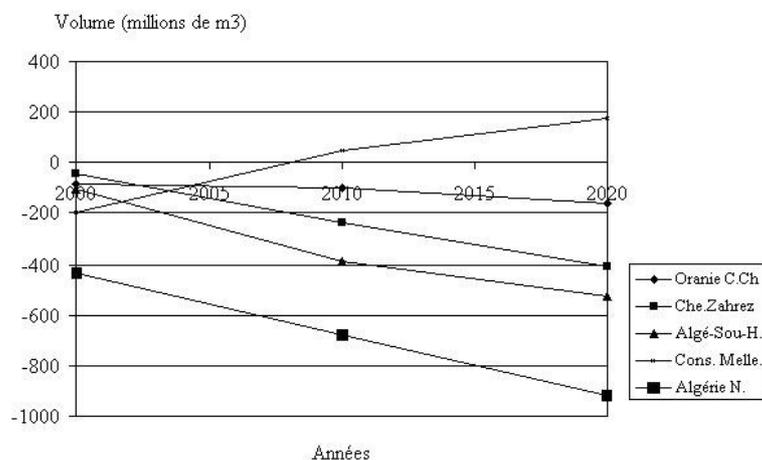


Figure 4 : Confrontation ressources-besoins pour différents horizons (source Remini, 2010)

Nous constatons qu'actuellement, les régions de l'Algérois-Soummam- Hodna est déficitaire, ce qui a engendré une diminution des eaux destinées à l'irrigation dans le but de privilégier l'alimentation en eau potable (A.E.P) dans ces régions. Ce déficit est beaucoup plus accentué au niveau de l'Algérois Soummam-Hodna en 2020. La confrontation entre ressources - besoins est un indicatif révélateur et très significatif qui nous oriente quant à l'avenir de la politique de l'eau que nous menons afin d'atténuer l'effet du déficit. Il est clair que l'Algérie du nord enregistre d'un côté, un manque énorme en ressources au moment même où les besoins augmentent et d'un autre côté, le volume

d'eau mobilisable est en diminution. Ceci est dû aux différents problèmes naturels ou humains qui touchent les sites susceptibles de capter les eaux [9].

2. Le changement climatique

Le changement climatique est devenu, ces dernières décennies, un véritable enjeu pour la communauté internationale. En raison de l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre, jusqu'à des taux qui n'avaient pas été atteints dans l'atmosphère depuis longtemps, le bilan radiatif de la planète est devenu légèrement positif, ce qui signifie que la Terre se réchauffe. Le dernier rapport du Groupe International d'Expert sur le Climat (GIEC) confirme que ces trois dernières décennies sont les plus chaudes jamais enregistrées par l'Homme [56]. Depuis la fin de l'ère préindustrielle jusqu'à nos jours, la température moyenne à la surface du globe a augmenté de 0.85 °C. Cette augmentation peut paraître peu impressionnante, mais elle cache des disparités régionales importantes, si certaines zones ont subi peu de réchauffement, d'autres ont déjà enregistré des augmentations de plus de 2°C [17].

C'est à partir des années 1820 que les scientifiques ont commencé à entrevoir l'importance de certains gaz dans la régulation de la température du globe [33]. Joseph Fourier fut le premier à suggérer que l'atmosphère de la planète agissait tel un isolateur thermique. Les gaz en question incluent le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux, ou encore la vapeur d'eau, et permettent à eux seuls de maintenir une température modérée à la surface de la planète. Les radiations solaires interceptées à la surface de la Terre sont en partie réfléchies, et en partie absorbées par les océans et les continents, puis réémises sous forme de rayonnement infrarouge. Sans l'effet de serre, ces rayonnements s'échapperaient vers l'espace. Grâce aux gaz à effet de serre (GES), ils vont être redirigés dans plusieurs directions, y compris vers la surface du globe, réchauffant ainsi l'atmosphère. Le problème, c'est que la concentration atmosphérique de ces gaz, constante sur les derniers millénaires, a explosé depuis notre révolution industrielle (U.S. Global Change Research Program, 2014). Ces gaz ont diverses origines, naturelles pour certaines, complètement anthropiques pour d'autres. Leur augmentation exponentielle depuis la révolution industrielle (figure 5) est principalement liée à l'utilisation d'énergie fossile. Le CO₂, et le CH₄ ont ainsi atteint des concentrations jamais enregistrées depuis 800 000 ans à la surface du globe [56].

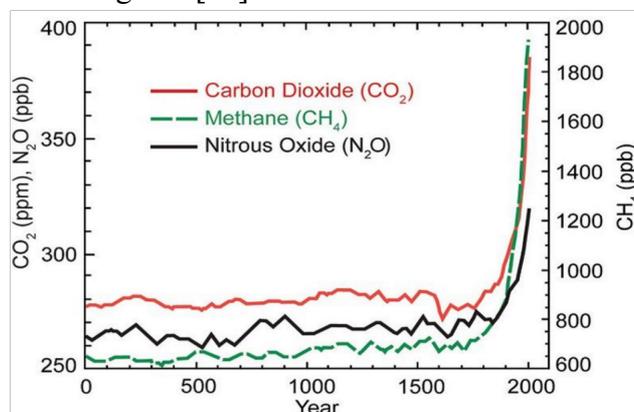


Figure 5 : Évolution de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre sur les derniers 2000 ans (U.S. Global Change Research Program, 2014)

Les questions fondamentales sur lesquelles les scientifiques se sont penchés au cours des dernières décennies ont été la détection et l'attribution du changement climatique. La détection d'un changement nécessite de prouver que l'évolution observée est incompatible avec la variabilité interne du système. Dans le cas du climat, il faut chercher des causes naturelles (comme le volcanisme ou la variabilité de l'activité solaire) ou anthropiques (l'émission de GES ou d'aérosols) pour expliquer ces changements[6]. Démontrer qu'un changement climatique est d'origine anthropique revient à prouver que seule la prise en compte de facteurs anthropiques dans la simulation climatique permet de reproduire le changement détecté. C'est l'objet des travaux de Meehl et al. (2004). Des modèles climatiques ont été appliqués sur la période post-industrielle (figure 6). Seules les simulations prenant en compte les forçages de gaz à effet de serre et d'ozone ont permis de reproduire l'évolution observée des températures globales au cours du XXème siècle. Il a été ainsi démontré que l'évolution des températures se distinguait de sa variabilité interne, et qu'elle était en effet cohérente avec celle des GES d'origine anthropique, à l'échelle du globe [57].

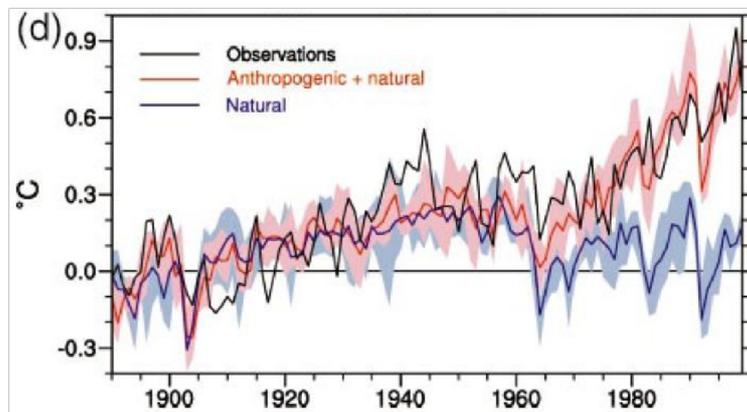


Figure 6 : Évolution des températures globales par rapport à la moyenne 1890-1919, observées et simulées à partir de plusieurs ensembles climatiques (Meehl et al., 2004)

Dans chacun de ses rapports, le GIEC présente les derniers résultats concernant la détection des changements climatiques déjà survenus, la simulation des changements à venir via l'utilisation des modèles climatiques globaux, ainsi que l'analyse des nombreux impacts (observés et attendus) de ces changements climatiques. Ceux relatifs à la ressource en eau ont d'ores et déjà été exhaustivement décrits dans ces rapports [5].

2.1. Évolution des températures au nord l'Algérie

D'après des études réalisées par l'ONM sur l'évolution des températures, il a été révélé que celles-ci sont en hausse depuis 1990, date du début des émissions à effet de serre. Cette évolution des températures en Algérie montre une hausse sur l'ensemble du territoire au cours des saisons d'hiver et d'automne et une hausse nette des températures minimales et maximales dans toutes les stations de l'Algérie du Nord et se prolonge jusqu'à nos jours. Durant ces 20 dernières années, les températures maximales ont augmenté plus que les minimales [19].

2.2 Évolution des précipitations au nord de l'Algérie

Quant aux précipitations, pour les mêmes périodes l'examen montre qu'en automne et en hiver, il y a diminution des pluies sur le Nord, et en printemps dans l'Est du pays [19].

On peut donc conclure qu'entre les périodes 1931-1960 et 1961-1990 :

- La hausse de température a été de l'ordre de 0,5°C ;
- La pluviométrie a baissé en moyenne de 10% ;

2.3 Évolution des débits en Algérie

Les précipitations représentent un facteur prépondérant dans le débit des cours d'eau, mais l'influence d'autres paramètres tels que la température, l'occupation du sol ou l'irrigation a augmenté depuis les dernières décennies (Gerten and Gedney, 2008).

En Algérie l'accroissement des températures qui caractérise le changement climatique global participe, même si c'est à au moins un degré à la réduction des écoulements.

Sur la période de septembre 1976 à aout 2002, les lames d'eau annuelles écoulées dans les bassins versants de l'Oued EL Hammam à trois rivières et l'oued Mekerra à Sidi Ali Ben youb et à sidi bel abbés ont diminué de 28 à 36% en moyenne par rapport à la période 1949-76 et 1976-2002, les débits annuels moyens sont passés de 4,58 à 2,93m³ /s aux trois rivières ; de 0,27 à 0,19 m³/s à Sidi ali ben youb et de 1,14 à 0,81m³/s à Sidi bel abbés. Pour refléter la relation qui existe entre pluie et débit et leur évolution respective sur le territoire algérien par rapport au changement climatique [40].

3. D'autres facteurs occultés par le changement climatique

Ces évolutions dans les débits (moyens ou extrêmes) et la qualité des eaux constituent la réponse du bassin versant à un forçage climatique donné. Mais ce forçage ne peut être exclusivement attribué au changement climatique [28]. D'autres facteurs influencent en effet le climat : variabilité climatique pluriannuelle [46]; [55] voire pluri-décennale [7]; [22] et d'autres facteurs influencent les débits directement : évolution de l'occupation du sol [53]; [60]; [64], ou de l'aménagement hydraulique [15]; [23].

3.1 Oscillations décennales et multi-décennales

Le climat connaît un nombre important d'oscillations, matérialisées via le calcul d'indices. Ces oscillations interviennent à plusieurs échelles temporelles, pluriannuelles à multi-décennales, et leur détection est directement fonction de la période de disponibilité des données climatiques observées. L'influence de ces oscillations climatiques sur le débit des cours d'eau est prépondérante [45]. Dans les décennies à venir, cette influence multi-décennale pourrait donc totalement occulter la réponse des débits au changement climatique, comme elle pourrait l'accentuer significativement. On constate une corrélation positive au nord et négative au sud de l'Europe et dans région méditerranéenne (Algérie), entre l'indice North Atlantic Oscillation (NAO) et les débits hivernaux des cours d'eau Européens ainsi que méditerranéens l'impact est indéniable.

3.2 Influences des activités humaines

3.2.1 Occupation du sol

Le couvert végétal et sa modification influent tant sur la quantité que sur la qualité des cours d'eau. Par exemple, un couvert forestier intercepte davantage les précipitations et prive le sol d'une quantité d'eau non négligeable [17]. A l'inverse, pour un même évènement pluvieux, un sol cultivé recevra davantage d'eau, donc la quantité d'eau ruisselée ou percolée sera elle aussi plus élevée [61], [64], [41].

La diminution du couvert végétal (conversion d'une forêt en surface cultivée par exemple), implique de nombreux impacts : érosion et amincissement des sols, transports sédimentaires, apparition éventuelle d'une croûte de battance favorisant le ruissellement, et au final, une accélération de la réponse hydrologique [61].

Bien qu'une déforestation engendre systématiquement une augmentation du débit (la végétation arborée est l'une des végétations les plus consommatrices en eau), de nombreux autres paramètres sont à prendre en compte. Dans sa revue bibliographique, [3] souligne ainsi les effets encore mal connus de la repousse, de la densification et du vieillissement des forêts sur la réponse hydrologique face à un changement d'occupation du sol. Il note également le rôle des caractéristiques climatiques, physiologiques (essences végétales présentes) ou du type de sol, dont les caractéristiques physiques (infiltrabilité, capacité de rétention) régulent les écoulements [41].

Les changements d'occupation du sol touchent aussi la qualité des eaux superficielles [38] ; [24]; [44]; [61] ; [38] parmi d'autres, met en évidence l'influence de l'occupation du sol et de la densité de population sur les flux de nutriments et de sédiments qui augmentent lorsque les surfaces cultivées s'accroissent, confirmant les résultats de [44]. La quantité et la qualité de la matière organique dissoute (MOD) présente dans le cours d'eau influent sur sa transparence.

3.2.2 Aménagement et gestion hydraulique

A l'instar des modifications de l'occupation du sol, la gestion et l'aménagement des cours d'eau affectent la ressource en eau sur le plan qualitatif et quantitatif et peuvent modifier le profil en long ou en travers des rivières, agir sur le cours d'eau ou sur ses abords, ou encore avoir des répercussions sur une région entière [51].

Les barrages sont conçus initialement pour créer des retenues qui modifient la répartition temporelle des débits [23] dans le but de permettre un écrêtage de crue et un soutien d'étiage. Mais ces aménagements ont d'autres effets non voulus. Vuglinsky, (1995) décrit une augmentation de l'évapotranspiration au niveau de la retenue d'eau et dans les zones bordant la retenue. [61] souligne la sédimentation accrue des particules en aval des retenues, la discontinuité écologique le long du profil de rivière, ou encore le

développement de parasites au niveau des retenues. Zubala, (2009) constate une qualité détériorée des eaux dans le réservoir et en aval de celui-ci. Graf (2006) décrit des canaux moins larges, des plaines d'inondation moins actives, et finalement, des écosystèmes moins complexes.

L'irrigation peut également influencer de manière significative la ressource, via l'augmentation de l'évapotranspiration. A l'échelle globale, [15] estiment qu'un sixième de la surface continentale mondiale (excluant l'Antarctique et le Groënland) aurait subi une diminution supérieure à 10% des débits moyens annuels, principalement en raison de l'irrigation.

3.2.3 Les pratiques agricoles et les rejets

Les pratiques agricoles ainsi que les pollutions urbaines (notamment industrielles) participent à faire varier la composition chimique et donc la qualité des eaux de surface [10]; [16]; [62] ; [44].

Les intrants sont très souvent utilisés en excès par rapport aux exports de nutriments sur la parcelle (soit par une sur-fertilisation, soit par une mauvaise assimilation du fertilisant par les plantes). Ils sont transférés aux milieux aquatiques par percolation à travers le sol, ou ruissellement, et participent fortement à leur eutrophisation.

La concentration en nutriments dans les eaux de surface, corrélée avec la quantité de fertilisant utilisée en agriculture [44] a déjà été très largement étudiée. On trouvera une revue bibliographique des sources de pollution et des processus menant à la dégradation de la qualité des eaux dans les travaux de [10].

4. Les changements climatiques et les sols

Les sols interagissent avec le changement climatique à plusieurs titres. De par leur rôle dans les cycles globaux du carbone et de l'azote, les sols échangent en permanence trois des principaux gaz à effet de serre d'origine anthropique (CH₄, CO₂, N₂O) avec l'atmosphère. Leur usage est aujourd'hui considéré comme un levier important dans la lutte contre le changement climatique.

5. Le bassin versant de Keddara

L'objectif de cette étude étant la mise en évidence de l'impact du changement climatique sur le bassin versant de Keddara. Le bassin versant de keddara installé sur la superficie de l'oued BOUDOUAOU à l'emplacement du barrage de keddara dont les données seront utilisées pour l'étude est de 93 km² ayant une forme presque arrondie. Ce barrage est situé sur le territoire de la Wilaya de **BOUMERDES** qui est une wilaya côtière du centre du pays avec 100 km de profil littoral, elle se situe dans la région Nord-Centre, partie intégrante de l'Est de l'aire métropolitaine d'Alger, sa superficie globale est de 1 456,16 Km², caractérisée par un climat méditerranéen (hivers froids et humides et étés chauds et secs). Le barrage se trouve à 8 km au sud de **BOUDOUAOU** et 35 km l'est d'ALGER, il fait partie de l'aménagement Isser-Keddara destiné à satisfaire les

besoins en eau potable de l'agglomération algéroise, il est de ce fait considéré comme l'un des plus grands barrages du centre du pays avec une capacité de mobilisation estimée à plus de 140 millions de m³ d'eau [1] ; [2] ; [14].



Figure7 : carte de situation du barrage de Keddara



Figure 8 : image satellitaire du barrage Keddara.

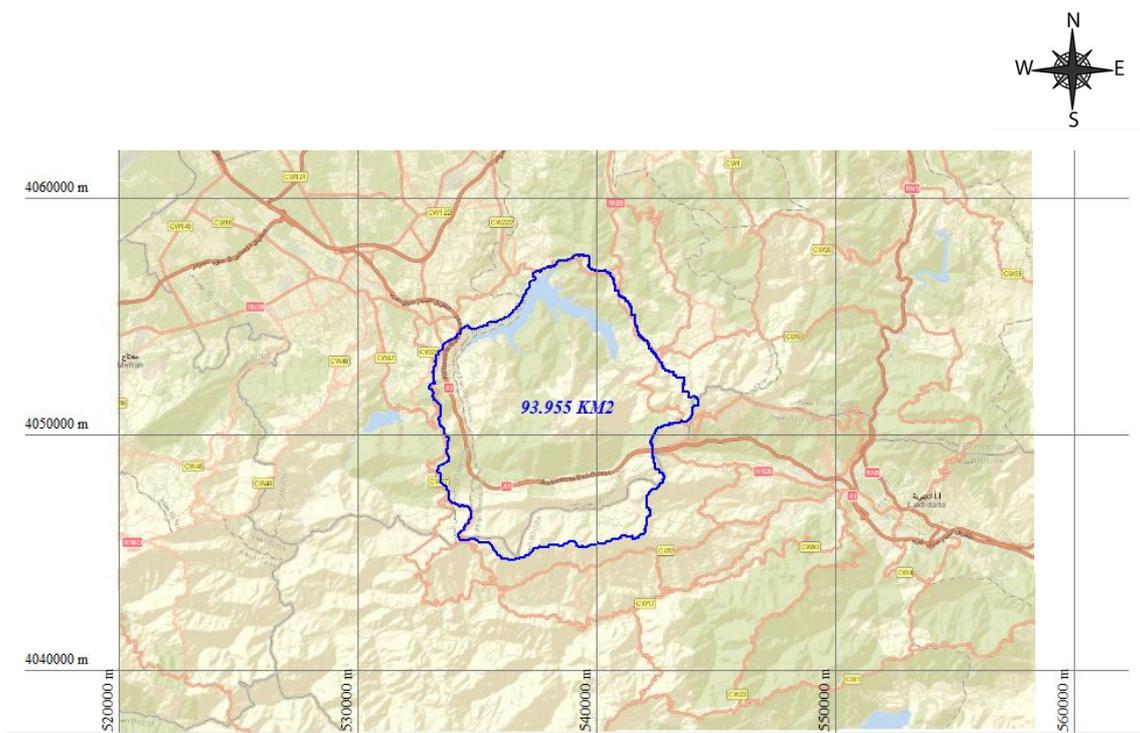


Figure 9 : Bassin Versant de Keddara

- Sur le plan géologique la région de Keddara se trouve sur le flanc Nord de l'Atlas tellien dans un complexe métamorphique appartenant à l'extrémité occidentale du massif kabyle qui plonge vers l'ouest.

La géologie du site est caractérisée par une tectonique cassante très intense et une altération superficielle très variable mais parfois assez profonde.

On peut distinguer trois types principaux de roches :

- Les schistes quartzitiques chlorotiques, généralement compactes et assez dures, forment la base. A la surface, ils ne sont présents qu'au fond de la vallée formant au site du barrage un "horst" qui est limité latéralement par des failles.
 - Les micaschistes recouvrent les schistes quartzitiques chlorotiques, composé de mica et de kaolinite et parfois du chlorite, du quartz et du feldspath, ils sont de couleur noir, gris foncé ou argenté.
 - Les schistes sericitiques qui occupent la terrasse supérieure tout le long de la rive droite, lustrées, bleutées, argileux, tendres et composées de séricite, quartz, kaolinite, feldspath, chlorite et très peu de charbon.
- Sur le plan géomorphologique Un des traits caractéristiques du bassin versant de Keddara est la présence de fortes pentes malgré la faiblesse des altitudes absolues. 50% de la superficie du bassin est en dessous de 466 m et 12% à peine au-dessus de 700 m.

Ces fortes pentes se situent particulièrement entre 200 et 300 m d'altitude. Les zones situées au nord de Keddara et à l'est d'Arbaatache ont des pentes longues et modérées, permettant des cultures sur toute la longueur du versant, donc la spécificité des différents secteurs du bassin versant est :

- Le massif calcaire résistant de Bouzegza, aux pentes très fortes et couverture au sud par une végétation fermée.

Le haut bassin des oueds EL-HAD et KEDDARA, aux pentes fortes, où le sol est à nu ou recouvert d'une maigre végétation.

L'intensité de l'érosion variera, donc, sensiblement d'une partie à l'autre du bassin, malgré sa faible superficie.

Le ruissellement des eaux pluviales au niveau des fortes pentes où le sol est à nu, est favorable à l'entraînement vers l'aval d'une grande masse de sédiments riche, en sel nutritifs. [5]

- Couvert végétale du bassin versant du barrage KEDDARA en générale est forestières en particulier joue un rôle protecteur vis à vis des sols et ainsi que leur évolution.
 - Le pin l'Alep est utilisé pour le reboisement des zones les plus dégradées soit par les incendies, soit par l'action de l'homme et des troupeaux ;
 - Chêne liège : développe préférentiellement dans les zones à fortes précipitations ou humide, à climat chaud, sur des sols sablonneux ou schisteux, meubles et profonds.



Figure 10 : vue du barrage Keddara (aval)



Figure 11 : vue du barrage Keddara (amont)

- Les affluents du barrage keddara sont :
 - La retenue de Beni-Amrane qui a été fait de façon à remplir les fonctions principales suivantes :
 - Contrôler le débit de l'oued Isser de manière à ce que le système de pompage entre Béni-Amrane et KEDDARA puisse fonctionner avec une utilisation suffisante pour permettre de satisfaire les besoins en eau potable, actuels et prochains, non seulement du Grand Alger mais aussi des villes situées dans la zone est de la Mitidja, entre Alger et l'oued BOUDOUAOU ;
 - Contrôler le rôle de la retenue de sédimentation en assurant une évacuation efficace des sédiments de la retenue, permettent ainsi de maintenir un volume de stockage suffisant pour la régularisation adéquate du débit et l'amélioration de la qualité de l'eau ;
 - Assurer que les lâchers contrôlés ne causent pas de dégâts et de nuisances évitables aux habitants et propriétés de la vallée aval.

- Le bassin versant du barrage de Keddara avec une superficie de 93 km², il est alimenté par les affluents des oueds KEDDARA, EL-HAAD et par les eaux de pluie [4].

6.Objectifs du travail

Depuis quelques décennies, les impacts du changement climatique sur la ressource en eau sont de mieux en mieux documentés. Cependant, au travers de la littérature existante, on constate qu'un grand nombre d'études porte sur les évolutions globales de la ressource en eau, ou bien à l'échelle de grands bassins versants, aux échelles internationales ou nationales. Cela est essentiel, car l'enjeu du changement climatique est global. Mais cette échelle ne permet pas de mobiliser localement les acteurs. Or c'est au niveau des territoires que les impacts du changement climatique se font et se feront sentir, et donc que l'adaptation est nécessaire [59]. Le bassin versant de KEDDARA est un domaine d'étude assez intéressant car est à l'origine de l'alimentation d'une partie de l'Algérois en eau potable.

Dans ce cadre, les trois objectifs principaux de ce mémoire ont été :

- La mise en place et la validation d'un outil de modélisation sur le bassin versant de Keddara ;
- L'application de cet outil de modélisation afin de simuler les débits à l'exutoire du bassin versant pour l'impact quantitatif ;
- La visualisation à travers des techniques de télédétection de l'impact sur les sols du bassin versant.

Conclusion

Après avoir rappelé les concepts principaux du changement climatique, et les processus affectant le cycle hydrologique, nous avons réalisé un état de l'art des impacts du changement climatique sur la ressource en eau à travers des aspects quantitatifs et la place des sols face à cette donnée.

CHAPITRE 2 : Implémentation de la chaîne de modélisation

Introduction

Ces dernières années, l'augmentation de la performance des ordinateurs, conjuguée à la disponibilité croissante de données, ont permis de réaliser des travaux toujours plus vastes sur le changement climatique et ses impacts. Le développement de réseaux d'observation fiables permet une meilleure analyse des tendances passées, et la paramétrisation de modèles plus complexes. La croissance exponentielle des capacités de calcul des ordinateurs permet la réalisation de "runs" climatiques longue durée, à un pas de temps très fin, et sur des mailles plus fines. Malgré tout, chaque opération de modélisation conduit à une simplification de la réalité, ce qui engendre un grand nombre d'incertitudes. Dans le cadre des études d'impacts du changement climatique sur la ressource en eau, ces incertitudes ont plusieurs origines : incertitude dans les émissions futures de GES, dans la reproduction des processus du système climatique par les modèles climatiques globaux (MCG), dans les méthodes de désagrégation spatiale des MCG, et enfin dans la reproduction des processus hydrologiques. Cette succession de simplifications de la réalité aboutit à une vraie "cascade d'incertitudes", affectant chaque étude d'impacts du changement climatique [17].

Si elles sont inévitables, ces incertitudes peuvent néanmoins être prises en compte dans les modélisations. C'est le cas des études d'impacts considérant plusieurs scénarios RCP, contraignant plusieurs MCG, qui eux-mêmes alimentent plusieurs modèles d'impacts [8]; [46]; [26]; [52].

Dans ce travail, notre choix se porte sur le bassin versant de KEDDARA où une chaîne de modélisation hydro climatique a été implémentée afin de simuler de l'impact du changement climatique niveau quantitatif (évolution du débit à l'exutoire sur la durée de notre étude).

1. Choix préalables

1.1. Choix du modèle hydrologique

1.1.1. Classification des modèles hydrologiques

Un modèle simplifie un système réel et complexe, afin d'en reproduire le comportement et d'améliorer la compréhension de son fonctionnement. En modélisation hydrologique, le système considéré est le bassin versant, qui « *transforme les signaux "précipitations solides et liquides" et "évapotranspiration" en un signal de sortie "écoulement", en intégrant son état de surface, les échanges avec les eaux souterraines, les prélèvements, les rejets et la gestion des ouvrages de transfert et/ou de régulation* » (MEDDTL, 2011b).

La calibration du modèle hydrologique sur chaque bassin versant étudié permet de prendre en considération les caractéristiques locales, telles que ces échanges.

Un grand nombre de modèles hydrologiques existent. Ces modèles se différencient selon leurs finalités (simulation de crue, de qualité des eaux, transformation pluie-débit), selon les données nécessaires à leur fonctionnement, ou encore selon leur structure (figure 12) [17].

1.2. Conceptualisation du modèle

Les modèles hydrologiques peuvent, pour reproduire le débit du cours d'eau, s'appuyer sur des conceptualisations différentes. D'abord, certains sont basés sur des équations empiriques, pour transformer le signal d'entrée (la pluie) en signal de sortie (le débit). Ces équations sont établies à partir de l'analyse des données entrées et sorties du modèle, et ne cherchent pas à reproduire les processus élémentaires [51]. C'est le cas par exemple du modèle GR4J [47].

A l'inverse, d'autres modèles cherchent à décomposer le fonctionnement du système grâce à des équations physiques, basées sur une discrétisation fine du milieu, qui tentent de représenter les processus réels. Cette conceptualisation physique diminue l'utilisation de coefficients empiriques, et permet au modèle d'être applicable sur n'importe quel bassin versant. Le modèle MIKE SHE [49] fait partie de cette catégorie. Notons qu'il existe une catégorie intermédiaire, les modèles dits conceptuels. Plus simples que les modèles à base physique, ils cherchent à représenter le fonctionnement du bassin versant sous la forme de réservoirs interconnectés [51].

1.3. Distribution spatiale des paramètres

Les modèles globaux, de type "boîte noire", sont les plus simples. Le bassin versant y est représenté comme une maille unique élémentaire. Le nombre de paramètres à calibrer est généralement faible, et les données nécessaires à son fonctionnement sont peu nombreuses et ne sont pas spatialement distribuées. Par exemple, le modèle GR4J nécessite uniquement les données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle journalière pour simuler le débit à l'exutoire du bassin versant. Les modèles semi-distribués discrétisent le bassin versant en plusieurs unités hydrologiques, et permettent donc de simuler les variables de sorties à l'échelle de sous-bassins [17].

Les modèles distribués, eux, utilisent des informations spatialisées sur le bassin versant. Ils sont en théorie les plus précis, et permettent une meilleure compréhension des phénomènes naturels à différentes échelles [36] mais ils soulèvent la question du niveau de précision à prendre en compte (avec quelle précision doit-on renseigner les données d'entrée ?). Les données nécessaires sont en outre plus nombreuses et pas toujours disponibles à l'échelle voulue [17].

1.4. Résolution temporelle

Le pas de temps d'un modèle correspond à la fréquence à laquelle les équations sont résolues. Il doit être choisi selon les processus étudiés : si l'on s'intéresse à la dynamique de crue, il conviendra de choisir un modèle fonctionnant au pas de temps horaire. Généralement, un pas de temps de simulation court est associé à une structure plus complexe du modèle [17].

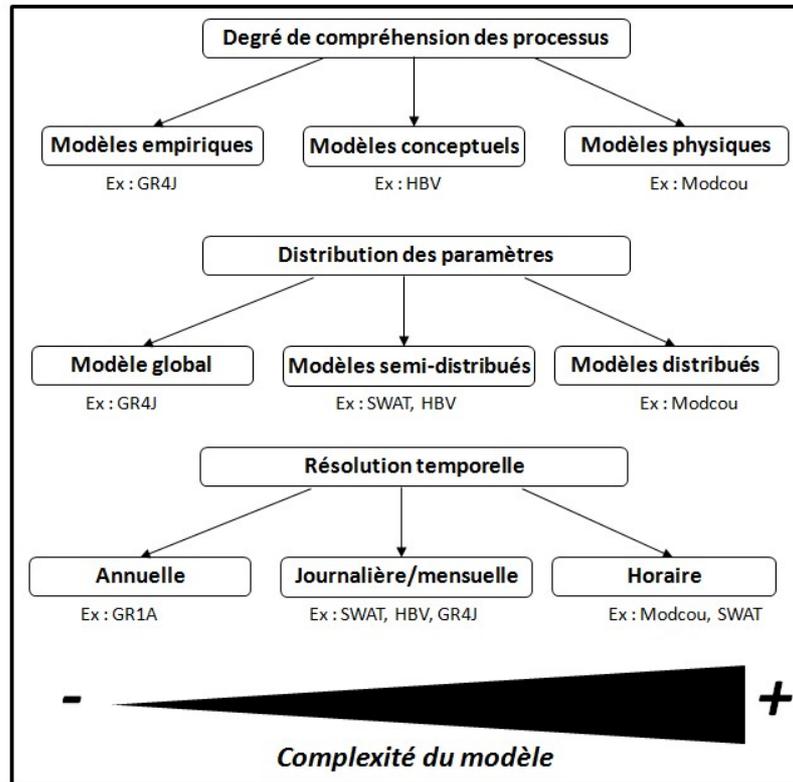


Figure 12 : Classification des modèles hydrologiques selon leur structure

2. Choix du modèle hydrologique et son fonctionnement

L'un des principaux objectifs de ce travail de ce mémoire sont de déterminer l'impact qu'aura le changement climatique sur la disponibilité de la ressource sur bassin versant de KEDDARA. Le débit du cours d'eau simulé à l'exutoire du bassin versant, s'il ne renseigne pas directement sur la disponibilité quantitative sur tout le bassin versant, constitue tout de même un indicateur de la disponibilité globale de la ressource en eau.

Pour répondre à cette problématique, nous avons choisi d'utiliser le modèle hydrologique différent GR4J, qui nous servira à simuler le débit à l'exutoire du bassin versant, en continu sur la période 2000 - 2019. C'est le modèle non distribué de [47]. Son fonctionnement est décrit dans les paragraphes suivants.

3. Le modèle GR4J

Le modèle GR4J, développé par l'IRSTEA, est un modèle de type « pluie-débit » : il s'attache à transformer un signal d'entrée (les précipitations) en un signal de sortie (le débit), à partir d'équations empiriques. Il appartient à la famille des modèles globaux, ce

qui signifie qu'il simule le débit à l'exutoire du bassin versant sur la base de données non spatialement distribuées. Seuls deux paramètres climatiques journaliers, moyennés sur l'emprise du bassin versant, sont nécessaires pour simuler le débit : les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Il possède une fonction de production, qui permet de transformer les précipitations "brutes" en précipitations efficaces (fraction alimentant effectivement le bassin versant), une fonction de transfert, qui calcule les délais de routage de l'eau dans le système, et deux réservoirs interconnectés (figure 13).

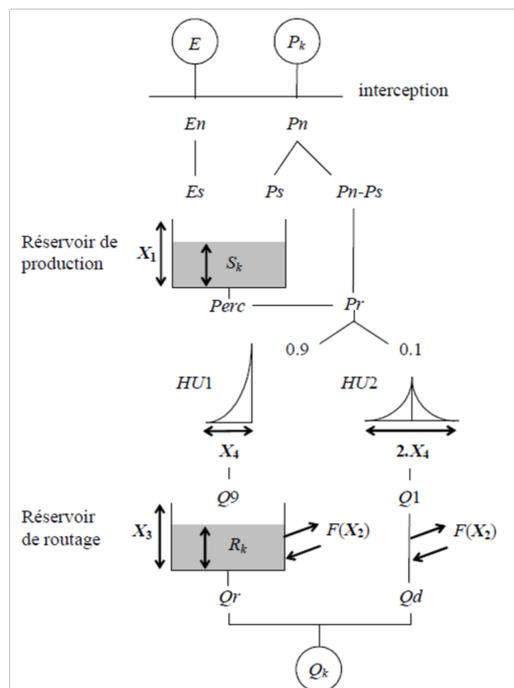


Figure 13 : Schéma de fonctionnement de GR4J (Perrin, 2007)

Le modèle GR4J est relativement simple puisqu'il ne possède que 4 paramètres qu'il convient de calibrer notre bassin versant. Ces 4 paramètres (tableau 1) possèdent des bornes minimales et maximales qui ont été déterminées après application à un très large échantillon de bassins versants [47].

Tableau 1 : Paramètres de GR4J, signification et valeurs par défaut (Perrin et al., 2003)

Paramètres	Signification	Valeurs min et max	Unité
X1	Capacité du réservoir de production	[100 ; 1200]	mm
X2	Coefficient d'échange souterrain	[-5 ; 3]	mm/jour
X3	Capacité du réservoir de routage	[20 ; 300]	mm
X4	Temps de base de l'hydrogramme unitaire	[1.1 ; 2.9]	jour

Sa faible paramétrisation (seulement 4 paramètres à calibrer) lui confère une certaine robustesse (Perrin, 2000). En effet, son développement obéit au principe de parcimonie (Nash and Sutcliffe, 1970), qui implique que toute augmentation de la complexité d'un modèle se fasse en contrepartie d'une augmentation significative de la performance et de la robustesse du modèle.

Ce principe est d'autant plus important dans le cadre d'études prospectives comme c'est le cas dans les études d'impact du changement climatique, telles que la nôtre.

Enfin, ce modèle a déjà été employé dans de nombreuses études d'impacts du changement climatique. De plus, sa robustesse en contexte de changement climatique a également été comparée à une vingtaine d'autres modèles globaux [54]. Il advient que GR4J permet d'obtenir les meilleures performances lors des expériences de calibrations/validations en climats contrastés.

Le modèle GR4J est disponible gratuitement sur le site de l'IRSTEA (<http://webgr.irstea.fr>), sous forme d'un exécutable EXCEL.

3.1. Données climatiques en calibration/validation

Les précipitations ont été fournies par l'ANBT, quant aux températures journalières sur notre période d'étude elles ont été obtenues sur le site dz.freemeteo.com ainsi que sur www.infoclimat.fr (la station de Dar el Beida étant la plus proche de notre site et dont les données étaient disponibles, elles ont été nécessaires pour combler nos températures manquantes) et l'évapotranspiration journalière est calculée à travers la feuille de calcul EXCEL d' OUDIN qui utilise la latitude de la région et donne l'évapotranspiration pour chaque température journalière, nécessaire pour alimenter notre modèle GR4J.

Formule d'OUDIN (2004) pour l'évapotranspiration journalière :

$$PE = \frac{Re}{\lambda \rho} \frac{Ta + 5}{100}$$

Avec :

PE : Évapotranspiration potentielle (mm /jour) ;

Re : Radiation extra-terrestre (MJ m-2/jour) calculée en fonction de la latitude et du jour ;

Ta : Température journalière en °C ;

λ : Flux de chaleur latente (2,48 MJ /Kg) ;

ρ : Densité de l'eau (Kg /m³).

4. Méthodes de calibration et de validation du modèle hydrologique

Cette section s'attardera à décrire l'ensemble des choix réalisés durant la calibration du modèle hydrologique.

4.1. Calibration de GR4J

4.1.1. Principe de calibration / validation

La calibration des 4 paramètres de GR4J est réalisée de manière automatique. Elle consiste en une modification des paramètres de façon à optimiser une fonction objective (F.O). La F.O quantifie la similarité entre le débit simulé et le débit observé. La procédure d'optimisation modifie par itération les 4 paramètres de GR4J. A chaque modification, le modèle est appliqué sur la période de calibration, et la F.O est calculée. Lorsque la F.O n'augmente plus significativement entre deux itérations, les paramètres sont alors calibrés [17].

Comme les paramètres sont censés être dépendants du bassin versant, et non de la période utilisée pour la calibration, ils doivent rester valides sur l'ensemble de la période de référence. On teste cette hypothèse en appliquant les paramètres calibrés sur la première période, à une deuxième période, dite de "validation". Lors de cette validation, la F.O est également calculée afin de comparer la performance du modèle en calibration et en validation. Les périodes de calibration/validation doivent être d'une durée suffisamment longue pour être représentative de la variabilité hydrologique. En général, on estime que 5 à 10 ans sont nécessaires (MEDDTL, 2011b).

4.1.2. Critères de performance utilisés

La F.O est choisie parmi plusieurs critères de performance possibles. Cependant, elle ne suffit pas à elle seule à qualifier la performance d'un modèle. On calcule généralement plusieurs critères différents. Ceux habituellement utilisés en modélisation hydrologique sont le critère de Nash et Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970) (Équation), et sa variante sur la racine des débits et le logarithme népérien des débits.

$$\text{Équation : NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Avec :

$Q_{obs,i}$: débit observé au jour i

$Q_{sim,i}$: débit simulé au jour i

$\overline{Q_{obs}}$: débit moyen observé

Le critère de NS donne une valeur comprise entre 1 et moins l'infini. Si la valeur est de 1, l'ajustement entre le débit simulé et observé est parfait. Si la valeur est négative, le débit simulé est moins bon que la moyenne des débits observés appliquée de manière constante. Ce critère est sensible aux valeurs extrêmes et est exigeant sur la restitution des débits en hautes eaux (Legates and McCabe, 1999). L'application de ce critère sur la racine des débits ou le logarithme népérien des débits permet d'être davantage sensible aux débits moyens et faibles respectivement [36].

Conclusion

La mise en place d'une chaîne de modélisation hydro climatique est cruciale pour permettre d'approcher les impacts du changement climatique sur la ressource en eau dans le bassin versant de Keddara, à l'échelle locale, au travers d'aspect quantitatif. Une telle chaîne de modélisation nécessite de nombreux jeux de données (données climatiques, hydrologiques) et de nombreuses étapes (calibration et validation du modèle d'impact...) qui requièrent une technicité importante et de nombreux choix méthodologiques qui ont été pour la plupart décrits dans cette partie.

Chapitre 3 : Validation du modèle GR4J sur la période de référence

Introduction

Nous visualiserons dans ce chapitre le résultat des calibrations, et nous jugerons les performances du modèle obtenues en calibration et en validation sur notre période de référence. Cette étape est primordiale, puisqu'une calibration adaptée est le seul gage de crédibilité qu'auront nos simulations et interprèterons également les retours issus de ces dernières.

1.Simulation des débits sur le bassin versant de Keddara par le GR4J

1.1. Performance de GR4J en calibration

La calibration est un exercice minutieux qui consiste à trouver la période optimale sur laquelle les paramètres du modèle sont dans un intervalle de confiance donné voir tableau 2 ainsi que l'obtention de la meilleure fonction objective FO qui est ici le coefficient de Nash. Pour se faire nous avons calé les paramètres sur différentes périodes jusqu'à la non évolution de notre FO, signe de l'atteinte de la calibration optimale de notre modèle.

Tableau 2 : Intervalles de confiance du modèle GR4J

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance 80%
X_1 (mm)	350	100 à 1200
X_2 (mm/j)	0	-5 à 3
X_3 (mm)	90	20 à 300
X_4 (jours)	1.7	1.1 à 2.9

Source : Cours de M. Denis Dartus

Nb : Sortir de cet intervalle signifie que nous serons en train d'effectuer un forçage sur le modèle.

1^{ère} Période de calibration 2000-2008 :

Sur cette période après introduction nos données à savoir la superficie du bassin (km^2), les précipitations (mm), les évapotranspirations (mm) ainsi que les débits (m^3/s), en prenant en compte une année (365 jours) de longueur de mise en route du modèle pour éviter l'effet d'une mauvaise initialisation des taux de remplissage voir tableau 5. Les paramètres obtenus n'étaient pas calés par rapport aux intervalles de confiance donnés. De ce fait nous avons procédé à une optimisation de ces derniers par l'intermédiaire du solveur qui est une fonction faisant partie du modèle destinée à cet effet, en ayant pour cellule cible notre FO (le coefficient de Nash) et cellules variables nos paramètres ainsi

que les deux taux de remplissage. Après optimisation nos paramètres étaient calés dans l'intervalle de confiance (voir tableau 2) mais notre FO qui est notre critère de performance était de plus de 30%, 37 pour être exacte ce qui n'est pas mal, voir satisfaisant. (voir tableau 4).

Tableau 3 : Valeurs paramètres du modèle après optimisation

Paramètres modèle	Transf.	Réels
x1: Capacité rés. production (mm)	4,70	109,95
x2: Paramètre d'échange (mm/j)	1,50	2,13
x3: Capacité rés. routage (mm)	4,00	54,60
x4: Délai (jours)	-0,50	1,11

Nb : ce sont les valeurs réelles qui sont prises en considération dans les calculs donc qui doivent être dans les intervalles de confiance et varient en fonction des valeurs de la colonne en jaune.

Tableau 4 : valeurs références du critère de Nash

NS	Ajustement
<0,2	Insuffisant
0,2-0,4	Satisfaisant
0,4-0,6	Bon
0,6-0,8	Très bon
>0,8	Excellent

Source : Manho (2012)

Tableau 5 : Valeurs des taux de remplissage après optimisation

Valeurs initiales	
Taux de remplissage initial S0/x1	0,78
Taux de remplissage initial R0/x3	0,71

2^{ème} Période de calibration 2000-2009 :

Après introduction de nos données sur cette période tout en gardant la même durée de mise en route, les paramètres n'étaient pas dans les intervalles de confiance. À l'optimisation de nos paramètres à travers le solveur comme pour la première période, nous avons constaté une hausse de notre FO à plus 50% (50,5) qui est une valeur plus que satisfaisante, elle est bonne (voir tableau 4). Les valeurs des paramètres restent caler dans les intervalles de confiance voir tableau 6 et les taux de remplissage varient voir tableau 7.

Tableau 6 : valeurs des paramètres du modèle

Paramètres modèle	Transf.	Réels
x1: Capacité rés. production (mm)	4,61	100,48
x2: Paramètre d'échange (mm/j)	1,80	2,94
x3: Capacité rés. routage (mm)	3,30	27,11
x4: Délai (jours)	-0,51	1,10

Tableau 7 : valeurs des taux de remplissage

Valeurs initiales	
Taux de remplissage initial S0/x1	0,82
Taux de remplissage initial R0/x3	0,77

3^{ème} Période de calibration 2000-2010 :

Sur cette dernière la mise en place des données, tout en considérant toujours la période de mise en route de 365 jours, les paramètres n'étaient pas calés dans les intervalles de confiance et comme à l'accoutumé nous avons procédé à une optimisation par le solveur et les paramètres une fois calés (voir tableau 8), le coefficient de Nash n'a pas bien évolué, au contraire il a régressé de à peu près 1% (49,3%). Cette non évolution de notre FO montre que la deuxième période de calibration est optimale pour notre modèle. À noter que nos taux de remplissage sont les mêmes que pour la deuxième période de calibration.

Tableau 8 : valeurs des paramètres du modèle

Paramètres modèle	Transf.	Réels
x1: Capacité rés. production (mm)	4,94	139,77
x2: Paramètre d'échange (mm/j)	1,70	2,65
x3: Capacité rés. routage (mm)	3,00	20,09
x4: Délai (jours)	-0,51	1,10

Tableau 9 : valeurs des taux de remplissage

Valeurs initiales	
Taux de remplissage initial S0/x1	0,82
Taux de remplissage initial R0/x3	0,77

1.2. Performance de GR4J en validation

Cet exercice consistant à valider nos valeurs de paramètres du modèle et les taux de remplissage obtenus après calibration sur le reste des données de la période de référence ainsi pour chaque période de calibration nous verrons si les valeurs sont toujours valables sur le reste des données en gardant à peu près le même de coefficient de Nash notre fonction objective FO.

1^{ère} Période de validation 2009-2019 :

Sur la première période nous avons validé sur le reste des données sans encombre en ne prenant toujours la même période de mise en route d'une année recommandée. Les

valeurs des paramètres sont toujours valides et la fonction objective garde à peu près la même valeur 36,9%. D'où notre validation est effective.

2^{ème} Période de validation 2010-2019 :

Toujours en prenant pas en compte la longueur de mise en route, nous avons remarqué que les valeurs des paramètres restent intactes sur cette période de validation ainsi que les l'évolution de notre FO qui reste encore une fois de plus à peu près la même que sur la période de calibration (50,4%) donc une validation encore effective.

3^{ème} Période de validation 2011-2019 :

La même opération est effectuée comme sur les périodes précédentes et le résultat est toujours valide car notre FO ne varie pas du tout par rapport à la période de calibration (49,3%) toujours donc on peut dire que les valeurs des paramètres du modèle ainsi que celles des taux de remplissage sont valides sur toute la période de référence.

Tableau 10 : Récapitulatif des valeurs des paramètres du modèle et des coefficients de Nash

Phase de calibration	Phase de validation	Paramètres				Critères de calibration				Critères de validation			
		X ₁ (mm)	X ₂ (mm/j)	X ₃ (mm)	X ₄ (mm)	Nash (Q)%	Nash (\sqrt{Q})%	Nash (lnQ)%	Bilan %	Nash (Q)%	Nash (\sqrt{Q})%	Nash (lnQ)%	Bilan %
2000-2008	2009-2019	4,70	1,5	4,00	-0,50	37	55,7	53,8	45,8	36,9	55,7	53,9	45,7
2000-2009	2010-2019	4,61	1,80	3,30	-0,51	50,5	30,7	-37,6	100	50,4	30,8	-37,2	100
2000-2010	2011-2019	4,94	1,70	3,00	-0,51	49,3	19	-58	100	49,3	18,9	-58,4	100

Nb : les critères pris en considération étant ceux du débit en vert

1.3. Débits simulés par le modèle GR4J

Les critères de performance constituent un moyen de comparaison quantitatif des modèles. Il faut ajouter à cela une validation graphique qui consiste à la comparaison des débits simulés et observés.

1.3.1. Performance graphique en calibration-validation

1^{ère} Période de calibration 2000-2008

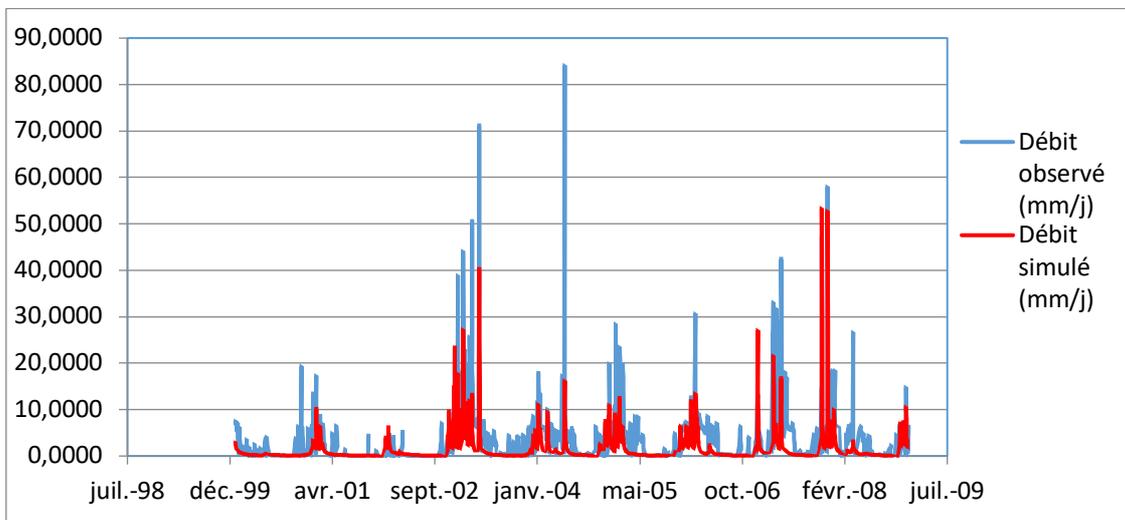


Figure 14 : Débits observés et simulés sur la 1^{ère} Période de calibration

Ici les débits simulés reproduisent à 37% sont d'après notre coefficient de Nash l'évolution de ceux observés.

1^{ère} Période de validation 2009-2019

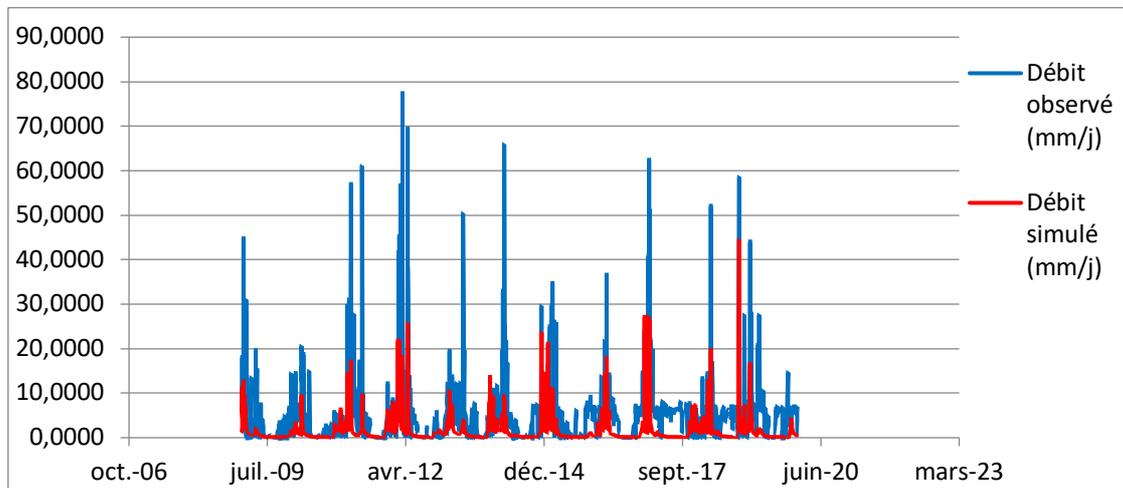


Figure 15 : Débits observés et simulés sur la 1^{ère} Période de validation

En validation le pourcentage de Nash est pratiquement le même 36,9% qu'à la calibration pour l'évolution des débits simulés par rapport à ceux observés.

2^{ème} Période de calibration 2000-2009

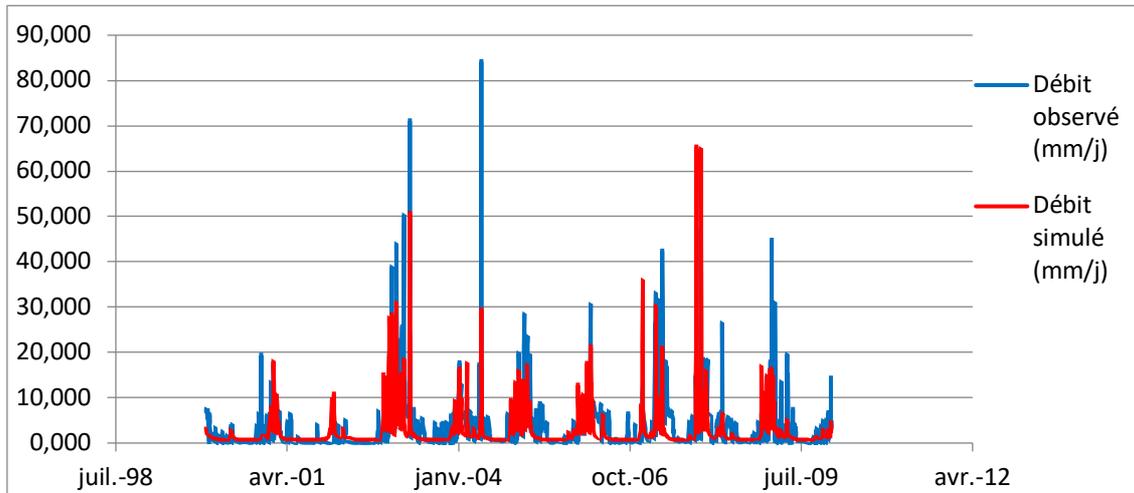


Figure 16 : Débits observés et simulés sur la 2^{ème} Période de calibration

Dans cette deuxième partie notre fonction objective pour la calibration est de 50,5% donc les débits simulés à l'exutoire ont une bonne reproduction de l'évolution de ceux observés.

2^{ème} Période de validation 2010-2019

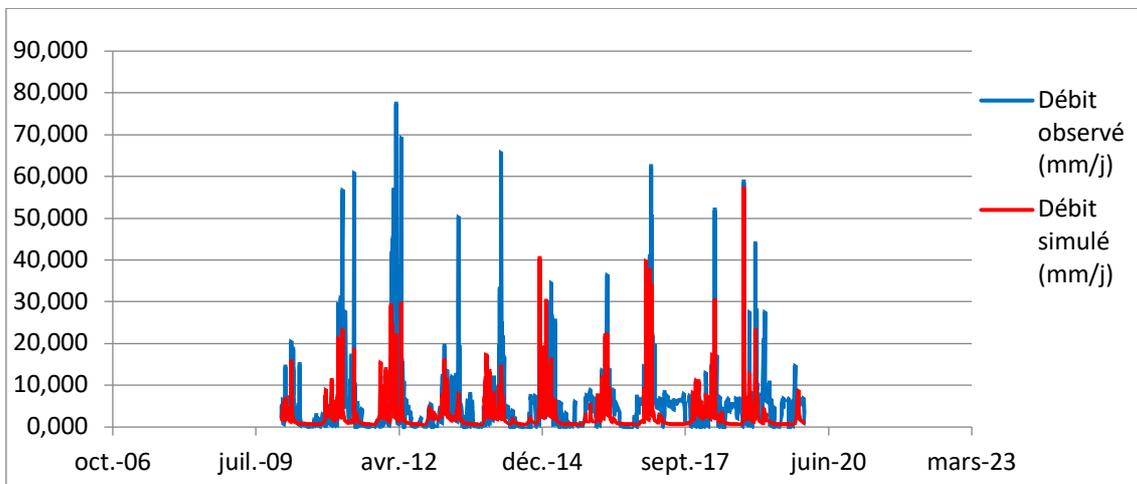


Figure 17 : Débits observés et simulés sur la 2^{ème} Période de validation

Le pourcentage de notre FO est aussi élevé qu'à la calibration. Il y a toujours une bonne reproduction de l'évolution entre les deux débits

3^{ème} Période de calibration 2000-2010

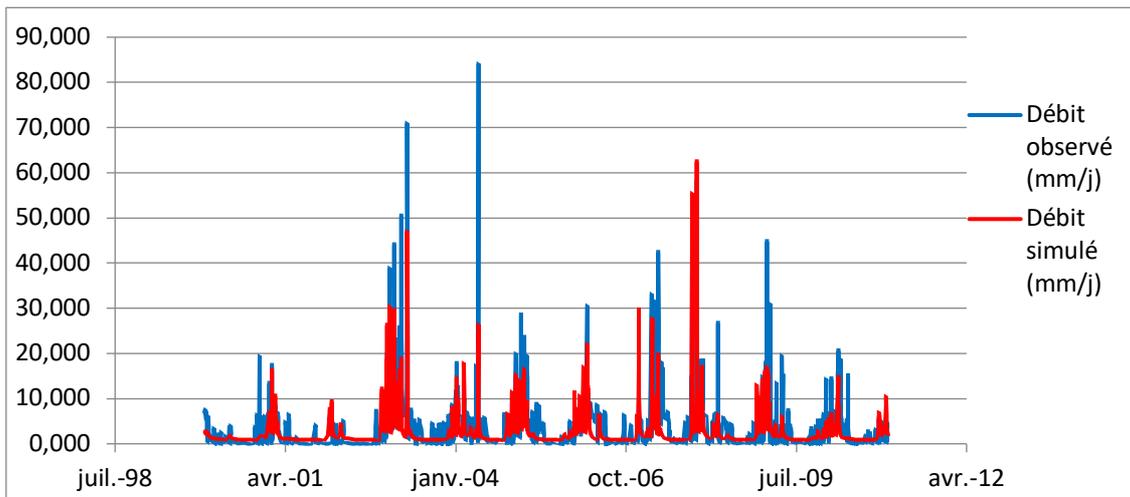


Figure 18 : Débits observés et simulés sur la 3^{ème} Période de calibration

En troisième et dernière calibration vu la régression de notre coefficient d'efficacité de Nash par rapport à la deuxième période de calibration même si nous constatons une fois de plus une bonne évolution des débits simulés par rapport à ceux observés.

3^{ème} Période de validation 2011- 2019

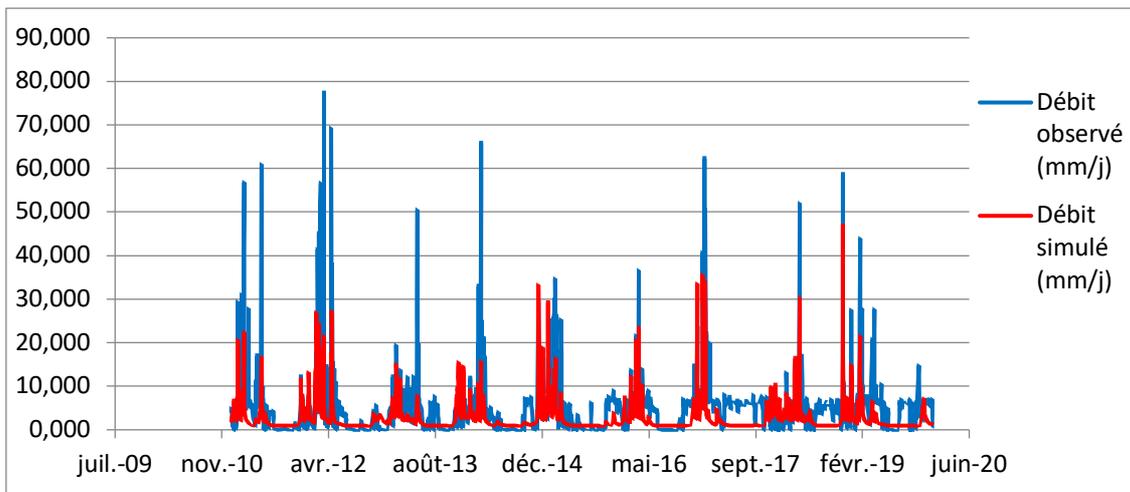


Figure 19 : Débits observés et simulés sur la 3^{ème} Période de validation

Le pourcentage de reproduction de l'évolution des débits simulés par rapport aux débits observés est identique comparativement à la calibration

Après ces jeux de données pour avoir la calibration optimale valide sur toute notre période d'étude nous avons choisi la deuxième période de calibration car étant la meilleure ainsi nous prendrons en compte les résultats de cette dernière notamment celui des débits simulés à l'exutoire du bassin versant parce que plus notre FO est élevée plus les débits simulés reproduisent le même schéma évolutif que ceux observés graphiquement.

2. Résultats obtenus et discussions

Le modèle GR4J est un modèle global ou « non-distribué » c'est à dire qu'il considère un bassin versant comme une entité unique et homogène sans variabilité spatiale. Le choix de BV restreints est alors primordial pour limiter les effets dus à la topographie et à la nature des sols pour ne prendre en compte que les éléments climatiques. Ainsi notre bassin d'une superficie de 93 km² se prêtait parfaitement à la simulation à travers ce modèle empirique.

Suite à l'alimentation de notre modèle GR4J par les précipitations et débits calculés à travers les volumes fournis par l'ANBT ainsi que les évapotranspirations obtenues par la feuille d'Oudin par l'intermédiaire des températures et de la latitude de la zone d'étude afin d'aboutir à des paramètres fiables proportionnels à notre fonction objective pour enfin prétendre à l'acquisition de débits simulés à l'exutoire de notre bassin versant. Les résultats ainsi obtenus nous donnent une bonne vision des rapports entre débits simulés et observés ainsi que l'établissement clair et net d'un lien logique entre les précipitations et les débits obtenus à l'exutoire comme nous le montre la figure 20, avec une allure évolutive identique entre les deux phénomènes.

Sur notre durée d'étude qui, avec notre modèle s'étendait sur 20 années nous avons observé des fluctuations assez importantes des débits à l'exutoire du bassin versant en relation avec la pluviométrie mettant ainsi en exergue l'impact que peut avoir le climat sur l'aspect quantitatif de la disponibilité des ressources en eau sur un bassin versant.

A titre d'exemple année 2007 étant notre pic de pluie sur le BV, elle est également le maximum pour les débits à l'exutoire (voir figure 20).

Nous remarquons également que l'année 2000 a la précipitation la moins élevée sur la zone faisant écho à la sécheresse des années 90 qu'a connu tout le pays, à partir de là les précipitations connaissent des augmentations sur la zone mais également des baisses récurrentes d'années en années jusqu'en 2019 (voir Tableau 11).

La région étant bien arrosée d'Octobre à Avril et plus sèche de Mai à Septembre, nous constatons que malgré les contrastes d'évolution des précipitations pendant ces périodes, le bassin versant est bien mieux fourni en pluies sur la fin de la première décennie que de la seconde par conséquent les débits suivent le même schéma donc le changement climatique à un impact de lacune sur la disponibilité en eau sur le BV de Keddara (voir annexe pour le tableau de la répartition des saisons).

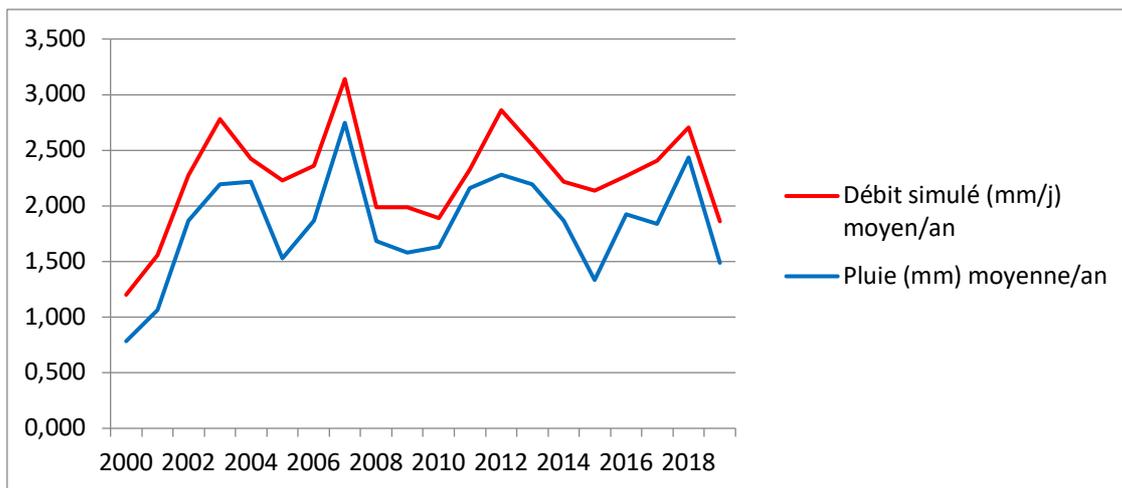


Figure 20 : courbes de l'évolution des débits moyens annuels à l'exutoire et des pluies moyennes annuelles

Tableau 11 : valeurs moyennes annuelles des débits à l'exutoire et des pluies

Date	Débit simulé (mm/j) moyen/an	Pluie (mm) moyenne/an
2000	1,201	0,783
2001	1,554	1,061
2002	2,275	1,869
2003	2,778	2,194
2004	2,422	2,218
2005	2,227	1,526
2006	2,361	1,865
2007	3,140	2,747
2008	1,989	1,681
2009	1,985	1,579
2010	1,890	1,629
2011	2,326	2,160
2012	2,860	2,282
2013	2,548	2,193
2014	2,214	1,870
2015	2,139	1,336
2016	2,270	1,925
2017	2,408	1,839
2018	2,703	2,436
2019	1,862	1,489

Ainsi les précipitations étant un phénomène du climat et ayant un impact sur notre bassin versant, nous pouvons affirmer que son changement ou sa variation touchera également notre BV. Donc un élément au moins du climat a des conséquences sur notre

système hydrologique. Plus les pluies augmentent plus les débits à l'exutoire tendent à croître ; la relation pluie-débit est confirmée. Outre cette relation nous avons également constaté que sur notre période d'étude dans la région considérée les moyennes annuelles des températures tendent à grimper (voir figure 21) ce qui confirme également le réchauffement climatique qui aura pour conséquence des eaux évaporées plus en abondance sur notre bassin versant, réduisant in fine encore sa disponibilité en eau.

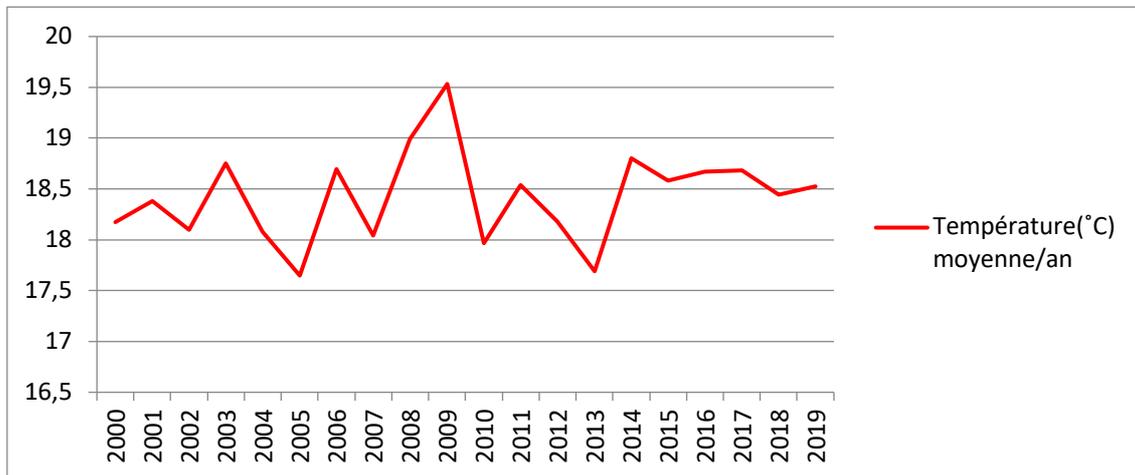


Figure 21 : Évolution annuelle des températures au fil des années sur notre période d'étude

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'atteindre un des objectifs du mémoire à savoir la validation d'un modèle hydrologique sur notre bassin versant ainsi que la simulation des débits à l'exutoire de ce dernier montrant ainsi l'impact quantitatif du changement climatique sur la disponibilité en eau de notre BV de Keddara et cet impact est avéré.

Chapitre 4 : Étude de l'impact du changement climatique sur les sols à travers la télédétection

Introduction

Dans ce chapitre nous toucherons au second volet de notre étude à savoir l'analyse à travers la télédétection du changement climatique sur notre bassin versant. Pour des raisons techniques et de disponibilités des données notre période de référence sera compris dans la limite des données auxquelles nous avons pu accéder et donc différera de celle utilisée dans le modèle hydrologique précédemment mais néanmoins la date de départ à savoir 2013 est incluse dans notre référence de base et la date de d'arrivée est courant cette année 2020.

1. Présentation des outils et logiciel utilisé

1.1. La Télédétection

« La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. »

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs.

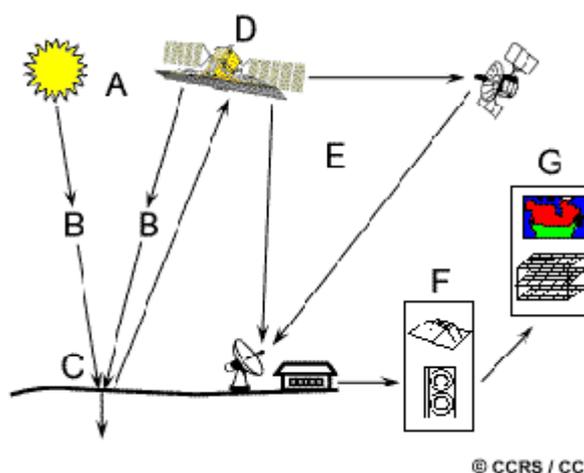


Figure 22 : Explication du processus de télédétection

1. Source d'énergie ou d'illumination (A) - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.
2. Rayonnement et atmosphère (B) - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

3. Interaction avec la cible (C) - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.

5. Transmission, réception et traitement (E) - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

6. Interprétation et analyse (F) - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

7. Application (G) - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier [50].

1.2. Satellite Utilisé : LandSat8

Landsat 8 est un satellite d'observation de la Terre américain lancé le 11 février 2013. Il s'agit du huitième satellite du programme Landsat et le septième à atteindre l'orbite avec succès. Initialement appelé **Landsat Data Continuity Mission (LDCM)**, il s'agit d'une collaboration entre la NASA et le United States Geological Survey (USGS). Le Goddard Space Flight Center de la NASA à Greenbelt, dans le Maryland, assure le développement, l'ingénierie des systèmes de mission et l'acquisition du lanceur, tandis que l'USGS assure le développement des systèmes au sol et poursuit les opérations de la mission.

Il utilise la plate-forme standard LEOStar-3. Orbital Sciences est responsable de la conception et de la fabrication de la plate-forme de Landsat 8, de l'intégration des instruments de la charge utile fournis par le client et des tests complets, y compris ceux relatifs à l'environnement. Les images fournies par ce dernier en service ont été cruciales pour rendre effective notre étude [32].



Figure 23 : Image du LandSat8

1.3. Présentation d'ArcGIS

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles tels que des smartphones et d'ordinateurs de bureau. A travers ce logiciel le traitement de nos informations d'imagerie a pu être possible pour aboutir à un résultat [31].

2. La Méthodologie Utilisée pour notre travail

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images, elle apporte aussi une information nouvelle, différente et spatialement localisée.

En particulier, elle représente la source principale d'information pour les études de la transformation du globe.

Parmi les satellites de télédétection en service, « le nôtre », le Landsat8 de la NASA couvre la Terre tous les 16 jours avec des images de 185 km x 185 km, en 16 bits, comptant 11 bandes spectrales.

L'utilisation des systèmes d'information géographique permet, par le biais de la combinaison des différentes bandes spectrales d'analyser et de cartographier différents indices entre autres :

- L'indice de la végétation (NDVI : normalized difference végétation index).
- L'indice des plans d'eau (NDWI: normalized difference water index)
- L'indice des surfaces bâties (NDBI: normalized difference build up index).
- L'indice des terrains nus (BSI : bare soil index).

Afin de mettre en évidence l'impact du changement climatique sur notre région d'étude, nous allons procéder à l'aide du logiciel ArcGIS Version 10.4 à l'interprétation des différentes images LandSat-8 OLI (Operational Land Imagery) prise le 18/04/2013 et le 07/08/2020.

Cet écart temporel permettra d'une part de mieux apprécier le degré des changements survenus et d'autre part de pouvoir géo localiser les zones ayant subi des dégradations et ce par les processus élaborés de la cartographie numérique.

Ces images ont été projetées en UTM zone 31.

Tableau 12 : Bandes du LandSat8

Band	Landsat 8 Operational Land Imagers (OLI) & Thermal Infrared Sensor (TIRS)		
	Band Name	Wavelength (micrometers)	Resolution (meter)
Band 1	Ultra-Blue	0.435-0.451	30
Band 2	Blue	0.452-0.512	30
Band 3	Green	0.533-0.590	30
Band 4	Red	0.636-0.673	30
Band 5	NIR	0.851-0.879	30
Band 6	SWIR 1	1.566-1.651	30
Band 7	SWIR 2	2.107-2.294	30
Band 8	Panchromatic	0.503-0.676	15
Band 9	Cirrus	1.363-1.384	30
Band 10	TIRS 1	10.60-11.19	100 * (30)
Band 11	TIRS 2	11.50-12.51	100 * (30)

3. Les calculs des différents indices

3.1. Indice NDVI : Végétation

Les noms des différentes bandes figurent sur le tableau joint (bandes LandSat8).

Le NDVI correspond au rapport $(B5-B4) / (B5+B4)$, ces valeurs varient entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondent à l'inexistence totale de la végétation, on considère les valeurs de pixel comprises entre 0.2 et 1 comme étant les plus représentatives du NDVI.

Les surfaces correspondant à cette marge de valeurs sont automatiquement générées par le logiciel (Global Mapper) et après conversion du raster en vecteur (Shape file), on peut déterminer la surface totale de cette couche.

Les caractéristiques des cartes réalisées sont résumées ainsi :

Tableau 13 : Tableau des résultats des surfaces générés par l'indice NDVI (végétation)

NDVI	SURFACE (km ²)	DIFFERENCE	INTERPRETATION
2013	86.78	2.86 KM ²	Déforestation et incendies
2020	83.92		

Ainsi la télédétection nous a permis de mettre en évidence les changements ayants affecté la couverture végétale au niveau du bassin versant de Keddara concrétisées par la déperdition de 286 hectares de forêts.

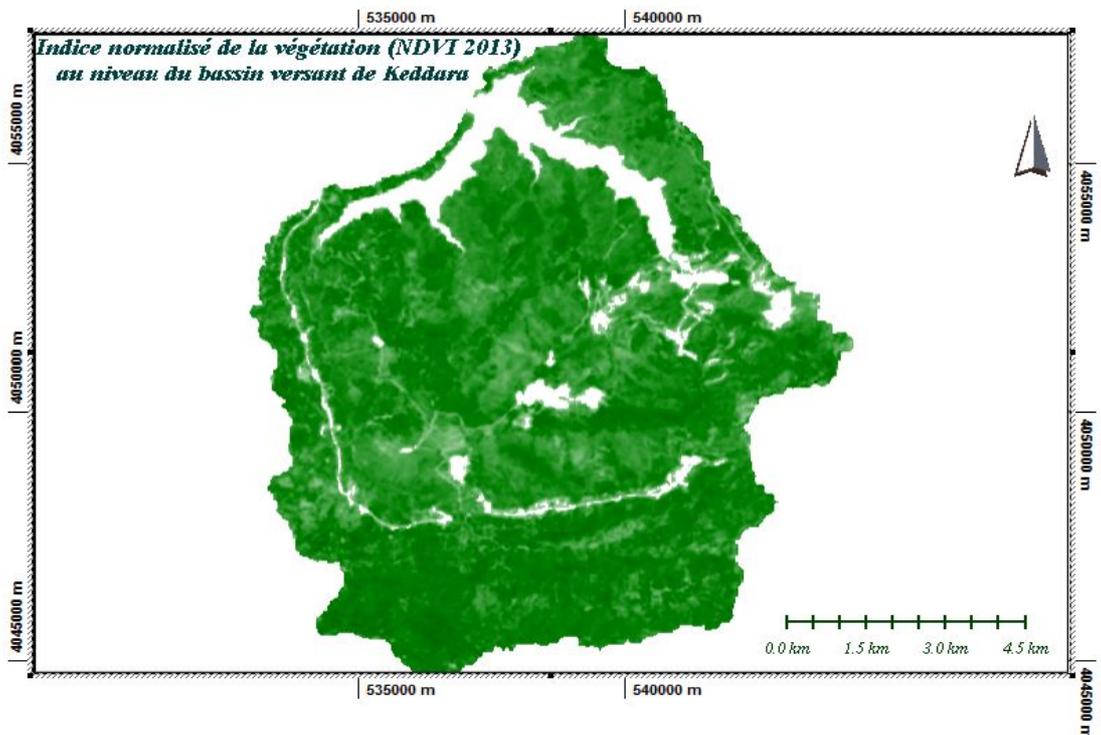


Figure 26 : Indice normalisé de la végétation (NDVI 2013) au niveau du bassin versant de Keddara

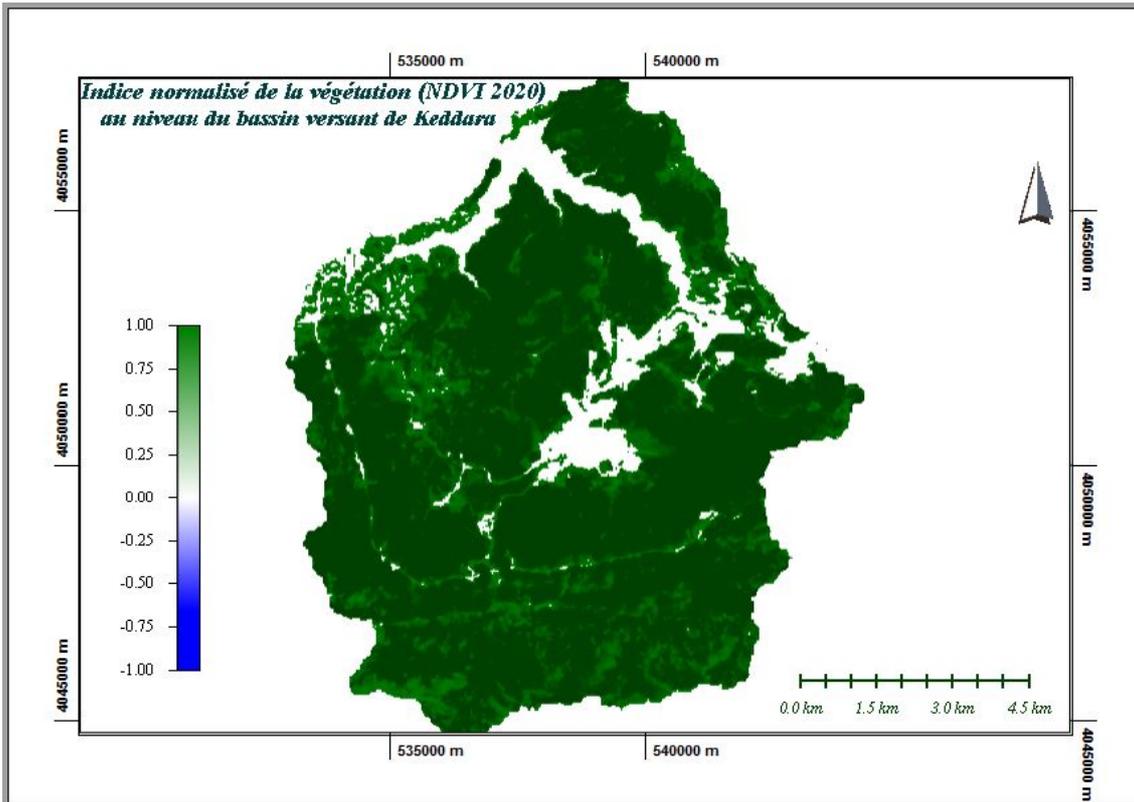


Figure 27 : Indice normalisé de la végétation (NDVI 2020) au niveau du bassin versant de Keddara

Comme on peut le remarquer à travers les figures 26 et 27 les parties blanchâtres sont bien plus épaisses en 2020 qu'en 2013 démontrant ainsi une augmentation des terres avec une couverture végétale moindre voir nulle.

3.2. Indice BSI : Sols nus

Il est défini comme étant le rapport de :

$BSI = (B6+B4)-(B5+B2) / (B6+B4) + (B5+B2)$ (voir tableau joint des bandes spectrales).

L'application de cette formule dans Map algebra calculator du logiciel ArcGIS v 10.4 ou dans le logiciel global Mapper v20 donne la carte de répartition de cet indice à travers le bassin versant.

Il est à signaler que les différentes formules de combinaison des bandes spectrales sont disponibles directement dans l'environnement de Global Mapper contrairement à ArcGIS ou il faut introduire les formules dans Map algebra calculator.

Les valeurs positives les plus élevées correspondent à l'indice du BSI tandis que les valeurs négatives ne correspondent pas à cet indice.

On constate que les valeurs comprises entre 0.13 et 0.30 sont les plus représentatives et serviront par la suite à quantifier les surfaces ayant cette marge de valeur du BSI.

En limitant les valeurs à celles citées dessus, le logiciel Global Mapper ne laisse apparaître que les surfaces raster correspondantes.

De cette surface raster une fois convertie en vecteur (shapefile) on peut extraire la surface totale. (voir image surf bsi).

En appliquant la même formule mais en utilisant cette fois ci les données landsat8 du 07/08/2020, on obtient les valeurs de l'indice des terrains nus tel qu'indiqué sur la carte (2020).

Tableau 14 : Tableau des résultats des surfaces générés par l'indice BSI (Sols nus)

BSI	SURFACE (km ²)	DIFFERENCE	INTERPRETATION
2013	1.389	2.578 KM ²	Surfaces dénudées.
2020	3.967		

La surface en 2013 est de 1.389 km² et celle de 2020 est de 3.967 km².

La différence est de l'ordre de 2.578 km² (258 ha) qui correspond aux nouvelles surfaces dénudées.

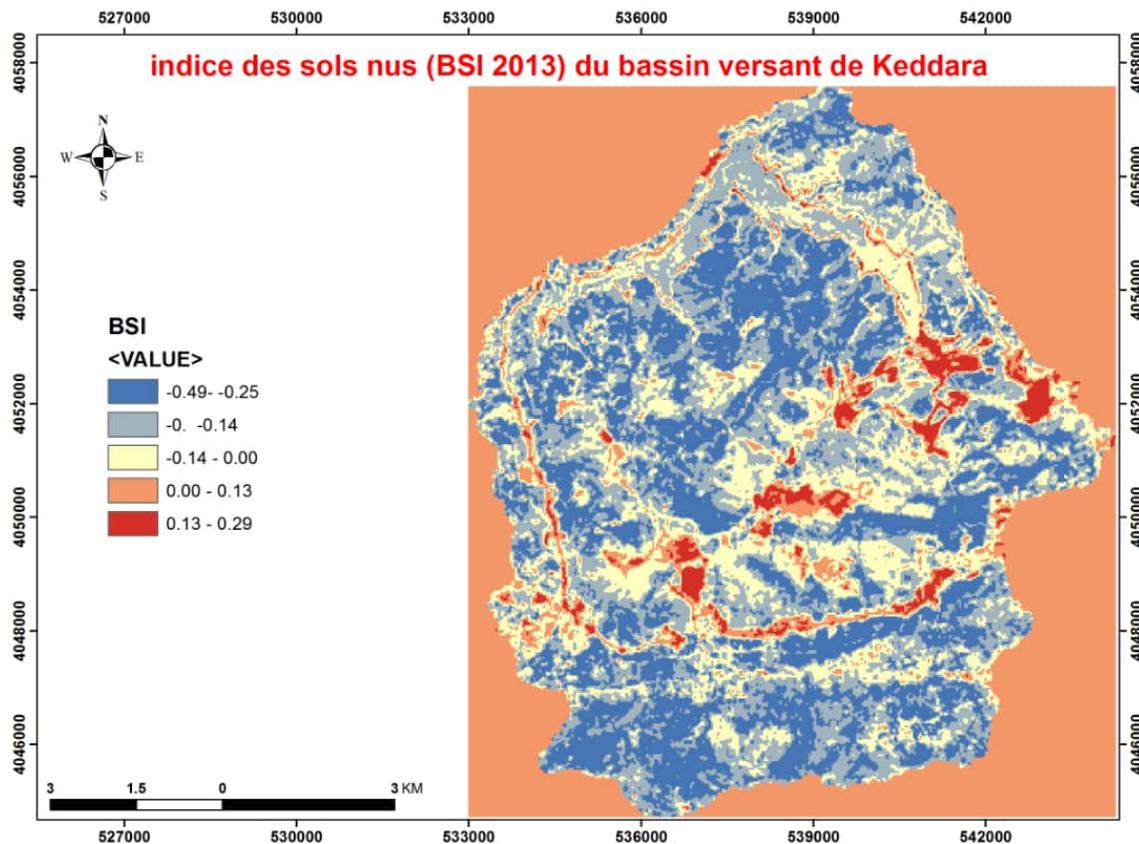


Figure 28 : Indice des sols nus (BSI 2013) du bassin versant de Keddara

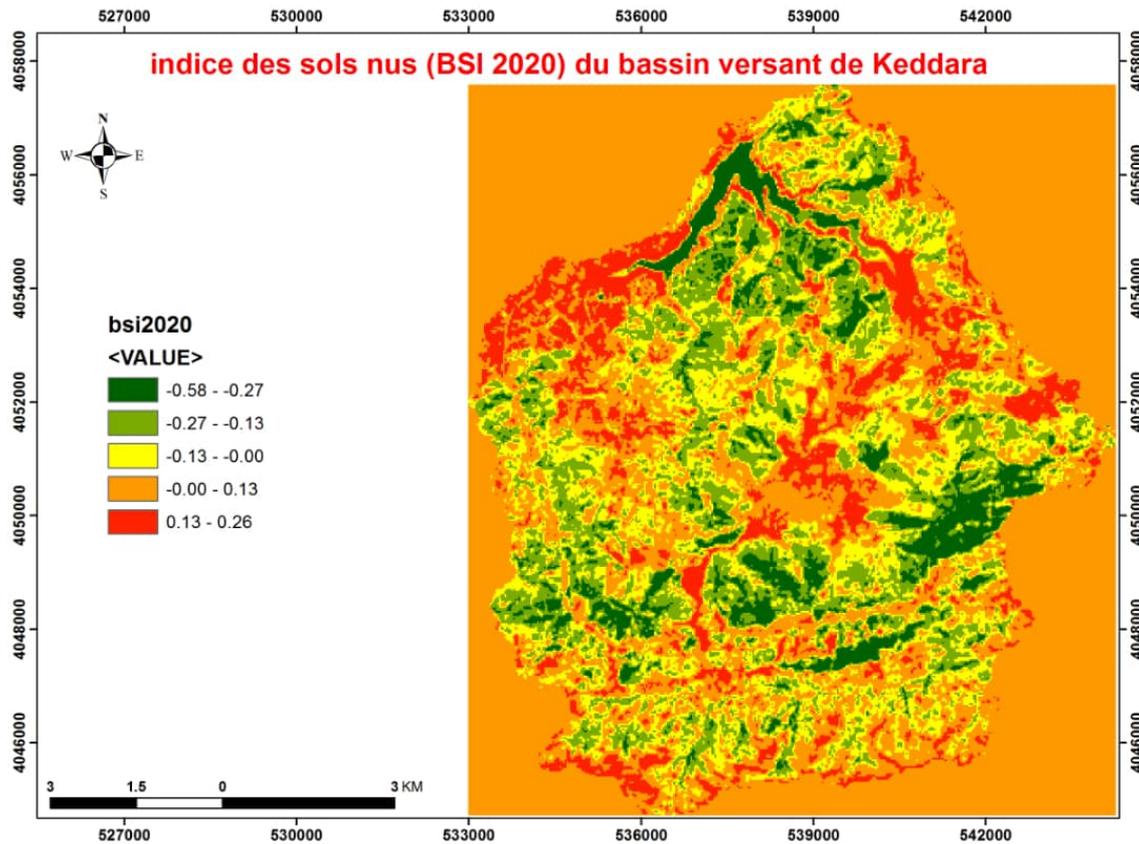


Figure 29 : Indice des sols nus (BSI 2020) du bassin versant de Keddara

Les figures 28 et 29 montrent par les parties rouges s'accroissant en 2020 qu'en 2013 signifiant augmentation des sols nus.

3.3. Indice NDWI : L'eau

Il est défini comme étant le rapport de : $NDWI = (B3 - B5) / (B3 + B5)$.

Ces valeurs sont comprises entre -1 et +1. Par l'application de cette formule, on obtient les cartes des plans d'eau.

Correspondants aux années 2013 et 2020 (voir cartes jointes).

On remarque que le plan d'eau du barrage de keddara est plus important en 2013 car la date de prise de l'image satellite était le 18/04/2013.

Les valeurs qui se rapprochent de 1 sont celles qui correspondent aux plans d'eau (couleur dense) alors que les valeurs négatives n'impliquent en aucun cas l'existence d'un plan d'eau.

Par ailleurs les images satellites landsat8 permettent d'assurer un suivi rigoureux de l'évolution des plans d'eau, des surfaces boisées des terrains nus. ...Etc.

NB/ : les différentes formules d'indices sont appliquées à chaque valeur de pixel constituant le raster.

Les couches sont projetées en UTM (wgs84) ZONE 31.

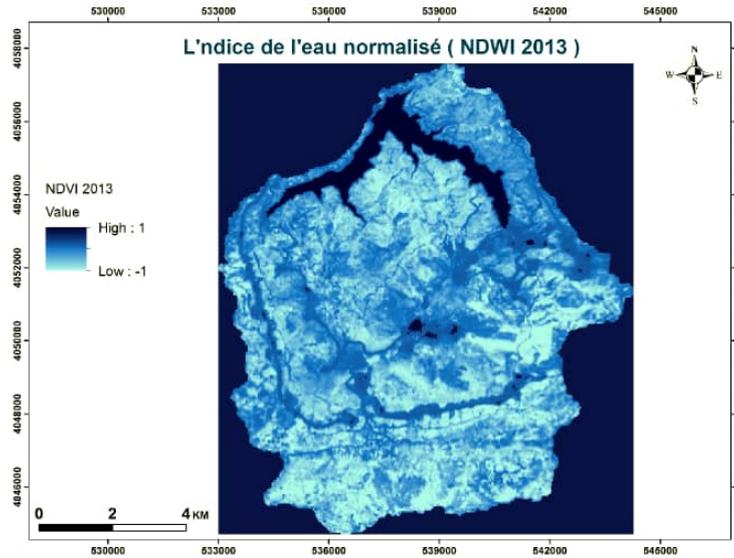


Figure 30 : Indice de l'eau normalisé (NDWI 2013)

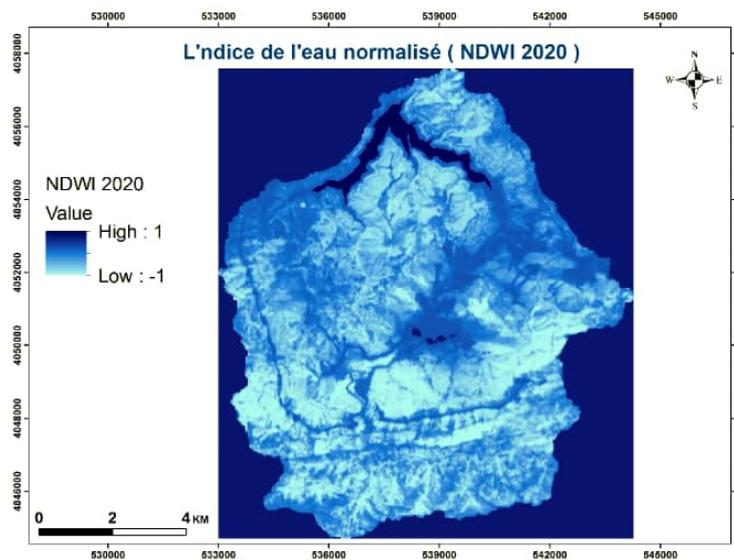


Figure 31 : Indice de l'eau normalisé (NDWI 2020)

Nous remarquons à travers les figures 30 et 31 que les plans d'eau surtout au niveau du barrage, ou la différence est bien plus visible entre les années 2013-2020. Même si cela doit être pris par des pincettes vu la fréquence des crues plus élevées en avril qu'en août mais malgré tout l'impact est vraiment saisissant.

Mais nous nous intéresserons davantage aux deux premiers indices qui nous renseignent sur les sols.

4. Interprétation et discussion

Étant donné la nature du sol du bassin versant de Keddara de 93 km² de surface dominée par une importante couverture végétale, et afin de mettre en relief l'impact du changement climatique sur le bassin versant, nous avons choisi d'étudier essentiellement les deux indices : végétation et sol nu (NDVI et BSI). L'indice NDWI a été utilisé dans le but de comparer les plans d'eau à deux dates différentes (avril 2013 et août 2020) même si les changements (entre les deux périodes) sont très significatifs concernant les plans d'eau nous nous focaliserons pas sur cela.

Les valeurs de l'index NDVI comprises entre zéro et +2 correspondent aux cultures agricoles et aux différents espaces de végétation secondaire (espace vert peu dense et broussailles de faible densité).

Il est à signaler que les valeurs les plus élevées de l'index NDVI correspondent aux couvertures végétales les plus denses.

De la même façon, les valeurs les plus élevées de l'index BSI correspondent aux surfaces les plus dénudées (les surfaces qui correspondent aux valeurs comprises entre 0 et 0.13 ne sont pas parfaitement dénudées).

CONCLUSION

Si on compare les différences des deux valeurs (qui devraient correspondre théoriquement aux surfaces dénudées, NDVI et BSI) à savoir : NDVI : 286 ha et BSI : 257.8 ha, on remarque que la petite différence réside (mise à part aux erreurs dues aux différents phénomènes naturels tel que la diffusion et l'absorption des rayonnements par l'atmosphère) dans la marge des valeurs d'indices pris en compte pour l'un ou l'autre des paramètres ce qui atteste davantage notre travail avec deux indices prouvant à peu près la même conséquence de dégradation des sols au fil des années, phénomène qui peut être facilement imputable au changement climatique sur notre bassin versant d'où l'atteinte d'un autre objectif de notre travail.

Conclusion Générale et Recommandations

En somme, on peut constater que l'impact du changement climatique est indéniable sur notre bassin versant comme nos recherches ont eu à le corroborer et ceux sur le plan quantitatif avec notre modèle hydrologique sur 20 années ainsi que les sols par la dégradation de sa couverture à travers nos images satellitaires issues de la technique de télédétection. En outre de nos périodes de référence sur les deux outils utilisés nous notons également que selon des études menées par le ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et de la ville sur des projections climatiques concernant les bassins versants des barrages utilisés pour l'alimentation en eau d'Alger, dont le barrage situé sur notre bassin versant fait partie et par conséquent notre bassin versant montre qu'à l'horizon 2030 le réchauffement déjà clairement constaté, devrait se poursuivre et serait même associé à une augmentation du nombre de jours de vague de Chaleur en été, concernant les pluies la baisse serait plus nette en hiver et qu'à noter enfin le probable allongement des périodes de sécheresse. À partir de ces constats alarmant la mise en place d'une GIRE efficace est bien souhaitée pour protéger notre bassin versant au maximum, cette GIRE peut être basée autour de certains axes donnés par l'organisation des nations unies pour la sauvegarde des bassins versants, leur adaptation face au changement climatique à savoir :

- S'assurer d'un soutien politique pour une stratégie à l'échelle d'un bassin ;
- Intégrer l'adaptation au changement climatique dans la planification de la gestion des bassins;
- Positionner la planification de la gestion des bassins et l'étude d'impact sur l'environnement/l'évaluation environnementale stratégique comme instruments juridiques/réglementaires/politiques pour la mise en œuvre de l'adaptation au changement climatique ;
- Utiliser l'adaptation fondée sur les écosystèmes comme une alternative rentable aux infrastructures « grises » ;
- Impliquer tous les secteurs et ministères dans la définition des priorités d'adaptation ;
- S'assurer que les politiques d'adaptation considèrent le changement climatique comme l'une des nombreuses pressions exercées sur les ressources en eau ;
- Inclure des mécanismes de flexibilité dans les régimes de répartition de l'eau ;
- Donner un mandat à des organismes de bassin pour faire face au changement climatique ;
- Impliquer les décideurs en amont du processus d'adaptation pour s'assurer que celui-ci est intégré à l'élaboration des politiques ;
- Assurer la participation des acteurs dans toutes les étapes de l'élaboration et de la mise en œuvre de stratégies et de mesures d'adaptation ;
- Identifier les besoins de renforcement des capacités ;
- S'assurer que les investissements dans les systèmes d'information et de partage de données visent non seulement des solutions technologiques, mais aussi le renforcement des compétences et la capacité à intégrer l'information multidisciplinaire ;
- Assurer l'échange des connaissances entre les experts techniques et les décideurs ;
- Lancer un plan de communication initial au début du projet et l'actualiser, l'ajuster et le réviser progressivement.

En outre de ces points nous recommandons de notre côté :

- Préservation de la quantité des eaux pour une gestion optimale vu qu'elles sont vues et prévues à la baisse ;
- La pratique de reforestation sur le bassin versant qui a perdu une grande partie de sa couverture végétale au fil des années, ce qui contribuera indéniablement à une solution de lutte contre le réchauffement climatique sur la zone ;
- Le suivi des évolutions de la situation sur le bassin versant après ces efforts à travers des images Satellite comme dans notre travail, à moyen ou à long terme.

« L'eau c'est la vie et sa préservation et un devoir absolu »

Références Bibliographiques

Mémoire en partie inspiré de la thèse de doctorat d'Etienne BRULEBOIS, Impacts du changement climatique sur la disponibilité ressource en eau en Bourgogne : aspects quantitatifs et qualitatifs, Université de Bourgogne.

1. Agence nationale de Développement et de l'investissement (ANDI), Boumerdes, 2015.
2. ANBT, fiche technique barrage de Keddara, 2018.
3. Andreassian, V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *J. Hydrol.* 291, 1–27.
4. Aperçue générale des bassins versants des trois barrages béni Amrane, keddara et Hamiz.
5. Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., and Palutikof, J.P. (2008). Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève (GIEC).
6. Boé, J. (2007). Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. phd. Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
7. Boé, J., and Habets, F. (2014). Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrol Earth Syst Sci* 18, 691–708.
8. Boé, J., Terray, L., Martin, E., and Habets, F. (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resour. Res.* 45, n/a-n/a.
9. Boualem Remini, La problématique de l'eau en Algérie du Nord, article-ResearchGate,2010.
10. Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N., and Smith, V.H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol. Appl.* 8, 559–568.
11. Carvalho, L., Miller, C., Spears, B.M., Gunn, I.D.M., Bennion, H., Kirika, A., and May, L. (2012). Water quality of Loch Leven: responses to enrichment, restoration and climate change. *Hydrobiologia* 681, 35–47.
12. Chow, V.T. (1965). Handbook of applied hydrology. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Bull.* 10, 82–83.
13. Cosandey, C., and Robinson, M. (2015). Hydrologie continentale.
14. DK News,10 000 alevinsensemencés au barrage Keddara Bouzezga, article-dk news, 2015.
15. Döll, P., Fiedler, K., and Zhang, J. (2009). Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. *Hydrol Earth Syst Sci* 13, 2413–2432.
16. Elmi, A.A., Madramootoo, C., Egeh, M., Liu, A., and Hamel, C. (2002). Environmental and agronomic implications of water table and nitrogen fertilization management. *J. Environ. Qual.* 31, 1858–1867.
17. Etienne BRULEBOIS, Impacts du changement climatique sur la disponibilité ressource en eau en Bourgogne: aspects quantitatifs et qualitatifs, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2016 16-105
18. Evans, C.D., Monteith, D.T., and Cooper, D.M. (2005). Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts. *Environ. Pollut.* 137, 55–71.
19. Farah Abdelhafid Karim, Changement climatique dans l'Est algérien, Mémoire de Magistère, Université Constantine 1, 2013-2014.

20. Figura, S., Livingstone, D.M., Hoehn, E., and Kipfer, R. (2011). Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation: Groundwater temperature regime shift. *Geophys. Res. Lett.* 38.
21. Gerten, D., and Gedney, N. (2008). Report on uncertainty in water budgets of the 20th century due to the representation of the impact of CO₂ enrichment. Technical report n°3, WATCH deliverable 5.2.1 (PIK, Met Office).
22. Giuntoli, I., Renard, B., Vidal, J.-P., and Bard, A. (2013). Low flows in France and their relationship to large- scale climate indices. *J. Hydrol.* 482, 105–118.
23. Graf, W.L. (2006). Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology* 79, 336–360.
24. Grieve, I.C., and Marsden, R.L. (2001). Effects of forest cover and topographic factors on TOC and associated metals at various scales in western Scotland. *Sci. Total Environ.* 265, 143–151.
25. Gril, J.-J., and Dorioz, J.-M. (2004). Des bassins versants de recherche aux bassins opérationnels : quels bassins versants pour connaître et maîtriser les pollutions diffuses agricoles ? *Sciences Eaux & Territoires* 39, 3–16.
26. Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharne, A., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Page, C., Sauquet, E., Terray, L., et al. (2011). Programme PIREN-SEINE Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine. Résultats du projet GICC-RExHySS #13 (Agence de l’eau Seine-Normandie).
27. Hamenni N et al, Etude des ressources en eau dans le bassin versant de la Soummam, article-ASJP.
28. Harding, R., Best, M., Blyth, E., Hagemann, S., Kabat, P., Tallaksen, L.M., Warnaars, T., Wiberg, D., Weedon, G.P., Lanen, H. van, et al. (2011). WATCH: Current Knowledge of the Terrestrial Global Water Cycle. *J. Hydrometeorol.* 12, 1149–1156.
29. Harper, K. (2008). *Weather by the numbers: the genesis of modern meteorology* (Cambridge, Mass: MIT Press).
30. Hejzlar, J., Dubrovský, M., Buchtele, J., and Růžička, M. (2003). The apparent and potential effects of climate change on the inferred concentration of dissolved organic matter in a temperate stream (the Malše River, South Bohemia). *Sci. Total Environ.* 310, 143–152.
31. <https://resources.arcgis.com/fr/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
32. https://fr.wikipedia.org/wiki/Landsat_8#cite_note-8
33. Huddleston, N., and National Research Council (U.S.) (2012). *Climate change: evidence, impacts, and choices: answers to common questions about the science of climate change.*
34. Klemes, V. (1986a). Dilettantism in hydrology: Transition or destiny? *Water Resour. Res.* 22, 177S–188S.
35. Klemes, V. (1986b). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci. J.* 31, 13–24.
36. Le Moine, N. (2008). Le bassin versant de surface vue par le souterrain : une voie d’amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? CEMAGREF d’Antony.
37. Legates, D.R., and McCabe, G.J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35, 233–241.

38. Linglois-Dussert, N. (2003). Suivi interannuel et modélisation de la composition chimique des eaux d'écoulement en relation avec les occupations du sol : cas du bassin versant du Cousin (Morvan) (Dijon).
39. Meehl, G.A., Washington, W.M., Ammann, C.M., Arblaster, J.M., Wigley, T.M.L., and Tebaldi, C. (2004). Combinations of Natural and Anthropogenic Forcings in Twentieth-Century Climate. *J. Clim.* 17, 3721–3727.
40. Mohamed Meddi et al, Evolution récente des conditions climatiques et écoulements sur le bassin versant de Macta (Nord-ouest de L'Algérie), article-openEdition, 2009
41. Musy, A. (2004). Hydrologie (Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes).
42. Olivier Petitjean, Les conséquences du changement climatique sur les ressources en eau, article-partage des eaux, 2008
43. Oudin, L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat. Science de l'eau. Engref.
44. Pekárová, P., and Pekár, J. (1996). The impact of land use on stream water quality in Slovakia. *J. Hydrol.* 180, 333–350.
45. Pekárová, P., Miklánek, P., and Pekár, J. (2003). Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th–20th centuries. *J. Hydrol.* 274, 62–79.
46. Perrin, C., Gørgen, C., Sauquet, E., Beersma, J., Boudhraâ, H., Buiteveld, H., Carambia, M., Dupeyrat, A., Hendrickx, F., Keizer, O. de, et al. (2010). The RheinBlick2050 and Imagine2030 projects: a perspective on the hydrological impacts of climate change in two river basins in Europe. (Koblenz, Germany), pp. 49–61.
47. Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279, 275–289.
48. Pociask-Karteczka, J. (2006). River hydrology and the North Atlantic Oscillation: A general review. *Ambio* 35, 312–314.
49. Refsgaard, J.C., and Storm, B. (1995). MIKE SHE. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, (CO, USA: Singh, V.P. (Ed.)), pp. 806–846.
50. Ressources naturelles Natural Resources Canada : Notions fondamentales de télédétection, pp 5 et 6.
51. Roche, P.A., Miquel, J., and Gaume, E. (2012). Hydrologie quantitative Processus, modèles et aide à la décision (Paris : New York : Springer).
52. Sauquet, E., Dupeyrat, Hendrickx, and Perrin (2010). IMAGINE 2030, climat et aménagements de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030 ?
53. Schilling, K.E., Chan, K.-S., Liu, H., and Zhang, Y.-K. (2010). Quantifying the effect of land use land cover change on increasing discharge in the Upper Mississippi River. *J. Hydrol.* 387, 343–345.
54. Seiller, G., Anctil, F., and Perrin, C. (2012). Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1171–1189.
55. Shorthouse, C.A., and Arnell, N.W. (1997). Spatial and temporal variability in European river flows and the North Atlantic oscillation. In *IAHS-AISH Publication*, (International Association of Hydrological Sciences), pp. 77–85.
56. Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P.M. (2014). IPCC, 2013: Climate

- Change 2013: The Physical Science Basis (Cambridge: Cambridge University Press).
57. Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S., Allen, M.R., Ingram, W.J., and Mitchell, J.F.B. (2001). Attribution of twentieth century temperature change to natural and anthropogenic causes. *Clim. Dyn.* 17, 1–21.
 58. Thies, H., Nickus, U., Mair, V., Tessadri, R., Tait, D., Thaler, B., and Psenner, R. (2007). Unexpected Response of High Alpine Lake Waters to Climate Warming. *Environ. Sci. Technol.* 41, 7424–7429.
 59. Tissot, A.-C., Amiotte-Suchet, P., Brulebois, E., Castel, T., Ponnou-delaffon, V., Richard, Y., Brayer, J.-M., Ubertosi, M., Martin, E., Petit, S., et al. (2016). Rapport final du projet HYCCARE Bourgogne (Programme GICC - Exercice 2012. Ministère de l'Environnement, de l'énergie et de la mer).
 60. Twine, T.E., Kucharik, C.J., and Foley, J.A. (2004). Effects of Land Cover Change on the Energy and Water Balance of the Mississippi River Basin. *J. Hydrometeorol.* 5, 640–655.
 61. Vörösmarty, C.J., and Moore, B. (1991). Modeling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: An example using the Zambezi River. *Surv. Geophys.* 12, 271–311.
 62. Wang, X., Lu, Y., Han, J., He, G., and Wang, T. (2007). Identification of anthropogenic influences on water quality of rivers in Taihu watershed. *J. Environ. Sci. China* 19, 475–481.
 63. Webb, B.W., Clack, P.D., and Walling, D.E. (2003). Water-air temperature relationships in a Devon river system and the role of flow. *Hydrol. Process.* 17, 3069–3084.
 64. Zhang, Y.-K., and Schilling, K.E. (2006). Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940 s: Effect of land use change. *J. Hydrol.* 324, 412–422.

ANNEXES

Tableau 15 : Évolution de la pluviométrie pour la saison pluvieuse

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Moyenne
2000	1,5	2	1,4	0,3	0,1	0,4	0,7	0,91
2001	0	1,4	2	4,3	2,5	0,3	1	2,87
2002	0,7	8,1	5,5	2,9	0,5	1,5	1,2	2,91
2003	1,2	1,9	3,5	7,1	4,7	1,5	5,6	3,64
2004	0	3,9	5,8	3,8	0,9	3	2,1	2,78
2005	1,9	2,8	3	2,9	3,7	1,6	1	2,41
2006	0,6	1,1	6,5	3,9	5,4	1,2	0,2	2,7
2007	3,9	9,6	3,2	0,2	2	6	4,8	4,24
2008	1,3	5	3,4	0,9	0,5	2,4	1,8	2,18
2009	1	2,1	2,2	5,5	0,7	1,4	2,8	2,24
2010	2,17	4,11	2,38	2,19	1,6	3,18	1,29	2,41
2011	1,45	4,92	2,35	2,19	4,81	1,82	2,12	2,8
2012	3,12	2,35	1,18	2,13	8,18	2,98	6,12	3,72
2013	0,38	6,63	3,07	2,95	4,04	2,3	2,54	3,13
2014	1,24	1,09	7,68	2,09	1,79	4,59	0,1	2,65
2015	2,56	2,18	0	4	5,06	1,86	0	2,23
2016	0,27	2,49	5,43	2,43	3,6	5,7	2,01	3,13
2017	0,86	3,9	4,45	7,66	0,46	1,72	1,13	2,88
2018	2,6	6,97	1,74	0,91	3,43	4,68	4,14	3,49
2019	1,58	4,28	0,19	4,57	0,75	1,93	1,87	2,16

Tableau 16 : Évolution de la pluviométrie pour la saison sèche

	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Moyenne
2000	2,6	0	0	0	0,3	0,58
2001	0,9	0	0	0	0,5	0,28
2002	0,5	0	0,1	1	0,3	0,38
2003	0,7	0	0	0	0,5	0,24
2004	6,2	0,2	0,1	0	0,5	1,4
2005	0,1	0	0	0,1	1,5	0,34
2006	3	0,1	0	0	0,6	0,74
2007	0,7	0,2	0	0,2	2,2	0,66
2008	3,03	0,2	0,2	0	1,6	1
2009	14,9	0,1	0	0,1	2,5	3,52
2010	0,82	0,28	0	0,65	0,88	0,52
2011	4,56	1,63	0,02	0,03	0,29	1,3
2012	0,65	0	0	0,8	0,25	0,34
2013	3,69	0,13	0	0,25	0,52	0,91
2014	0,17	1,99	0	0	1,64	0,76
2015	0,13	0,3	0	0	0,20	0,12
2016	1,13	0,05	0	0	0	0,23
2017	0,05	0,12	0	0,012	1,48	0,33
2018	2,29	1,44	0	0	1,23	0,99
2019	0,79	0,14	0	0,19	1,5	0,5