

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

Département d' Hydraulique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER : ACADEMIQUE

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ressources Hydriques

C : ...

R : ...

Thème :

**Comparaison des prévisions du changement climatique
d'une région subhumide (cas de Guelma) et d'une région aride
(cas de Ouargla)**

Présenté par :

❖ **ATTAB Meriem**

Soutenu devant le jury composé de :

BOUTOUTAOU Djamel	Pr	UKM Ouargla	Président
EL FERGOUGUI Meryem Marie	MCA	UKM Ouargla	Examinatrice
OULHACI Dalila	MCA	UKM Ouargla	Encadreur
KOUADRI Saber	Dr	UKM Ouargla	Co-encadreur

Année Universitaire : 2021 /2022

Résumé :

Les changements climatiques ont depuis longtemps cessé d'être une curiosité scientifique. Ils constituent la question environnementale majeure qui domine notre époque et le défi majeur auquel doivent répondre les organismes de contrôle environnementaux.

Dans le cadre de l'élaboration de ce travail concernant l'étude et la comparaison des changements climatiques des régions de (Ouargla) et (Guelma).

On a procédé, après avoir regroupé les données climatiques (température, précipitations et humidité), au calcul des indicateurs chaleur et aridité de la région de Ouargla et l'indice d'aridité de la région de Guelma pour une période approximative de trente (30) ans ; (Ouargla: de 1991 à 2021) et (Guelma: de 1981 à 2011), et faisons des prévisions par l'utilisation de logiciel « Weka » de deux ans prochaines pour chaque région, on a conclu que le changement climatique présent dans les deux régions Ouargla et Guelma, mais à rythmes variables.

On a utilisé le modèle "Comité aléatoire" pour les deux zones. On a obtenu un coefficient de détermination $R^2:0.9998$ et $MSE=0.0043$ pour les prévisions de l'indice d'aridité, et un coefficient de détermination $R^2:0.9999$ et $MSE=0.0043$ pour les prévisions de l'indice de chaleur de Ouargla. Et un coefficient de détermination $R^2:0.9999$ et $MSE=0.1882$ pour les prévisions de l'indice d'aridité de la région de Guelma. On conclue que sont ces résultats satisfaisants.

Mots clés : climat, changement climatique, Ouargla, Guelma, « Weka », modélisation, eau.

ملخص:

لقد توقف تغير المناخ منذ فترة طويلة عن كونه فضولا علميا. إنها القضية البيئية الرئيسية التي تهيمن على عصرنا والتحدي الرئيسي الذي يجب أن تستجيب له هيئات الرقابة البيئية.

كجزء من تطوير هذا العمل المتعلق بدراسة ومقارنة التغيرات المناخية في منطقتي (ورقلة) و (قالمة).

شرعنا، بعد تجميع البيانات المناخية (درجة الحرارة وهطول الأمطار والرطوبة)، في حساب مؤشرات الحرارة

والجفاف في منطقة ورقلة ومؤشر الجفاف في منطقة قالمة لفترة تقريبية تبلغ ثلاثين (30) عاما؛ (ورقلة: من عام 1991 إلى عام 2021) و (قالمة: من عام 1981 إلى عام 2011)، ووضع تنبؤات باستخدام برنامج "ويكا" للسنتين المقبلتين لكل منطقة، استنتج أن تغير المناخ الحالي في كلا المنطقتين كان له تأثير كبير على المناخ في كل من مناطق ورقلة وقالمة، ولكن بمعدلات متغيرة.

تم استخدام نموذج يسمى "الجنة عشوائية" للمنطقتين. تم الحصول على نتائج جيدة: معامل التحديد

$MSE=0.0043$ و $R^2=0.9998$ لتوقعات مؤشر الجفاف، ومعامل التحديد $MSE=0.0043$ و $R^2=0.9999$ لتوقعات مؤشر

الحرارة لمنطقة ورقلة. بينما معامل التحديد $MSE=0.1882$ و $R^2=0.9999$ لتوقعات مؤشر الجفاف في منطقة قالمة. ومنه نستنتج ان النتائج جيدة.

كلمات مفتاحية: مناخ، تغير مناخي، الجزائر، ورقلة، قالمة، ويكا، تنبؤات، ماء

Remerciements

Je remercie **Allah**, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais et donné la santé, la persévérance ainsi que tout ce dont j'ai afin de réaliser le travail requis et rédiger ce mémoire.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont à mon encadreur **Dr. OULHACI Dalila** pour avoir proposé le thème, apporté son savoir et son expérience aussi bien en climatologie et qu'en de nombreux autres domaines. Enfin je la remercie pour la confiance qu'elle m'a accordée, elle m'a été d'un grand soutien sans lequel il m'aurait été difficile d'achever ce travail.

Je tiens à remercier également mon Co-encadreur **Dr KOUADRI Saber** pour ses conseils judicieux, ses orientations, son encouragement et pour toutes ses précieuses informations fournies tout au long de ce travail et saluer sa disponibilité durant cette période difficile. Grâce à lui j'ai énormément appris dans le domaine de la modélisation pour réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer ma profondeur gratitude et sincère reconnaissance au Dr. Ali Mokhtar Professeur Adjoint relevant de l'Université du Caire (Égypte) et Université Northwest A et F(Chine). pour son apport et support dans la compréhension du traitement des images satellitaires.

Je n'oublie pas non plus M. KHAWADJA Ibrahim ingénieur du bureau d'étude de l'ADE de Ouargla et Mme.BOUZOUADA Wafaa. Grâce à leur aide et orientations, j'ai pu effectuer mon stage dans de bonnes conditions

Pr.BOUTOUTAOU Djamel m'a fait l'immense honneur d'accepter de présider le jury et d'évaluer ce travail. C'est avec un grand plaisir que je lui adresse mes sincères remerciements.

Il m'est agréable d'adresser mes vifs remerciements et exprimer ma profonde gratitude au **Dr. EL Fergougui Meryem Marie** qui m'a honorée en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par ses suggestions avisées. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes sincères remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de génie civil et hydraulique de l'université de Ouargla pour la formation qu'ils m'ont assurée au long de mon cursus universitaire.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail comme preuve de respect et de gratitude à

Ma mère qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que dieu la garde

Mon héros, mon cher père qui m'a aidée à devenir ce que je suis aujourd'hui,

*A mon mari **Zakaria**. J'aimerais qu'il trouve dans ce travail l'expression de mes sentiments de gratitude les plus sincères, sans son aide et sa patience ce travail n'aurait pas pu s'accomplir*

*A mes chères sœurs **Hala, Halima Essaadia** et la **petite princesse Zina***

*A mes chères frères **Imad Eddine, Abdessallam, Ismail, Med Aymen** et **Zoubir***

*A toute la famille **ATTAB** ;*

*A toute la famille **Kerri** ;*

*A ma belle-famille (**Bouزيد**) ;*

Tous mes professeurs

A tous mes amies ;

A toute ma promotion ;

Qu'Allah les garde et protège tout

Meriem

Liste des tableaux

Titre	N° page
Tableau I.1: Coefficient de c1 à c9	15
Tableau III.1: Résultats du modèle en fonction des critères de performance et coefficient de détermination dans la phase d'étalonnage et validation	47
Tableau III.2: Résultats du modèle en fonction des critères de performance et coefficient de détermination dans la phase d'étalonnage et validation	50
Tableau III.3: Résultats du modèle en fonction des critères de performance et coefficient de détermination dans la phase d'étalonnage et validation	53
Tableau III.4: Résultats de critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire	57
Tableau III.5: Résultats de critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire	59
Tableau III.6: Résultats de critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire (Indice d'aridité de Guelma)	60

Liste des figures

Titre	N°page
Chapitre I	
Figure I.1: Carte simplifiée des différents climats définissant chaque partie de la planète Terre [Wikipédia]	7
Figure I.2: Composantes du système climatique	9
Figure I.3: Comparaison entre les variations de températures en Afrique et la tendance de réchauffement mondial (http://www.grida.no/publications).[1]	17
Figure I.4: processus de l'effet de serre	18
Figure I.5: Evolution de concentration des GES dans l'atmosphère [source : GIEC]	20
Figure I.6: Evolution de la concentration de CO2 en Algérie (Tabet,2008)	21
Chapitre II	
Figure II.1: localisation de la Wilaya de Ouargla	26
Figure II.2: Variation annuelle des précipitations sur 30ans (1991-2020) (Source : Infoclimat 1991 à 2020)	27
Figure II.3: Évolution des températures annuelles sur 30ans (1991-2020) (Source : Infoclimat 1991 à 2020)	28
Figure II.4: Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Ouargla établi pour la période 1991-2021	28
Figure II.5: situation géographique de la Wilaya de Guelma	29
Figure II.6: Variation annuelle des précipitations sur 30ans (1981-2010) (Source : Infoclimat 1981 à 2010)	31
Figure II.7: Évolution des températures annuelles sur 30ans (1981-2010) (Source : Info-climat 1981 à 2010)	31
Figure II.8: Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Guelma établi pour la période 1981-2010	32
Figure II.9: Situation géographique des zones d'études	32
Figure II.10: Thermomètre	34
Figure II.11: Hygromètre	34
Figure II.12: Pluviomètre	35
Figure II.13: Anémomètre	35
Figure II.14: girouette	35
Figure II.15: interface de logiciel de « Weka »	40

Figure II.16: paramètres de fonctionnement	41
Figure II.17: méthodologie de travail	45
Chapitre III	
Figure III.1: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	47
Figure III.2: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	48
Figure III.3: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	48
Figure III.4: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	49
Figure III.5: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	49
Figure III.6: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	50
Figure III.7: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	51
Figure III.8: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	51
Figure III.9: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	52
Figure III.10: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage	52
Figure III.11: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage	53
Figure III.12: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage	54
Figure III.13: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage	54
Figure III.14: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage	55
Figure III.15: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage	55
Figure III.16: fenêtre de propriétés	56
Figure III.17: Critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire (Indice d'aridité de Ouargla)	57
Figure III.18: Critères de performance en fonction de seed 2 et seed 4 du modèle Comité aléatoire (Indice d'aridité de Ouargla)	58
Figure III.19: Séries chronologiques de l'indice d'aridité de Ouargla	58
Figure III.20: Critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire (Indice de chaleur de Ouargla)	59
Figure III.21: Séries chronologiques de l'indice de chaleur de Ouargla	59
Figure III.22: Critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire (Indice d'aridité de Guelma)	60
Figure III.23: Séries chronologiques de l'indice d'aridité de Guelma	61

Table des matières

<i>Résumé</i> :	<i>I</i>
<i>Remerciements</i>	<i>II</i>
<i>Dédicace</i> :	<i>III</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>IV</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>V</i>
Table des matières	VII
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I : Etude Bibliographique</i>	<i>5</i>
I. Climat	6
1.1 Définition du climat	6
1.2 Caractérisation du climat	6
1.3 Variabilité climatique	7
1.4 Climatologie	7
1.5 Météorologie	8
1.6 Système climatique	8
1.7 Indices climatiques	9
1.7.1. Indices de Bagnouls et Gaussen (1953)	9
1.7.2. Indice de sécheresse estivale et quotient d'Emberger	11
1.7.3 Indice de continentalité thermique :	13
1.7.4 Indice d'aridité de De Martonne (1926)	13
1.7.5 Indice de chaleur George :	14
II. Changement climatique	16
2.1 Changement climatique et Variabilité climatique	16
2.2 Changements climatiques observés	16
2.3 Causes de l'évolution climatique	18
2.3.1 Causes naturelles	18
2.3.2 Causes anthropiques	19
2.4 Vulnérabilité du secteur de l'eau au changement climatique en Algérie	21

2.5 Impacts du changement climatique	21
2.5.1 Impacts du changement climatique sur les écoulements de surface	22
2.5.2 Impacts du changement climatique sur les eaux de barrages.....	22
2.5.3 Impacts du changement climatique sur les nappes phréatiques	22
2.5.4 Impact du changement climatique sur le cycle hydrologique :	23
2.5.5 Impacts du changement climatique sur l'irrigation	23
2.5.6 Impacts du changement climatique sur l'assainissement.....	23
2.5.7 Impact de changement climatique dans le futur	24
Chapitre II : Matériels et Méthodes.....	25
1. Présentation des zones d'études :	26
1.1. Région de Ouargla :	26
1.1.1 Situation géographique :	26
1.1.2 Relief	26
1.1.3 Ressources hydriques	27
1.1.4 Climat :	27
1.1.5. Synthèse climatique :	28
1.2 Région de Guelma :	29
2.1. Situation géographique	29
2.2. Relief	29
2.3. Potentialités hydrauliques :.....	30
2.4. Le climat de Guelma :	30
2.4.1. Précipitations :	30
2.4.2. Température :	31
2.5. Synthèse climatique :	32
2. Stations météorologiques :.....	33
2.1. Station Hassi Ben Abdellah :	33
2.2. Station de Ouargla :	33
2.3. Station de Guelma :	33
3. Instruments de mesures :.....	33
3.1. Température :	33

3.2. Humidité :	34
3.3. Précipitation :	35
3.4. Vent :	35
4. Collecte des données :	36
4.1. Pour la région de Ouargla,	36
4.2. Pour la région de Guelma,	37
5. Comblement des lacunes :	37
5.1. Comblement des lacunes par corrélation linéaire :	37
6. Modélisation :	38
6.1 Intelligence artificielle :	38
6.2 Apprentissage automatique	38
6.2.1 Types d'apprentissage automatique :	39
6.3 Modélisation des séries chronologiques :	39
6.4 Matériel informatique utilisé :	40
6.4.1 Présentation du logiciel Arc GIS 10 :	40
6.4.2 Présentation du logiciel WEKA :	40
6.5 Critères de performance des modèles :	41
6.5.1 Racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM)	42
6.5.2 Erreur moyenne absolue (EMA)	42
6.5.3 Erreur absolue relative (EAR)	42
6.5.4 Racine d'erreur quadratique relative (REQR)	42
6.5.5 Erreur quadratique moyenne :	42
6.5.6 Coefficient de corrélation :	43
6.5.7 Coefficient de détermination :	43
6.6 Modèles d'intelligence artificielle :	43
6.7.1 Modèle d'arbre aléatoire:(RT)	43
6.7.2 Modèle de forêt aléatoire : (RF)	44
6.7.3 Modèle de Bagging (BG) :	44
6.7.4 Modèle Régression Additive (AR) :	44

6.7.5 Modèle comité aléatoire (RC) :	44
6.8 Méthodologie de travail:	44
<i>Chapitre III : Résultats et discussion</i>	47
<i>1. Résultats en fonction des paramètres initiaux</i> :.....	48
1.1. Région de Ouargla :	48
1.1.1. Indice d'aridité :	48
1.1.2. Indice de chaleur :	50
1.2 Région de Guelma :.....	53
1.2.1 Indice d'aridité :	53
<i>2. Optimisation du meilleur modèle pour les deux zones et les deux indices climatiques</i> :..	57
2.1 Région de Ouargla :.....	58
2.1.1 Indice d'aridité :	58
2.1.2 Indice de chaleur :.....	59
2.2 Zone de Guelma :.....	61
2.2.1 Indice d'aridité :.....	61
<i>Conclusion Générale</i>	63
<i>Recommandations</i> :.....	66
<i>Références bibliographiques</i>	67

Introduction générale

Introduction Générale

Au début des années 1970, une série d'événements a fait passer les recherches sur le climat au premier plan de l'actualité en effet, la communauté scientifique internationale a commencé à s'interroger sur les éventuelles conséquences possibles de la modification de la composition chimique de l'atmosphère. Ensuite, Les experts scientifiques ont déterminé un phénomène qui ne cesse de prendre de l'ampleur en raison du risque qu'il présente pour l'humanité. Ce phénomène est celui du changement climatique. Des vérifications et suivis de l'évolution de plusieurs paramètres climatiques relatifs à la température, humidité, vent et évaporation ont permis de valider l'hypothèse d'existence et de persistance du phénomène de changement climatique.

En outre, des observations et des données ont été recueillies sur des phénomènes naturels qui commençaient à présenter des risques majeurs pour la société et l'humanité. Si on parle de sécheresse et des inondations, de la fonte accélérée des neiges ceci permet de se mettre d'accord sur l'existence du changement climatique. Plus personne n'ignore la problématique du changement climatique, Canicule en été, hiver sans neige, dérèglement du climat, des inondations et de terribles sécheresses ; en fait le changement climatique se manifeste sous diverses formes.

Les effets du changement climatique sont parmi les défis actuels auxquels l'humanité doit faire face : Un réchauffement des températures, une forte variabilité des précipitations et une intensification des phénomènes extrêmes. Ainsi, les secteurs clés de l'économie et du développement notamment l'agriculture, l'environnement, les ressources en eau, sont menacés.

Selon le dernier rapport du Groupe Intergouvernemental des experts sur l'Évolution du Climat (GIEC), l'essentiel de l'accroissement observé de la température moyenne globale depuis le milieu du 20^e siècle est dû très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique [39]. Toutes les projections futures du climat global (futur proche et lointain) prévoient une intensification du réchauffement moyen, en plus de la variabilité des précipitations et aussi une plus grande fréquence et une intensification des phénomènes extrêmes [39]. Les impacts de cette variabilité climatique varient d'une région du globe à une autre avec des conséquences socio-économiques particulièrement importantes dans les pays en développement [33]. En Afrique, une augmentation de la magnitude et de la fréquence des événements extrêmes est anticipée [25].

Introduction Générale

L'année 2017 a été la troisième année la plus chaude jamais enregistrée sur les terres continentales africaines depuis 1950, après 2010 (année la plus chaude) et 2016 (2ème année la plus chaude) [24]. Au cours des neuf premiers mois de l'année 2017, la température moyenne sur le continent a été supérieure de 1.20°C à la moyenne de la période entre les années 1961 et 1990 (en comparaison, la température était de 1.41°C supérieure à la moyenne en 2010 et de 1.26°C en 2016) [24]. L'Afrique de l'Ouest observe déjà un réchauffement des températures de 1°C depuis 1950 [24]. Durant ces dernières années, le continent a observé des vagues de chaleur plus longues et plus intenses que durant les deux dernières décennies du 20ème siècle [30]. Par ailleurs, 50% des projections climatiques régionales suggèrent que ces vagues de chaleur, qui sont inhabituelles dans les conditions climatiques actuelles, seront plus régulières d'ici à 2040 mais voire plus sévères sous le scénario RCP8.5 [30]

L'évolution du climat de la planète Terre, est au cours de ces dernières décennies marquée par un réchauffement dû à l'effet de serre dont l'une des majeures conséquences sur la circulation atmosphérique est la limitation des échanges méridiens et la diminution des flux de mousson à l'équateur [39]. Il s'en suit des répercussions sur les régimes pluviométriques qui se traduisent par des événements hydro climatiques extrêmes. La récurrence de ces événements, depuis ces dernières années, constitue l'un des principaux facteurs qui affecte aussi bien la capacité de production des écosystèmes que la société humaine. [38]

L'Algérie est l'une des régions les plus vulnérables face aux impacts et changement climatique au cours du 21ème siècle. Le nord de l'Algérie a connu une variabilité à la baisse de la pluviométrie annuelle au cours du 20ème siècle.

Dans le cadre de la recherche sur les changements climatiques, les problèmes récurrents sur lesquels les chercheurs butent sont soit l'absence totale de données sur une région d'étude. Soit la discontinuité des séries de données météorologiques quotidiennes, mensuelles ou annuelles. On peut aussi énumérer le manque de stations météorologiques comme un des problèmes significatifs.

Dans ce travail on a traité des données climatiques qui ont été mesurées dans deux régions différentes, la première située dans le sud-est de l'Algérie appelée Ouargla et la seconde Guelma situé au Nord-est de l'Algérie. Ceci à travers la collecte des paramètres climatiques (température, précipitations, humidité) de 30 ans, la première série est de 1991 à 2021 et la deuxième série est de 1980 à 2010 ensuite la mise en évidence du changement climatique et l'évolution du climat par le calcul et la suivre des différents indices climatiques.

Introduction Générale

Ce travail, composé de trois parties, sera particulièrement axé sur les approches suivantes :

- ✚ La première partie est relative à une recherche bibliographique concernant les notions du climat, changement climatique et variabilité climatique, soit les causes de l'évolution du climat et les impacts de ces changements sur les ressources en eau.
- ✚ La deuxième partie consiste à définir les outils et la méthodologie utilisée dans la présente étude. En premier lieu on s'intéresse sur la présentation des zones d'étude et la problématique liée à la disponibilité, Ensuite, on définit la méthode utilisée pour la détection de la rupture des séries climatiques. Enfin, une introduction sur la modélisation, l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et ses types, présentation des différents matériels informatiques utilisées et les différents modèles de prévision utilisés dans logiciel « Weka ».
- ✚ La dernière partie consiste à faire une application de modèles de la prévision sur les zones d'étude et interpréter les résultats obtenus.

Chapitre I : Etude Bibliographique

I. Climat

1.1 Définition du climat

Au sens étroit du terme, le climat désigne généralement le « temps moyen » ; il s'agit plus précisément d'une description statistique en fonction de la moyenne et de la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années. Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent. Dans un sens plus large, le climat est la description statistique de l'état du système climatique. [16]

Le climat est défini comme un « ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution en un lieu donné » d'après Larousse. [37]

En 1910, **Hann** a défini le climat comme étant « l'ensemble des éléments météorologique qui caractéristique l'état moyen de l'atmosphère au-dessus d'un lieu » [2]. Ainsi au cours de l'année 1987 Gibbs a proposé une définition plus dynamique « la probabilité d'occurrence de divers états de l'atmosphère dans un lieu ou une région, au cours d'une certaine période donnée. [39]

Autrement dit le climat correspond à la distribution statistique des conditions atmosphériques dans une région donnée pendant une période donnée. Il est effectué à l'aide de valeurs moyennes établies à partir de mesures statistiques, mensuelles et annuelles, ainsi que sur la base des données atmosphériques locales : température, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent.[3]

L'étude du climat est une branche de la météorologie et de la géographie physique,. C'est la succession des conditions météorologiques sur de longues périodes dans le temps.

1.2 Caractérisation du climat

La caractérisation du climat est effectuée à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques telles que la température la pression atmosphérique les vents et précipitations. Ainsi toutes les régions du monde ont été définies pour un type de climat particulier, comme par exemple le climat méditerranéen (voir figure 1) répertorié autour de la méditerranée mais aussi en Californie (USA), en Afrique du Sud, en Australie et au Chili [10]

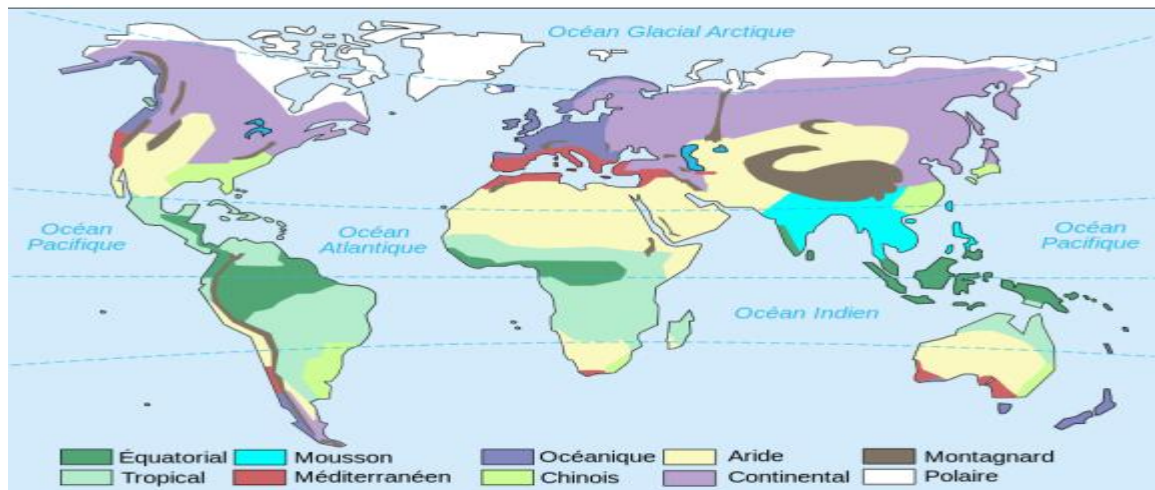


Figure I.1: Carte simplifiée des différents climats définissant chaque partie de la planète Terre [Wikipédia]

Bien que les climats régionaux soient délimités géographiquement (figure 1), les variations interannuelles des paramètres atmosphériques les définissant peuvent entraîner la mise en place de nouveaux types de climat temporairement. C'est ce qu'on appelle les variabilités interannuelles du climat. Ajouté à cela, la présence de montagnes ou bien de littoral maritime génère des variations importantes de l'équilibre atmosphérique. Pour finir, depuis la parution du cinquième rapport du GIEC-IPCC (Intergouvernemental Panel on Climate Changes) « Les éléments scientifiques 2013 » [34]. L'ensemble de la communauté scientifique mondiale s'accorde pour affirmer que le réchauffement climatique global de la Terre est effectif, modifiant ainsi l'ensemble des climats mondiaux à court terme d'une manière encore méconnue [11]

1.3 Variabilité climatique

La variabilité climatique désigne des variations de l'état moyen et d'autres statistiques (écarts standards, phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne), ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe).[41]

1.4 Climatologie

La climatologie, une branche de la météorologie et de la géographie physique, est l'étude du climat. C'est la succession des conditions météorologiques sur de longues périodes dans le temps. L'étude du temps à court terme est du domaine de la météorologie [35]

Elle est constituée d'une multitude de disciplines scientifiques. La connaissance de nombreux paramètres, à savoir la température à différentes altitudes, l'influence des gaz à effet de serre, l'humidité relative et l'évaporation océanique, est nécessaire pour produire des modèles climatiques numériques et anticiper les changements du climat que l'on peut prévoir à plus ou moins long terme (30 ans). [5]

1.5 Météorologie

Météorologie vient du mot grec antique composé de : *meteor* qui désigne les particules en suspension dans l'atmosphère et *logos* connaissance. La **météorologie** a pour objet l'étude des phénomènes atmosphériques tels que les nuages, les précipitations ou le vent dans le but de comprendre comment ils se forment et évoluent en fonction des paramètres mesurés tels que la pression, la température et l'humidité. [5]

La météorologie moderne permet d'établir des prévisions de l'évolution du temps en s'appuyant sur des modèles mathématiques aussi bien à court qu'à long terme.

1.6 Système climatique

Le système climatique de la terre se compose d'éléments en interaction complexe. L'élément moteur est le Soleil, dont l'énergie se réchauffe la Terre. Cette énergie est à l'origine de la circulation atmosphérique et océanique ainsi que des processus d'évaporation et de précipitation qui font partie du cycle de l'eau. En plus de l'atmosphère et des océans, le système climatique englobe les eaux douces, les plantes, les animaux, les couvertures de glace et de neige, les masses terrestres et même la croûte terrestre. [4]

En résumé, donc, l'étude du changement climatique nécessite de définir le système climatique qui se compose de cinq éléments :

- L'atmosphère ;
- Les surfaces continentales ;
- L'hydrosphère (océans, lacs, rivières, nappe d'eau souterraine...)
- La cryosphère (glace, terrestre ou marines, manteau neigeux)
- La biosphère (tous les organismes vivants dans l'air, sur et dans les océans)

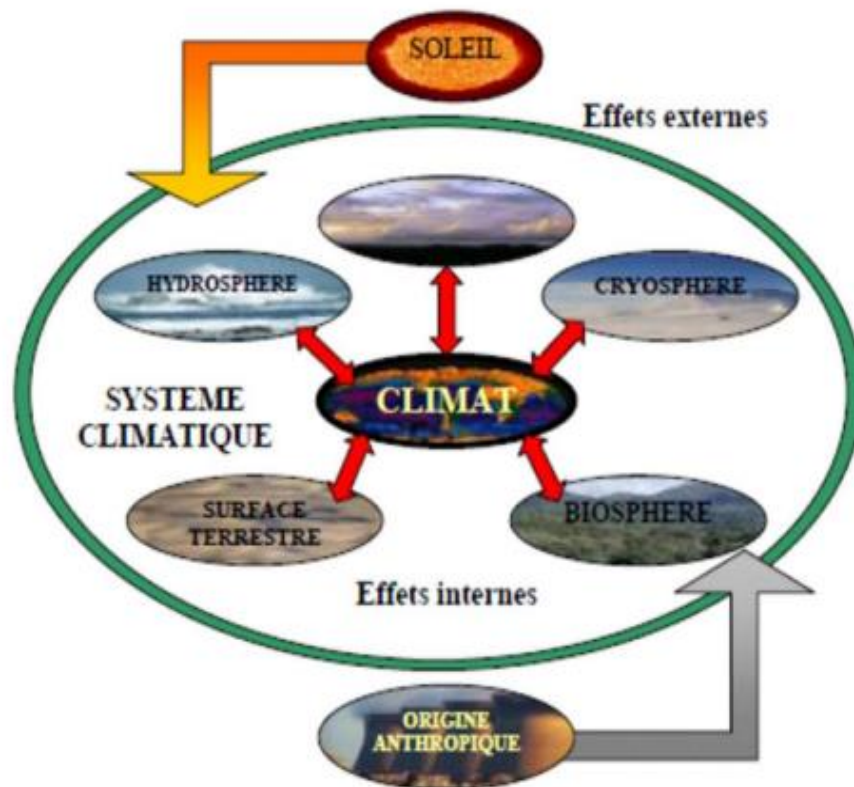


Figure I.2: Composantes du système climatique

Le comportement de l'ensemble du système climatologique est influencé ou contraint par l'évolution de certains paramètres extérieurs que l'on appelle forçage extérieur. [5]

1.7 Indices climatiques

Il existe une multitude d'indices climatiques. Les plus couramment utilisés pour caractériser les variations interannuelles et infrarégionales d'un contexte hydro-climatique sont : l'indice de Gaussen et l'indice xérothermique développés par (Bagnouls et Gaussen). L'indice de sécheresse estivale et le quotient pluviothermique développés par Emberger,[29] l'indice de continentalité thermique de Gorczinski 1920, (modifié Daget 1968) [11] et l'indice d'aridité de De Martonne 1926 [13]

1.7.1. Indices de Bagnouls et Gaussen (1953)

1.7.1.a Indices et diagrammes ombrothermiques

C'est encore à l'heure actuelle un des indices les plus utilisés. Cet indice tient compte des moyennes mensuelles des précipitations (P en mm) et de la température (T en °C) et donne une expression relative de la sécheresse estivale en durée et en intensité. Pour repérer les mois "secs" et "humides" et mettre en évidence les périodes de sécheresse d'une région, on trace un diagramme ombro-thermique qui superpose les deux courbes de températures et

de précipitations, portées sur deux axes parallèles en fonction du temps, dont l'échelle est ($P=2 \text{ mm} \leq T=1^\circ\text{C}$). Ce diagramme permet de définir une aire ombro-thermique. Plus l'aire est importante et plus la saison est sèche.

Un mois est considéré comme sec quand $P < 2T$, c'est-à-dire quand les pertes en eau sont supérieures aux apports. (L'évapotranspiration potentielle (ETP) est supérieure aux précipitations)

Inversement, quand $P > 2T$, le mois est considéré comme humide

Avec P le cumul de précipitations mensuel en mm/mois T la moyenne de température mensuelle en °C

1.7.1.b Indice xérothermique

On définit aussi les climats sur la base de l'indice Xérothermique X. Son emploi correspond au nombre de jours biologiquement secs durant la période sèche pour un endroit donné. Il fait intervenir les précipitations, l'humidité atmosphérique, la température, les brouillards et la rosée. L'indice xérothermique s'est révélé très valable dans les régions tropicales, subtropicales et méditerranéennes. Il donne une expression relative de la sécheresse estivale en durée et en intensité

Cet indice correspond au nombre de jours sans pluie au cours des mois secs consécutifs, soit $X = \sum \text{mois secs consécutifs (jours sans pluie)}$. X qui s'échelonnant entre 0 et 365 (366 pour les années bissextiles)

- $X > 300$: climat désertique
- $200 < X < 300$: climat subdésertique
- $150 < X < 200$: climat Xérothermo-méditerranéen
- $100 < X < 150$: climat thermo-méditerranéen
- $40 < X < 100$: climat méso-méditerranéen
- $0 < X < 40$: climat subméditerranéen

Calcul de l'indice xérothermique X_t

$$X_t = m(x/10) - (p+b/2) \dots\dots\dots (1)$$

m : nombre de jours de la période pour le calcul de l'indice xérothermique

x/10 : humidité de l'air

Si

- Humidité de l'air est inférieure à 40% les jours sont considérés secs => $x/10=1$
- Humidité de l'air est de 40% à 60% les jours sont considérés 9/10 secs => $x/10=9/10$
- Humidité de l'air est de 60% à 80% les jours sont considérés 8/10 secs => $x/10=8/10$
- Humidité de l'air est sup à 80% les jours sont considérés 7/10 secs => $x/10=7/10$

p : nombre de jours de pluie pour la période concernée

b : nombre de jours de brouillard ou de rosée durant la période considérée

En général, un milieu est considéré

- Non aride lorsque cet indice est inférieur à 100,
- Semi-aride entre 100 et 290,
- Aride entre 290 et 350,
- Hyperaride entre 350 et 365

1.7.2. Indice de sécheresse estivale et quotient d'Emberger

1.7.2.a Indice de sécheresse estivale

On a caractérisé l'importance et l'intensité de la sécheresse estivale par l'indice : S. [14]

$$S=P/M \dots\dots\dots (2)$$

P : Total de précipitation moyenne estivale

M : Moyenne des précipitations max du mois le plus chaud

L'indice de sécheresse estivale permet de quantifier le degré de sécheresse de la saison estivale. [12]

Quand $M < 7$, il y a une période sèche.

1.7.2.b Quotient pluviothermique (Q)

Le quotient d'Emberger (Q_2) définit le degré d'humidité du climat. Il prend en compte les précipitations annuelles P, la moyenne des maxima de température du mois le plus chaud (M) et la moyenne des minima de température du mois le plus froid (m). Dans les régions méditerranéennes, on a remarqué que l'amplitude thermique (M-m), donc l'évaporation, est un facteur important de la répartition des végétaux [14]

On sait en effet que, à température moyenne égale, l'évaporation est d'autant plus grande que l'amplitude thermique est élevée. Le facteur de pluie pris en compte est le produit du nombre de jours de pluie par an (n) par le cumul moyen annuel (P).

Le quotient d'Emberger initial

$$Q = 100 * P / 2(M+m) * (M-m) \dots (3)$$

- Q : quotient pluviométrique d'Emberger
- M : moyenne des maxima (températures maximales journalières) du mois le plus chaud, en degrés Celsius
- m : moyenne des minima (températures minimales journalières) du mois le plus frais, en degrés Celsius
- P : cumul pluviométrique annuel, en millimètres

Le quotient d'Emberger modifié

$$Q_2 = 2000P / M^2 - m^2 \dots \dots \dots (4)$$

- Q_2 : quotient pluviométrique modifié d'Emberger
- M : moyenne des maxima (températures maximales journalières) du mois le plus chaud, en Kelvins
- m : moyenne des minima (températures minimales journalières) du mois le plus frais, en kelvins
- P : cumul pluviométrique annuel, en millimètres

La valeur $(M + m) / 2$ exprimée en kelvins varie peu. On suppose que $(M+m) / 2 \approx 291$ kelvins et donc, $M+m \approx 582$. On obtient alors $2000/582 \approx 3.436$. La formule devient alors la formule de Stewart. [27],[32]

$$Q_2 = 3.43P / M+m \dots \dots \dots (5)$$

Où : M et m s'expriment en degrés Celsius.

Un climat méditerranéen est d'autant moins sec que le quotient est grand.

Ce quotient permet de classer les bioclimats (Ensemble des conditions climatiques d'une région qui exercent une influence sur les êtres vivants et en particulier sur la santé humaine, d'après Larousse.) selon les valeurs de Q .

Les bioclimats sont ensuite représentés au sein d'un climagramme respectant $Q=f(m)$ permettant de définir les bioclimats suivants :

- $Q < 10$: Climat aride
- $10 < Q < 45$: Méditerranéen aride
- $45 < Q < 70$: Méditerranéen semi-aride

- $70 < Q < 110$: Méditerranéen subhumide
- $110 < Q < 150$: Méditerranéen peu humide
- $150 < Q$: Méditerranéen humide

À partir de Q2, Emberger a classé la région méditerranéenne en cinq étages bioclimatiques (saharien, aride, semi-aride, subhumide et humide).

Il a aussi établi une délimitation zonale du bioclimat méditerranéen, du plus sec vers le plus humide. On distingue alors :

- L'étage Saharien < 100 mm
- L'étage Aride 100 mm – 400 mm
- L'étage Semi-Aride 400 mm – 600 mm
- L'étage Subhumide 600 mm – 800 mm
- L'étage Humide > 800 mm

1.7.3 Indice de continentalité thermique :

L'indice de continentalité thermique a été déterminé par Gorczynski en 1920 puis modifié par Daget en 1968. Il caractérise la continentalité thermique des sites par la concentration estivale des températures.

$$K' = \frac{1.7A}{\sin(\gamma + 10 + 9h)} - 14 \dots\dots\dots (6)$$

A : amplitude thermique annuelle moyenne en °C

γ : latitude en °

h : altitude en kilomètres

Un climat est continental ou semi-continental quand la continentalité pluviale (IA) est supérieure à 1 et K' supérieur à 25. En climat méditerranéen, la continentalité pluviale est toujours inférieure à 1 en raison de la forte sécheresse estivale. Par contre, au niveau thermique, ce climat étant par nature contrasté, les amplitudes annuelles sont importantes mais, comme elles dépendent avant tout de l'importance des températures estivales, elles sont peu déterminantes pour la végétation en tant que facteur thermique. En revanche, elles jouent un rôle important dans l'accentuation de l'aridité.

1.7.4 Indice d'aridité de De Martonne (1926)

En se basant sur des considérations essentiellement géographiques, De Martonne a défini comme fonction climatologique nouvelle l'indice d'aridité du climat par le quotient I ou

IDM équivalant à $P/(T+10)$. Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température ; l'évaporation étant considérée comme une fonction linéaire de la température. Il a été ajouté 10 aux moyennes thermométriques pour éviter les valeurs négatives de l'indice. De fait de sa simplicité, il a été beaucoup utilisé par les géographes. [13]

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Une faible aridité correspondant à des pluies abondantes et/ou des températures basses. De Martonne a proposé six grands types de climats selon les valeurs de l'indice annuel

$$I = \frac{P(mm)}{T(^{\circ}C)+10} \dots \dots \dots (7)$$

Régions hyperarides (*Déserts absolus*) $0 < I < 5$

Régions arides (*Régions désertiques*) $5 < I < 10$

Régions semi-arides $10 < I < 20$

Régions semi-humides $20 < I < 30$

Régions humides $30 < I < 40$

Régions très humides > 40

1.7.5 Indice de chaleur George :

L'indice de chaleur est un indice développé aux États-Unis. Il combine la température de l'air ambiant et l'humidité relative, dans des zones ombragées, pour tenter de déterminer la perception de la température que ressent le corps humain (Journal of Applied Meteorology and Climatology 1979), c'est-à-dire de combien il ressentirait la chaleur si l'hygrométrie était à une autre valeur à l'ombre. Le résultat est également connu comme la « température ressentie à l'air » ou « la température apparente ». L'indice de chaleur utilise comme hypothèse la masse et le volume, les vêtements portés, l'activité physique, la densité du sang, l'ensoleillement et l'exposition aux ultraviolets, ainsi que le vent, pour une personne moyenne dans des conditions normales.[32]

Sa formule est calculée à partir des degrés Fahrenheit (°F) selon :

$$I_{CH} = c_1 + c_2T + c_3H + c_4TH + c_5T^2 + c_6H^2 + c_7T^2H + c_8TH^2 + c_9T^2H^2 \dots \dots (8)$$

Les valeurs des coefficients de c1 à c9 sont récapitulées dans le tableau I.1

Tableau I.1: Coefficient de c1 à c9

c	EN °C	EN °F
c₁	-8,785	-42,379
c₂	1,611	2,049
c₃	2,339	10,143
c₄	-0,146	-0,225
c₅	$-1,231 \cdot 10^{-2}$	$-6,838 \cdot 10^{-3}$
c₆	$-1,642 \cdot 10^{-2}$	$-5,482 \cdot 10^{-2}$
c₇	$2,212 \cdot 10^{-3}$	$1,229 \cdot 10^{-3}$
c₈	$7,255 \cdot 10^{-4}$	$8,528 \cdot 10^{-4}$
c₉	$-3,582 \cdot 10^{-6}$	$-1,990 \cdot 10^{-6}$

ICH : Indice de chaleur (°F)

T : température de l'air (°F)

H : humidité relative (0 à 100)

C : coefficient de conversion.

Le Celsius est actuellement une unité dérivée de température dans le système SI, le kelvin étant l'unité de base.

C'est le Suédois Andreas Celsius qui a présenté l'unité et l'échelle Celsius pour la première fois en 1742.[1]

Les deux principaux points de référence de l'échelle Celsius étaient le point de congélation de l'eau (ou le point de fusion de la glace) défini à 0 °C et le point d'ébullition de l'eau à 100 °C.

[1]

🚦 FORMULE POUR CONVERTIR LES DEGRÉS CELSIUS ET FAHRENHEIT

Convertir les Celsius en Fahrenheit en appliquant la formule suivante : **Celsius * 9/5 + 32**. [2]

Pour convertir des Fahrenheit en Celsius il suffit de faire : **(Fahrenheit - 32) * 5/9** ;

[2]

II. Changement climatique

2.1 Changement climatique et Variabilité climatique

Un différend subsiste entre le CCNUCC (Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques) et le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) sur la définition à donner au changement climatique et à la variabilité climatique ; ainsi selon le GIEC, le réchauffement climatique se définit comme suit: « le changement climatique s'entend d'une variation de l'état du climat [...] qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Il se rapporte à tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine. » [38] ; A contrario de la première définition citée, la Convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique, le terme « changement climatique » désigne uniquement les changements dus aux activités humaines, quant au terme « variabilité climatique » il est utilisé pour désigner les changements climatiques d'origine naturelle.

Autrement dit :

Les changements climatiques désignent une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité persistant pendant de longues périodes (généralement, pendant des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'affectation des terres [39]

La variabilité climatique désigne des variations de l'état moyen et d'autres statistiques (écarts standards, phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne), ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe).[41]

2.2 Changements climatiques observés

Les observations mettent en évidence un changement de la composition de l'atmosphère (augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre tels que le CO₂ et le méthane (CH₄), etc.), ainsi qu'un changement du climat mondial (températures, précipitations, niveau de la mer, glace marine, et dans certaines régions, phénomènes climatiques extrêmes, y compris vagues de chaleur, fortes précipitations, et sécheresses, etc.). Les températures ont augmenté presque partout dans le monde, bien que de manière plus sensible aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord. Par ailleurs les terres émergées se sont réchauffées plus rapidement que les océans.[39]

Cette évolution n'est pas uniforme et tend à varier d'une région à une autre, par exemple, le réchauffement en Afrique est légèrement plus élevé par rapport à la tendance mondiale en 2001 (Figure 1). [1]

On ne peut dire à l'heure actuelle si l'accélération du rythme qui a été constatée entre 1993 et 2003 traduit une variation décennale ou un renforcement de la tendance à long terme. Entre 1900 et 2005, les précipitations ont fortement augmenté dans l'Est de l'Amérique du Nord et du Sud, dans le Nord de l'Europe et dans le Nord et le Centre de l'Asie, tandis qu'elles ont diminué au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du Sud. Il est probable que la sécheresse a progressé à l'échelle du globe depuis les années 1970. Il est très probable que les journées froides, les nuits froides et le gel ont été moins fréquents sur la plus grande partie des terres émergées depuis cinquante ans et que le nombre de journées chaudes et de nuits chaudes a au contraire augmenté. De plus, la fréquence des phénomènes ci-après s'est probablement accrue : vagues de chaleur sur la majeure partie des terres émergées, fortes précipitations dans la plupart des régions et, depuis 1975, élévations extrêmes du niveau de la mer dans le monde entier.[1]

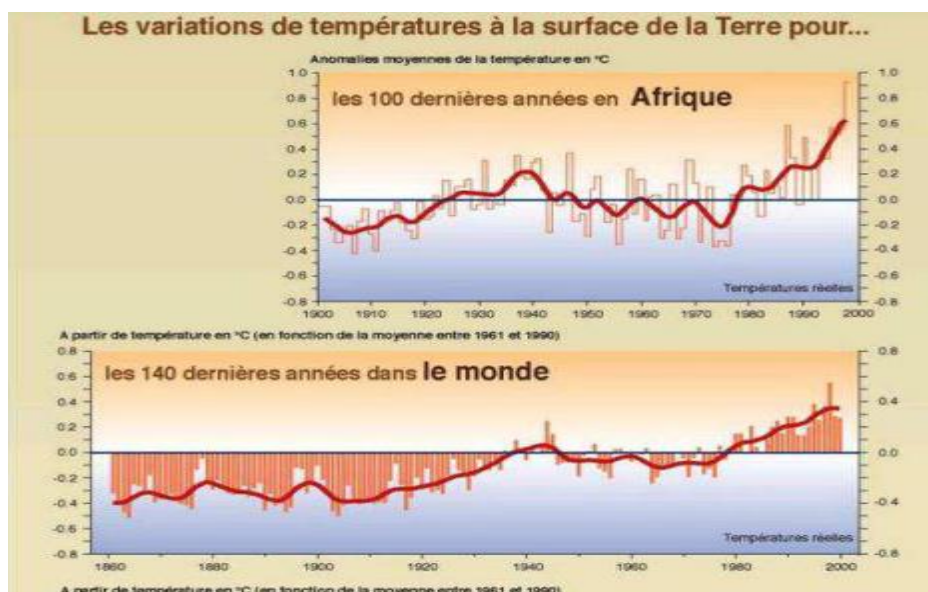


Figure I.3: Comparaison entre les variations de températures en Afrique et la tendance de réchauffement mondial (<http://www.grida.no/publications>).[1]

2.3 Causes de l'évolution climatique

Les causes du changement climatique sont multiples. Certaines sont naturelles comme le phénomène d'effet de serre, la variation des paramètres astronomiques et l'activité volcanique. D'autres sont anthropiques liés à l'activité humaines qui se traduit par le rejet des gaz à effet de serre (GES).[11]

2.3.1 Causes naturelles

2.3.1.1 Effet de serre

C'est un phénomène naturel résultant de la réémission, sous forme d'un rayonnement thermique infrarouge, d'une partie du rayonnement solaire incident, par la surface terrestre. L'autre partie est absorbée par l'atmosphère ou par la surface de la Terre et donc transformée en chaleur.[9] Les gaz à effet de serre, qui sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitrique, piègent ce rayonnement thermique dans l'atmosphère terrestre et augmentent ainsi la température au sol.[9] Si l'un des éléments régissant le système climatique subit des modifications considérables, l'équilibre peut être rompu, ce qui entraînerait un changement climatique planétaire qu'il soit temporaire ou permanent.[9]

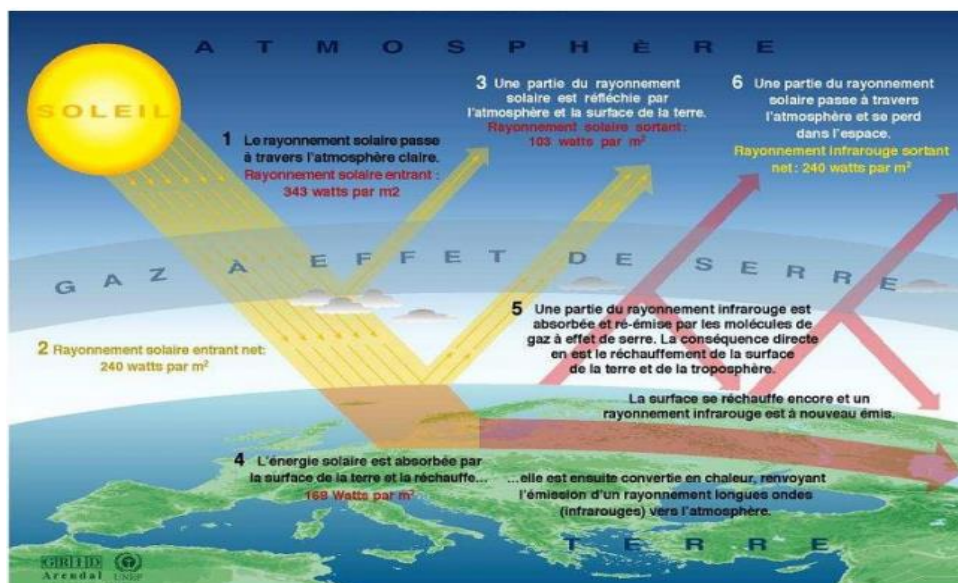


Figure I.4: Processus de l'effet de serre

2.3.1.2 Activité solaire

Le soleil traverse des périodes de grande activité, qui se traduisent par une augmentation du nombre de taches solaires, ainsi que par un accroissement du rayonnement, de l'activité magnétique et des flux de particules de haute énergie. Ces fluctuations de

l'activité solaire s'effectuent à des échelles de temps qui peuvent varier de plusieurs millions d'années à quelques minutes. [12]

Lorsque le nombre de taches solaires est important, le soleil émet plus d'énergie (la terre en reçoit plus), par conséquent un changement de température et du climat à lieu.[12]

L'effet du soleil n'est pas négligeable, on peut s'attendre à une augmentation plus marquée de la température globale moyenne dans les années à venir.[17]

2.3.1.3 Activités volcaniques

Plusieurs études ont montré que l'activité volcanique est un autre moteur de la variabilité climatique.[9] Les grandes quantités de particules et de gaz émis dans l'atmosphère suite aux éruptions empêchent le rayonnement solaire de passer. Toute fluctuation de ce rayonnement a une incidence sur le climat, en particulier sur la température.[13] Le volcanisme implique une chute des températures à court terme, mais s'avère être un puissant facteur de réchauffement sur le long terme. Les éruptions volcaniques sont parfois si violentes que de poussière et de gaz sont projetées à haute altitude dans l'atmosphère. Les particules qui atteignent la stratosphère peuvent rester plusieurs années. Elles provoquent une baisse des températures en réfléchissant des rayonnements solaires.[11]

2.3.2 Causes anthropiques

Le changement climatique d'origine anthropique est principalement dû à la production et au rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère du fait de l'activité humaine. Cette augmentation des gaz à effet de serre (GES) est directement liée à la croissance industrielle et aux modes de production et de consommation qui y sont associés. [13] En effet, depuis le début de l'ère industrielle, les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols perturbent significativement le bilan radiatif de l'atmosphère. On observe un accroissement sensible des concentrations atmosphériques en gaz carbonique, en méthane et en oxyde nitreux ; le taux de CO₂ est passé de 280 ppm à près de 400 ppm en 2013. Ces variations dépassent largement celles observées au cours des 400000 dernières années, lorsque les cycles biogéochimiques ne subissaient que des variations naturelles. [11] Selon le dernier rapport du GIEC « Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis au moins 800 000 ans. La concentration du dioxyde de carbone a augmenté de 40 % depuis l'époque préindustrielle. Cette augmentation s'explique en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles et en second lieu par le bilan des émissions dues aux changements d'utilisation des sols. L'océan à

absorbé 30% des émissions anthropiques de dioxyde de carbone, ce qui a entraîné une acidification de ses eaux » [13]

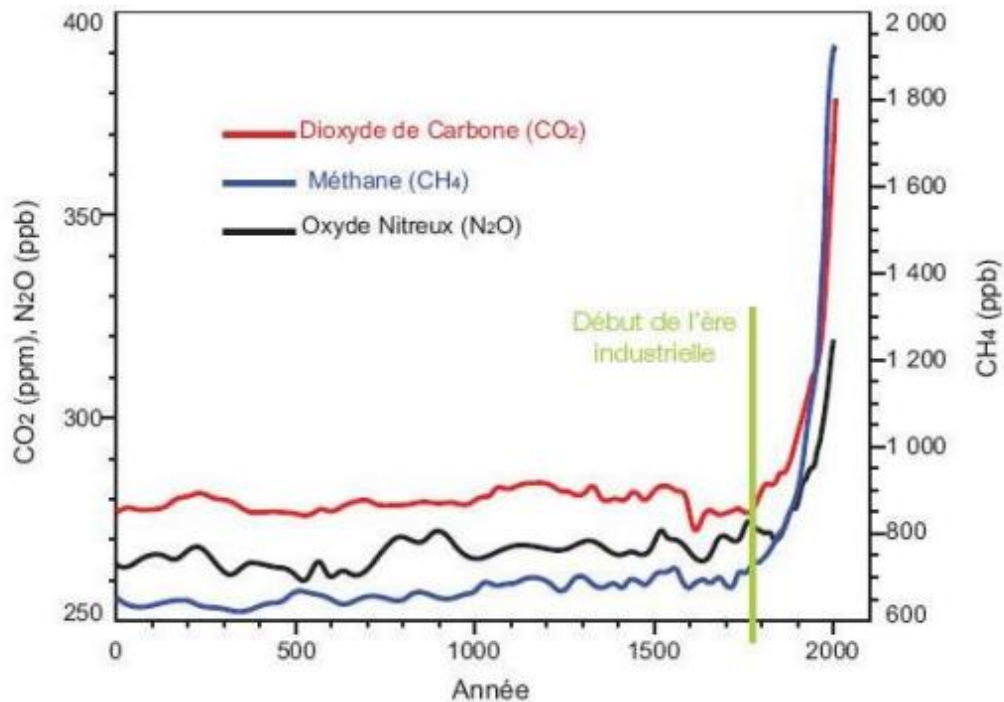


Figure I.5: Evolution de concentration des GES dans l'atmosphère [source : GIEC]

Les mesures des concentrations des Gaz à effet de serre en Algérie se font à la station VAG (ville atmosphérique globale) de Tamanrasset ; loin de toute source de pollution anthropique et à une altitude importante 2710 m. En 1996 : on a enregistré les concentrations suivantes ; CO₂ = 362ppm, CH₄ = 1756 ppb, CO = 106 ppb. Une croissance significative du CO₂ de 2ppm/an entre 1995 et 2006. Bien qu'elle soit éloignée de toute émission industrielle, les concentrations du CO₂ enregistrées à la station VAG (Tamanrasset) sont presque égales à la moyenne mondiale, on devra enregistrer des concentrations élevées dans les grandes villes industrielles. [13]

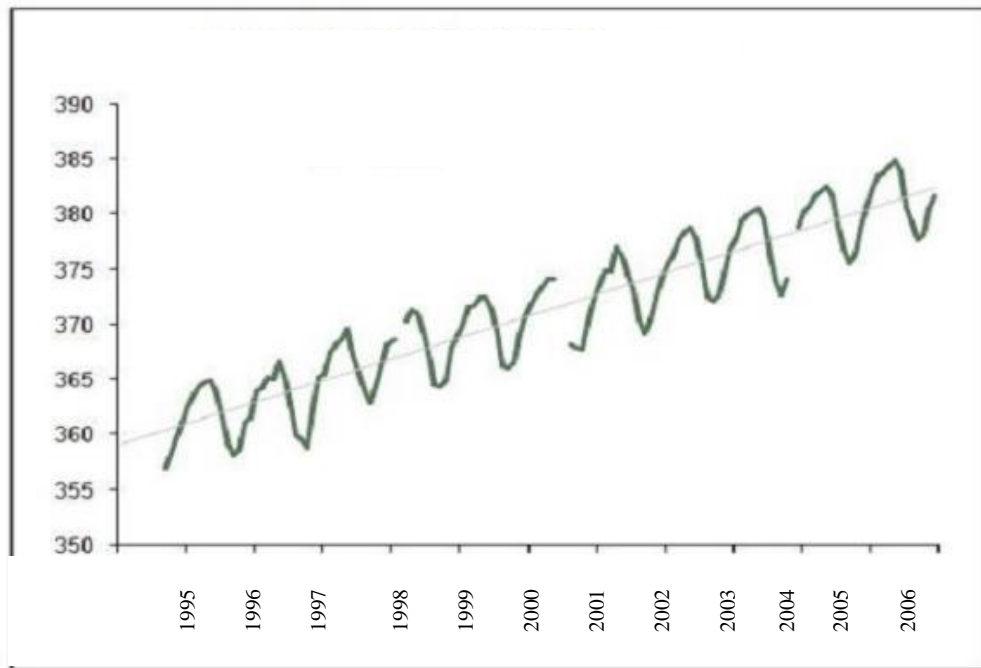


Figure I.6: Evolution de la concentration de CO2 en Algérie (Tabet,2008)

2.4 Vulnérabilité du secteur de l'eau au changement climatique en Algérie

Vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques en Algérie :

Les changements climatiques ont depuis longtemps cessé d'être une curiosité scientifique.

Ils constituent la question environnementale majeure qui domine notre époque et le défi majeur auquel doivent répondre les organismes de contrôle environnementaux [35]. L'eau, l'une des matières premières les plus importantes en Algérie, dont l'importance pour la consommation humaine, la production agroalimentaire, l'industrie, le transport, les loisirs et les écosystèmes n'est plus à démontrer. Du fait de son importance, il est indispensable de connaître sa vulnérabilité aux changements climatiques, en Algérie [3]. Néanmoins, les variations climatiques ne sont pas les seuls facteurs définissant la vulnérabilité de cette ressource aux changements climatiques, les facteurs économiques, démographiques et environnementaux sont aussi des critères à considérer. La réaction des consommateurs d'eau ainsi que les mécanismes de gestion de cette ressource déterminent dans une large mesure la vulnérabilité en Algérie de ces ressources [4].

2.5 Impacts du changement climatique

Le changement climatique à l'échelle régionale affecte déjà de nombreux systèmes naturels. Par exemple, on observe de plus en plus que la neige et la glace fondent et que le sol gelé dégèle. De plus, on note que les processus liés au cycle de l'eau et les systèmes biologiques changent et sont parfois perturbés, que les migrations débutent plus tôt que par le

passé et que les aires de répartition géographique de certaines espèces se déplacent vers les pôles.

Bien que des lacunes subsistent dans les connaissances actuelles, il est probable que ces effets soient liés à l'influence humaine sur le climat. Au niveau régional, cependant, il est difficile de faire la part des choses entre ce qui découle de la variabilité naturelle du climat et les effets du changement climatique.

Certains impacts inattendus du changement climatique commencent à devenir apparents à l'échelle régionale. Ainsi, par exemple, la fonte des glaciers peut menacer les agglomérations de montagnes ainsi que les ressources en eau et, dans les zones côtières, les dégâts liés aux inondations augmentent.[40]

2.5.1 Impacts du changement climatique sur les écoulements de surface

La sécheresse intense et persistante, observée en Algérie durant les 30 dernières années et caractérisée par un déficit pluviométrique évalué à 30% (50% durant l'année 2001- 2002), a eu un impact négatif sur les régimes d'écoulement des cours d'eau, entraînant des conséquences graves sur l'ensemble des activités socio-économiques du pays.[26]

2.5.2 Impacts du changement climatique sur les eaux de barrages

Les changements affectant la retenue des eaux de surface sont dus à la diminution du ruissellement, La contribution du ruissellement aux eaux de surface a systématiquement diminué. Les flux trop faibles ne permettent pas de remplir suffisamment les barrages existants [26].

2.5.3 Impacts du changement climatique sur les nappes phréatiques

La diminution des pluies due aux sécheresses qui sévissent depuis le début des années 70 a entraîné une baisse constante des réserves d'eau souterraine des principales nappes aquifères du nord du pays. Dans beaucoup de plaines du pays, le niveau des nappes phréatiques a déjà chuté dans des proportions alarmantes (> 20 m.).[26] L'aggravation des sécheresses conjuguées à la surexploitation des nappes phréatiques a entraîné la minéralisation des zones non saturées des nappes aquifères profondes, dans les régions semi-arides comme le plateau d'Oran et les hautes plaines occidentales. Le taux moyen d'utilisation des nappes phréatiques est de 79% dans la région Nord, il peut parfois atteindre et dépasser les 90% dans certaines zones. Dans les régions côtières, la baisse des niveaux de Pression hydrostatique a d'ores et déjà entraîné la pénétration d'eau de mer dans les réserves d'eau douce des nappes aquifères côtières des régions de la Mitidja, d'Oran, de Terga et d'Annaba.

2.5.4 Impact du changement climatique sur le cycle hydrologique :

Selon les travaux des GIEC et des autres études [36], la température de l'air et des océans est le premier paramètre qui, soumis à l'impact du changement climatique, va influencer sur le cycle de l'eau en modifiant les conditions d'alimentation du réservoir atmosphérique (taux d'évaporation, degré d'humidité de l'air). Ces modifications vont, dans un second temps, impacter la pluviométrie, avec, pour conséquence, des modifications spatiales et temporelles des régimes de précipitations qui caractérisent aujourd'hui notre territoire. Une fois précipitée au sol, l'eau est soumise au phénomène d'évapotranspiration, qui, lui-aussi, sera impacté par les modifications climatiques prévisibles (notamment la température de l'air). Cela va engendrer une modification sur la pluie efficace, la quantité de ruissèlement et la quantité d'eau infiltré. [15]

2.5.5 Impacts du changement climatique sur l'irrigation

Les récentes fluctuations climatiques et les sécheresses, plus fréquentes au cours des trois dernières décennies, ont accentué le phénomène de dégradation des sols, engendrant ainsi la désertification des zones vulnérables comme les steppes et les hautes plaines. La tendance actuelle à des inondations plus intenses pourrait entraîner une érosion et une dégradation des sols plus importantes. Ces terres constituent de véritables potentiels agricoles et doivent assurer la sécurité alimentaire du pays ainsi que la protection de la frange côtière. Les ressources en eau sont capitales pour la production alimentaire. Sur les 150 000 ha irrigables, 43 000 ha seulement ont été effectivement irrigués en 2007, du fait de la sécheresse et de la réaffectation des eaux d'irrigation à l'alimentation en eau potable des populations notamment à l'ouest du pays. [30].

2.5.6 Impacts du changement climatique sur l'assainissement

Le changement climatique a des répercussions sur la santé publique, qui est la raison d'être des efforts réalisés en matière d'assainissement. La facture des épidémies de MTH (maladie à transmission hydrique) est lourde pour l'Etat algérien. Le coût de ces épidémies a été évalué à l'équivalent du budget de construction de plus d'une dizaine de stations de traitement des eaux. Le principal facteur de ces maladies réside dans l'insuffisance des ressources hydriques conjuguée à l'absence de traitement de certains points d'eau. Les spécialistes en matière d'assainissement essaient de mieux comprendre les liens entre le changement climatique et l'assainissement, incluant les questions de santé et d'hygiène.

2.5.7 Impact de changement climatique dans le futur

Au cours du XXI^e siècle, on prévoit de nombreux impacts sur les systèmes naturels. On appréhende, par exemple, à ce que des changements dans les précipitations ainsi que dans la fonte des glaces et des neiges augmentent les risques d'inondation dans certaines régions et provoquent des sécheresses dans d'autres. En cas de réchauffement important, la capacité des écosystèmes à s'adapter sera dépassée, ce qui entraînera des effets néfastes, comme l'accroissement du risque d'extinction d'espèces.

Les personnes les plus pauvres sont généralement les plus vulnérables, parce que leur capacité d'adaptation étant moindre et que leurs moyens d'existence dépendent souvent de ressources qui sont liées au climat.

L'Afrique est particulièrement vulnérable au changement climatique, à cause des pressions existantes sur ses écosystèmes et de sa faible capacité d'adaptation. Sur tous les continents, l'approvisionnement en eau et les menaces d'inondation qui pèsent sur les zones côtières poseront problème. Dans l'ensemble, l'impact futur serait négatif, bien qu'initialement certains effets bénéfiques soient également attendus, comme une augmentation de la productivité agricole dans les hautes latitudes accompagnant un réchauffement modéré, ou une diminution des besoins en chauffage dans les régions froides. Les impacts dépendront de l'ampleur de l'augmentation des températures. Par exemple, certaines cultures de moyennes et hautes latitudes verront leur productivité s'accroître si la température augmente localement de 1 à 3°C mais pâtiront d'une augmentation plus forte. Si des températures plus élevées persistent au-delà du XXI^e siècle, cela pourrait avoir des conséquences très importantes. Par exemple, la forte montée du niveau des mers qui résulterait de la fonte des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique aurait des répercussions majeures sur les zones côtières. On s'attend à ce que le coût lié aux effets du changement climatique augmente avec le temps à mesure qu'augmentent les températures.

Au cours de ce siècle, la gravité et la fréquence de sécheresses, vagues de chaleur et autres événements climatiques extrêmes devraient augmenter et causer des impacts majeurs.[40]

Risques d'inondations

S'appuyant sur des études scientifiques, les experts dans le domaine estiment que des pluies torrentielles et des orages comme ceux qui ont ravagé les régions de Bab El Oued, Ghardaïa ou Béchar seront de plus en plus fréquents. Il faut s'attendre à l'accentuation de ces phénomènes météorologiques, qui seront de plus en plus violents et dangereux.

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1. Présentation des zones d'études :

1.1. Région de Ouargla :

1.1.1 Situation géographique :

La wilaya de Ouargla se situe dans le sud-est de l'Algérie. Elle couvre une superficie de 154 300 Km². Elle est limitée au nord par la wilaya de Biskra, à l'ouest par la wilaya de Ghardaïa, au nord-ouest par la wilaya de Djelfa, à l'est par la wilaya d'El Oued et la Tunisie, au sud-est par la wilaya d'Illizi et au sud par la wilaya de Tamanrasset. [7]

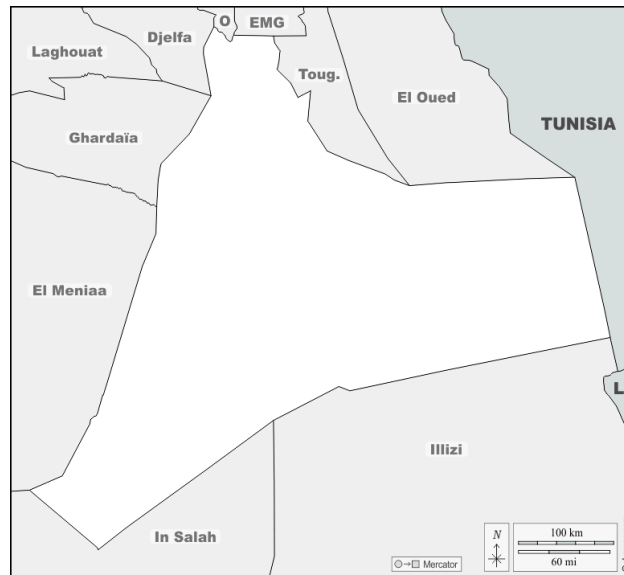


Figure II.1: localisation de la Wilaya de Ouargla

1.1.2 Relief

Le relief de la wilaya est un sous ensemble de composants géographiques dont les principaux sont les suivants :

- Le grand erg oriental : véritable mer de sable où les dunes pouvant atteindre une hauteur de 200m, il s'étend sur environ les 2/3 du territoire de la wilaya.
- La Hamada : qui est un plateau caillouteux, elle est située en grande partie à l'Ouest de la Wilaya, et au sud.
- Les vallées : sont représentées par la vallée fossile d'Oued Mya et vallée de l'Oued Righ, assez prospères. - Les plaines : assez réduites, se rencontrent à la limite occidentale de la Wilaya, ces plaines s'étendent du Nord au Sud. - Les dépressions : sont quant à elles peu nombreuses. Elles se trouvent essentiellement dans la région de l'Oued Righ.[35]

1.1.3 Ressources hydriques

Elles sont représentées par les eaux souterraines à partir de quatre grandes nappes aquifères totalisant un volume de 80.000.000 dm³. La profondeur des différentes nappes varie entre 100 et 1800 m, ce qui nécessite par conséquent d'immenses investissements.[35]

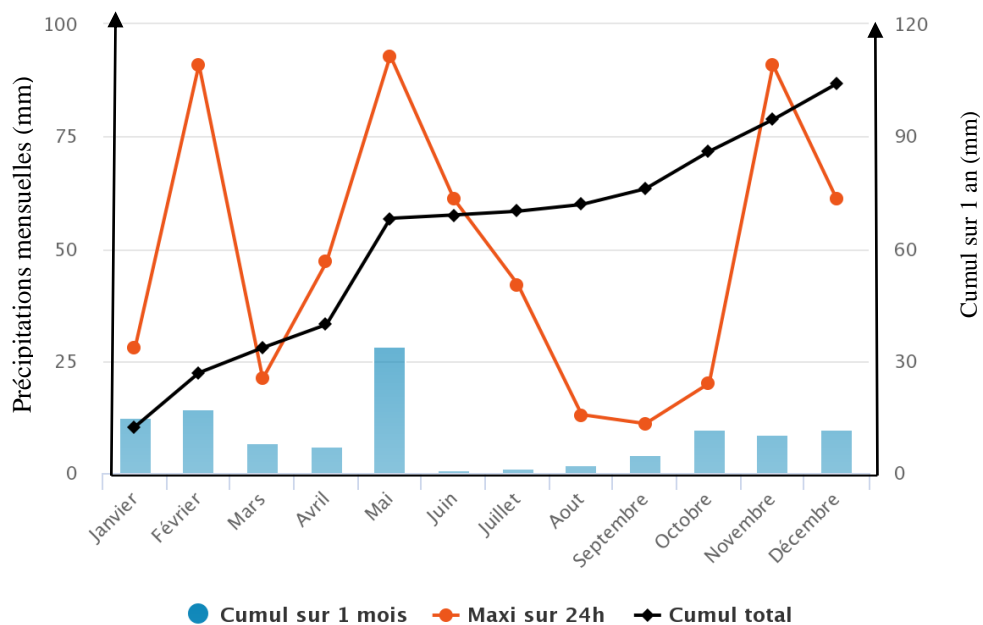
1.1.4 Climat :

Le climat saharien se caractérise par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, une luminosité intense, une forte évaporation et une grande amplitude thermique.

D'après [18], le climat de Ouargla est un climat particulièrement contrasté. L'aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air. [7]

1.1.4.1. Précipitations :

Les précipitations dans les zones sahariennes sont faibles et rares. La répartition annuelle est irrégulière et dans certaines, elle provoque des pluies torrentielles.



infoclimat.fr

Figure II.2: Variation annuelle des précipitations sur 30ans (1991-2020) (Source : Info climat 1991 à 2020

1.1.4.2. Température :

La température est le facteur climatique le plus important (Dreux, 1980). La région d'étude (Ouargla) est une partie du Sahara qui présente de grands écarts de température.

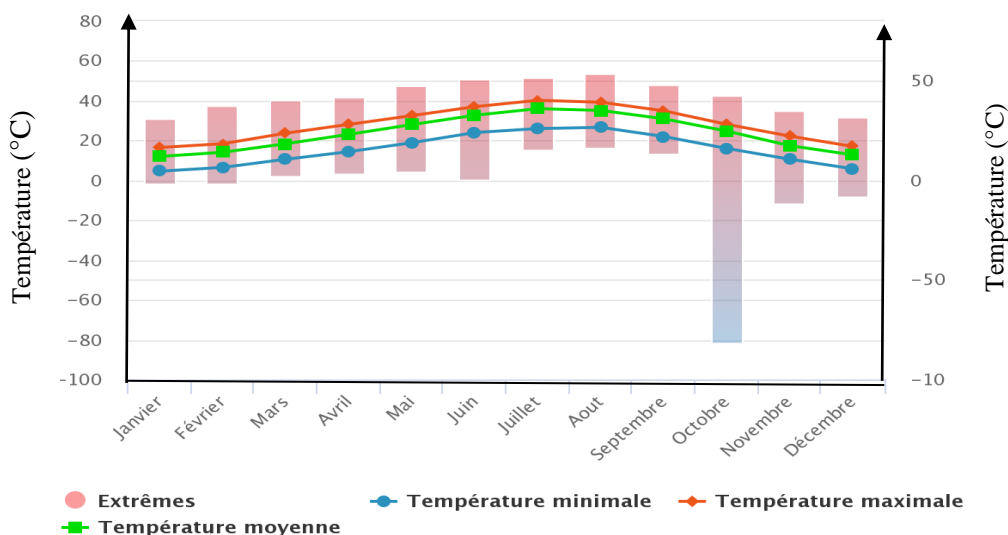


Figure II.3: Évolution des températures annuelles sur 30ans (1991-2020) (Source : Info climat 1991 à 2020)

1.1.5. Synthèse climatique :

Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Ouargla établi pour la période 1991-2021 révèle que la période sèche s'étale sur toute l'année.

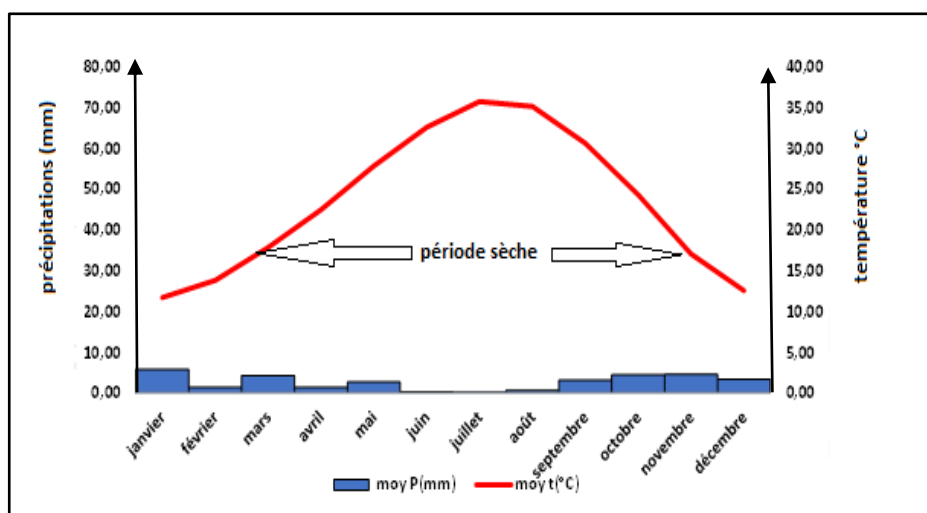


Figure II.4: Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de la région de Ouargla (1991-2021)

1.2 Région de Guelma :

2.1. Situation géographique

La Wilaya de Guelma se situe au Nord-Est de l'Algérie. Elle occupe une position géographique stratégique, en sa qualité de carrefour dans cette région (NordEst de l'Algérie), reliant le littoral des Wilaya de Annaba, El Taref et Skikda, aux régions intérieures telles que les Wilaya de Constantine, Oum El Bouagui et Souk Ahras, elle s'étend sur une superficie de 3686,84 km². Elle est limitrophe des Wilayas d'Annaba, au Nord ; El Taref, au Nord-est ; Souk Ahras, à l'Est ; Oum ElBouagui, au Sud ; Constantine, à l'Ouest ; Skikda, au Nord-ouest. [22]



Figure II.5: Situation géographique de la Wilaya de Guelma

2.2. Relief

La géographie de la Wilaya se caractérise par un relief diversifié. [6]

Le principal cours d'eau qui la traverse est l'oued Seybouse. Ce relief se décompose comme suit : Montagnes : 37,82 % dont les principales sont :

1. Mahouna (Ben Djerrah) : 1.411 m d'altitude
2. Houara (Ain Ben Beida) : 1.292 m d'altitude
3. Taya (Bouhamdane) : 1.208 m d'altitude
4. D'bagh (Hammam Debagh) : 1.060 m d'altitude

Plaines et Plateaux : 27,22 %

Collines et Piémonts : 26,29 %

Autres : 8,67 %

2.3. Potentialités hydrauliques :

Il existe 151,81 millions de m³ d'eaux mobilisables dont :

- Les eaux souterraines : elles sont réparties dans quatre sous-bassins versants (hydriques). [6]

1620 points d'eau sont opérationnels, totalisant un potentiel total mobilisable de 94,1 millions de m³/an.

- Les eaux superficielles : 57,7 8 millions m³ se répartissant comme suit 1 : 1 En ce qui concerne les barrages et retenues collinaires, les chiffres correspondent aux capacités théoriques maximales de remplissage
- Barrage de Bouhamdane : 185 millions de m³,
- Barrage de Medjez-Beggar (Ain Makhlouf) : 2,86 millions de m³,
- Retenue de Guefta (Nechmeya) : 0,44 millions de m³

2.4. Le climat de Guelma :

Le territoire Guelmois se caractérise par un microclimat subhumide au centre et au nord, et semi-aride vers le sud. La diversité des microclimats est due à l'influence de plusieurs paramètres qui participent simultanément surtout à l'élévation du taux d'humidité comme son rapprochement par rapport à la mer (60Km), la présence d'oued Seybouse, le massif forestier intense, les sources thermales et les barrages. [22]

2.4.1. Précipitations :

La répartition des précipitations est marquée par une durée de sécheresse durant l'été, avec un minimum de 2.6 mm enregistré en juillet. Le reste des saisons est marqué par des précipitations considérables. Le total annuel est de 688.3 mm avec un maximum de 137.7 mm enregistré en décembre. Près de 57% de la pluviométrie est enregistrée pendant la saison humide. (Infoclimat,2022)

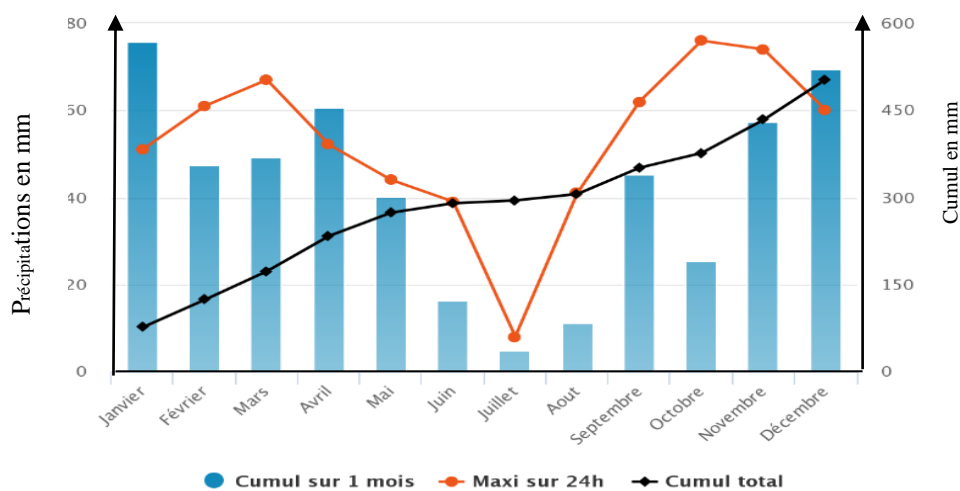
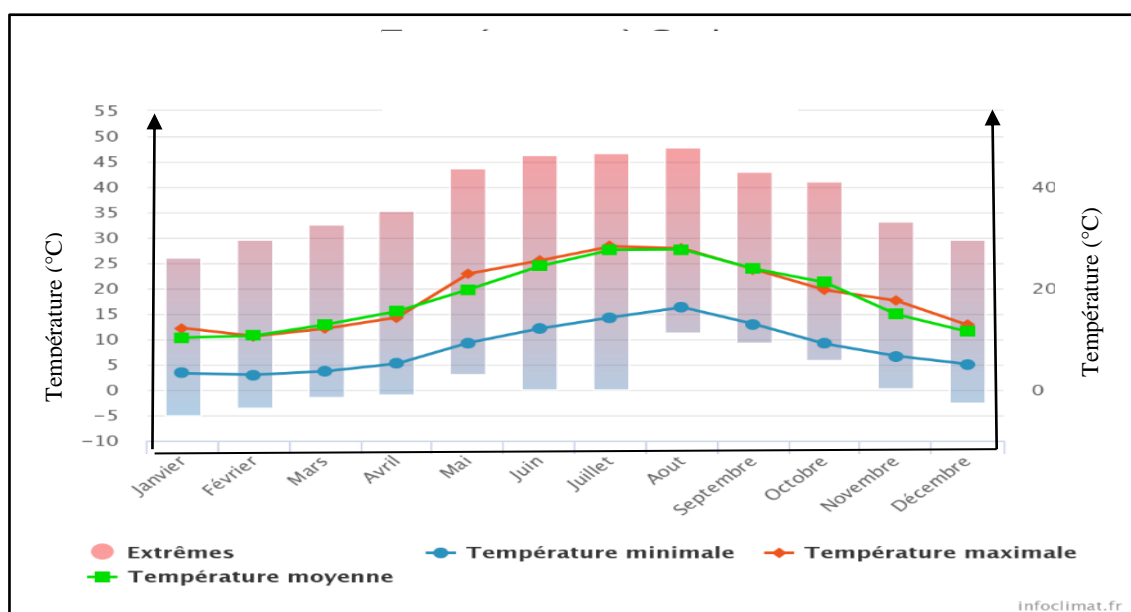


Figure II.6: Variation annuelle des précipitations sur 30ans (1981-2010) (Source : Info climat 1981 à 2010)

2.4.2. Température :

L'interprétation des données météorologiques fait ressortir que la température annuelle moyenne est de 17.9°C avec 27. 7°C en août (le mois le plus chaud) et 10°C en janvier (le mois le plus froid). Les extrêmes absolus enregistrés varient entre - 3.5°C au mois de janvier à 47°C au mois de juillet. Les amplitudes mensuelles ne sont pas très contrastées comparées aux amplitudes annuelles qui dépassent les 31.6°C. Ce qui distingue la période chaude de la période froide. L'amplitude diurne varie entre 15.4 et 20.4°C pendant les saisons fraîches.



(Infoclimat,2022)

Figure II.7: Évolution des températures annuelles sur 30ans (1981-2010) (Source : Info-climat 1981 à 2010)

2.5. Synthèse climatique :

Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Guelma établi pour la période 1981-2010 montre qu’il y’a deux périodes humides (du mois de janvier à la fin du mois de mai) et une période sèche (Au début du mois de juin à la fin du mois de novembre)

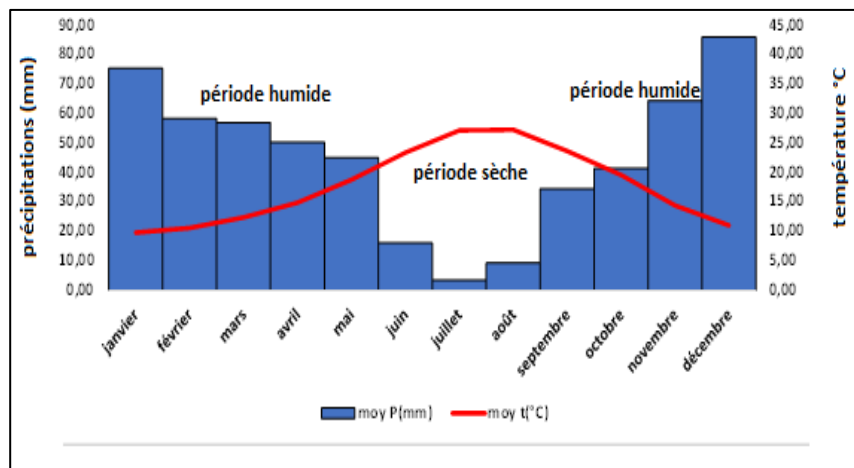


Figure II.8: Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GUASSEN de la région de Guelma (1981-2010)

La carte suivante montre la localisation des zones d’études par rapport à l’Algérie :

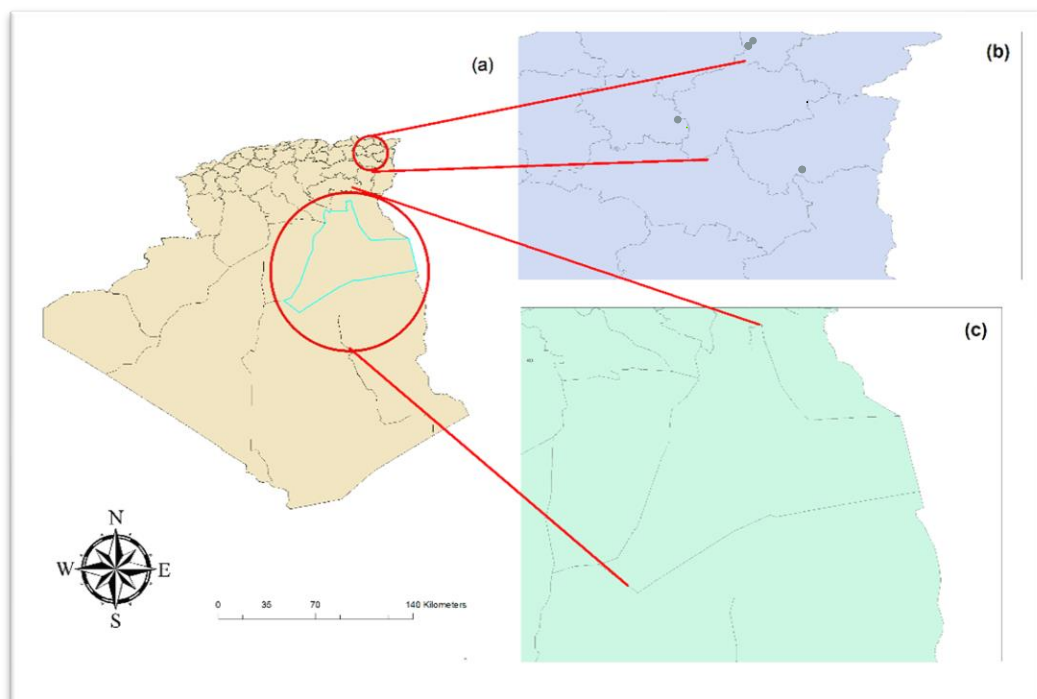


Figure II.9: Situation géographique des zones d’études

- (a) : Algérie
- (b) : Wilaya de Guelma

(c) : Wilaya de Ouargla

2. Stations météorologiques :

Ce travail est une contribution à la connaissance du climat de Ouargla et de Guelma à partir d'une série d'observations météorologiques. Cette initiative a pour objectif l'étude de la variabilité climatique sur une période de 30ans.

- ❖ **Méthodologie** : Pour mener ce travail trois stations ont été retenus suivant certains critères de choix surtout l'existence des stations météorologiques, la disponibilité des données et la présence des instruments météorologiques indispensables.

2.1. Station Hassi Ben Abdallah :

La commune de Hassi Ben Abdallah est située à l'Est de la wilaya d'Ouargla. Cette commune issue du dernier découpage administratif (1984) est distante de 20 Km du chef-lieu de la wilaya et de 08 Km du chef-lieu de la daïra de Sidi Khouiled. Elle s'étend sur une superficie totale de 1762Km² et sur une superficie agricole de 1310 km.

31°56' Nord. Longitude : 5°24' Est. Altitude : 142 m. [35]

2.2. Station de Ouargla :

Les séries de données, qui sont à la base de la détermination de différents paramètres climatiques, ont été enregistrées à la station pluviométrique de Ouargla.

Station	Coordonnées		Altitude en m
	X	Y	
Ouargla	05° 19' 22"	31° 57' 17"	136

2.3. Station de Guelma :

Station	Latitude	Longitude	Altitude(m)
Guelma	36° 28' 1.20''	7° 28' 1.20''	228

Ces stations respectent les normes d'installation et de maintenance requises par l'organisation mondiale de la météorologie (O.M.M). (Des et al., n.d.)[16]

3. Instruments de mesures :

3.1. Température :

La température est la grandeur physique qui caractérise de façon objective la sensation subjective de chaleur ou de froid laissée par l'air.

La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre (**Figure II.10**) qui utilise le plus souvent la dilatation d'un corps (alcool généralement) placé dans un tube fin (qui amplifie l'effet de dilatation). L'unité utilisée dans le système international est le degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$).[4]



Figure II.10: Thermomètre

3.2. Humidité :

Il existe deux types de l'humidité :

- L'humidité absolue : nombre de grammes de vapeur d'eau contenus dans un mètre cube d'air.
- L'humidité relative : rapport de la pression effective de la vapeur d'eau à la pression maximale.[4]

C'est cette seconde définition qui intéresse le météorologue. L'humidité relative, exprimée en pourcentage (%), indique la teneur en vapeur d'eau de l'air. Schématiquement, à 0 %, l'air est absolument sec. À 100 %, l'air est saturé en eau: il ne peut en contenir plus et la formation de gouttelettes d'eau est imminente. (**Figure II.11**) [2]



Figure II.11: Hygromètre

3.3. Précipitation :

Les précipitations sont les chutes d'eau au sol : pluie, neige, grêle. Leur mesure s'appelle la pluviométrie. Les précipitations sont mesurées à l'aide d'un pluviomètre. Celui-ci mesure l'épaisseur d'eau tombée en un lieu, donc des millimètres (l'eau ne devant ni s'écouler, ni s'infiltrer, ni s'évaporer). Une épaisseur d'un millimètre correspond à un litre réparti sur un mètre carré.[7]

Un pluviomètre est un récipient conique (en forme d'entonnoir) gradué en millimètres d'eau (les graduations sont donc plus rapprochées dans la partie basse et étroite que dans la partie haute et large). (**Figure II.12**)

Les précipitations solides (neige ou grêle) seront fondues pour être mesurées. En dehors des périodes de gel, le pluviomètre enregistreur peut être utilisé. Ce dernier mémorise chaque volume d'eau reçu. L'étude du pluviogramme donne ainsi une représentation précise des précipitations, à la fois en termes de quantité et de répartition temporelle [6]



Figure II.12: Pluviomètre

3.4. Vent :

On mesure la vitesse du vent à l'aide d'un anémomètre (**Figure II.13**) et la direction à l'aide d'une girouette (**Figure II.14**), elle est placée au sommet d'une tour ou d'un clocher.[5]



Figure II.14: Girouette

Figure II.13: Anémomètre

4. Collecte des données :

Afin de réaliser ce travail, et dans le but de collecter un maximum de données, divers organismes étatiques ont été sollicités, avec plus ou moins de succès. Il s'agit de :

- L'Office National de Météorologique (ONM) Ouargla plusieurs fois.
- Station météorologique Ain Beida (Ouargla).

4.1. Pour la région de Ouargla,

Les données climatiques sont :

- Données climatiques enregistrées au niveau de la station météorologiques de Ouargla (ONM) (1991-2016)
- Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales en °C
- Cumuls de précipitations mensuelles en mm



- Humidité relative minimales et maximales.

- Les données malheureusement manquantes ont été recherchées sur le Web, (FAO, Unesco, Banque Mondiale, info Climat)

4.2. Pour la région de Guelma,

Les données climatiques sont :

- Températures mensuelles de 1985à2005
- Température annuelles et précipitation annuelle de 1980à2020
- Précipitation mensuelle de 1980à2010
- Température mensuelle et précipitation mensuelle de 2006à2014
- Pour les températures de 1980à1984 on peut combler avec celle de Constantine.

Donc la série des données annuelles de 1980à2020

5. Comblement des lacunes :

5.1. Comblement des lacunes par corrélation linéaire :

Lorsque les variations de deux variables hydrologiques se produisent dans le même sens, on parle de corrélation positive, et lorsque les variations sont de sens opposé de corrélation négative.

L’intensité de la liaison entre les deux variables hydrologiques est mesurée par le coefficient de corrélation R, déterminé par la formule :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (xi-x')(yi-y')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (xi-x')^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (yi-y')^2}} \dots\dots\dots (9)$$

n est le nombre de couples (xi ,yi).

R varie entre -1(corrélation négative) et +1(corrélation positive).

Plus les points sont étroitement alignés selon une droite, plus la valeur du coefficient de corrélation R est élevé c’est-à-dire s’approche selon le cas de -1 ou +1.

On approxime la liaison ou la dépendance entre les deux variables par une droite de régression :

$$Y =ax+b$$

a et b sont les paramètres de l’équation de régression déterminés comme suit :

$$a = \frac{\sum(xi-x')(yi-y')}{\sum(xi-x')^2} \dots\dots\dots (10)$$

$$b = y' - ax' \dots\dots\dots ..(11)$$

xi et yi sont respectivement les valeurs des observations « i » des variables X et Y.

x' et y' sont respectivement les moyennes arithmétiques des variables X et Y.

Après avoir collecté toutes ces données et les avoir organisées. On a calculé les indicateurs climatiques (l'indice d'aridité et l'indice de chaleur) par les équations mentionnées précédemment.

6. Modélisation :

L'objet de la modélisation est la définition du meilleur modèle de la prévision et puis faire des optimisations sur ce modèle pour obtenir les meilleurs résultats de performance.

Dans ce chapitre on va parler de l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et leurs types ; ensuite on va présenter les matériels informatiques utilisés dans cette étude.

On va définir les différents modèles de prévision de changement climatique utilisées, et les appliquer sur les deux zones d'étude Ouargla et Guelma

6.1 Intelligence artificielle :

L'intelligence artificielle (IA) est l'ensemble des théories et des techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine (Encyclopédie Larousse). Certaines instances, notamment là, relevant le peu de précision dans la définition de l'IA, introduisent ce sujet comme « le grand mythe de notre temps » [1]

6.2 Apprentissage automatique

L'apprentissage automatique est un sous-domaine de l'intelligence artificielle qui s'intéresse à la construction des algorithmes qui, pour être utile, s'appuie sur un ensemble d'exemples de certains phénomènes. Ces exemples peuvent provenir de la nature, être fabriqués à la main par l'homme ou générés par un autre algorithme. L'apprentissage automatique peut également être défini comme le processus de résolution d'un problème pratique par

1) la collecte d'un ensemble de données ;

2) la construction algorithmique d'un modèle statistique basée sur cet ensemble de données

6.2.1 Types d'apprentissage automatique :

Il existe de nombreux types de systèmes d'apprentissage automatique. Dans ce qui suit, on les classe selon qu'ils nécessitent ou non une supervision humaine (supervisés, non supervisés, semi supervisée, et apprentissage de renforcement) [1]

6.3 Modélisation des séries chronologiques :

Le climat est le résultat de processus interactifs complexes prenant naissance dans le système terre-océan-atmosphère-biosphère-cryosphère en vue de régir l'énergie reçue du soleil. Pour l'étude du climat et la prise en compte de l'ensemble de ces interactions, il est nécessaire d'adopter une approche globale. Pour cela, les scientifiques utilisent des modèles de circulation générale (MCG) de l'atmosphère et la Modélisation, qui consistent à intégrer numériquement un ensemble d'équations mathématiques qui représentent les lois fondamentales gouvernant le comportement du système climatique et décrivant les processus physiques liant les diverses composantes du système. L'utilisation des MCG permet de reproduire la circulation atmosphérique à grande échelle et ainsi de simuler les principales caractéristiques de la distribution et de l'évolution du climat à la surface du globe

Les séries chronologiques : Une série temporelle (ou chronologique) est une suite d'observations $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ indexée par le temps. On supposera qu'il s'agit d'une réalisation d'un processus x . C'est-à-dire d'une suite $\{x\}$ de variables aléatoires.

L'objectif : Les principaux objectifs de la modélisation des séries chronologiques sont les suivants :

- ✓ Comparer deux séries temporelles. Par exemple, l'évolution démographique de deux régions ou deux séquences d'ADN.
 - ✓ Prédire l'évolution future de la série temporelle à partir de celles qui ont été observées. Par exemple, la température ou le cours d'une action
- Les différentes étapes de la modélisation :
- Modéliser la tendance
 - Modéliser la composante saisonnière
 - Modéliser la série résiduelle du lendemain ou l'évolution de la Population mondiale au cours du siècle prochain.[1]

6.4 Matériel informatique utilisé :

Pour cette étude on a utilisé le logiciel « WEKA 3.8.5 »

6.4.1 Présentation du logiciel Arc GIS 10 :

Arc GIS est un outil permettant d'exploiter un système d'information géographique (SIG). Le principe directeur d'un SIG est le suivant : on a d'un côté les données géomatiques et de l'autre des données attributaires, ces données sont stockées sous format numérique et organisées par couches (appelées aussi « Shapefile » dans ArcGIS). Cet outil informatique (Arc Gis) est en réalité une suite, qui se décline en trois versions (Arc View Arc Editor et Arc Info), la différence entre ces versions est le nombre d'options supplémentaires disponibles, Arc View en possédant le moins, Ceci est indépendant des extensions (spatial Analyst, 3DAnalyste... que l'on peut acheter en supplément de chaque suite).

6.4.2 Présentation du logiciel WEKA :

Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis) est un ensemble d'outils permettant de manipuler et d'analyser des fichiers de données, implémentant la plupart des algorithmes d'intelligence artificielle, entre autres, les arbres de décision et les réseaux de neurones.[6]

Weka est un logiciel qui implémente plusieurs algorithmes d'apprentissage accessibles via une interface graphique ou d'une librairie Java. Cet outil a été développé par une équipe de chercheurs de l'université de Waikato en Nouvelle-Zélande et est disponible gratuitement (licence GNU) à l'adresse suivante :

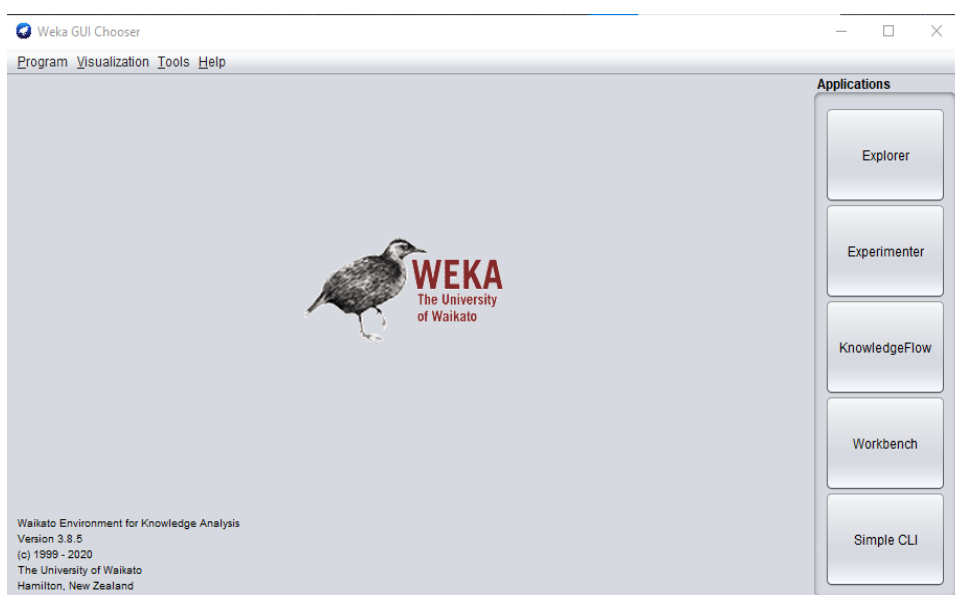


Figure II.15: Interface de logiciel de « Weka »

<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

6.4.2.1 Paramètres de fonctionnement du logiciel :

Après l'installation du logiciel gratuitement de site web :

- On ouvre l'application, on clique « Tools », après on choisit « Package manager » pour télécharger les bibliographes de travail.

Maintenant, on clique sur « Explorer », puis on choisit le fichier(extension*arff) qui contient les valeurs des indices climatiques.

- On clique sur « Forecast », puis « Basic configuration », on trouve la fenêtre de paramètres, on détermine la durée de la prévision : 24 mois (2 ans)

On va à la fenêtre « Advanced configuration », on clique sur « Evaluation » dans la fenêtre « Test options » on détermine le pourcentage des données sélectionnées pour la validation et la sélection les critères de performance des modèles.

- Sur « Base learner », on clique et choisit le modèle de la prévision.

Enfin, on clique « Start » pour faire les prévisions et afficher les résultats.

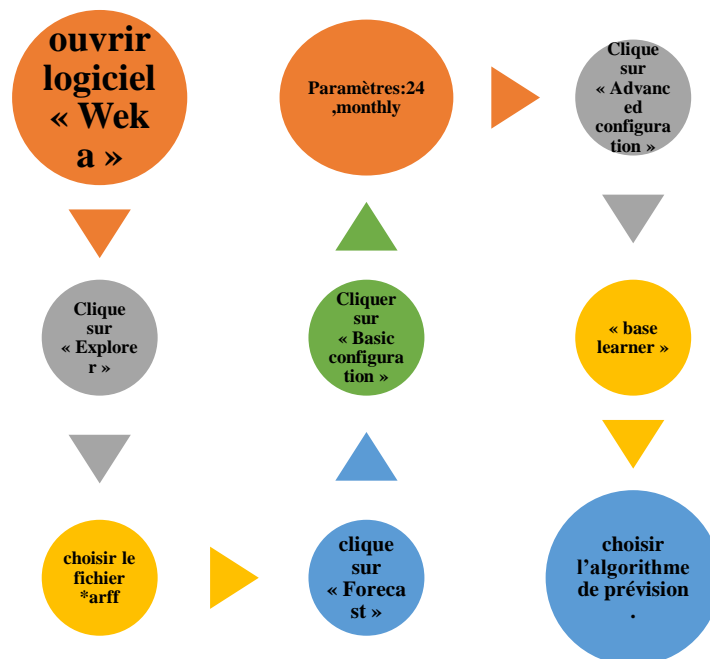


Figure II.16: Paramètres de fonctionnement

6.5 Critères de performance des modèles :

Tout au long de l'analyse, les données l'IA et l'ICH de la région de Ouargla et l'IA de la région de Guelma réelles et les valeurs modélisées ont été comparées. Les mesures statistiques suivantes ont été choisies pour déterminer l'exactitude des modèles : La racine de l'erreur quadratique moyenne (**REQM**), l'erreur moyenne absolue (**EMA**), l'erreur absolue relative (**EAR**) et la racine d'erreur quadratique relative (**REQR**), l'erreur quadratique moyenne (**MSE**) : est très utile pour comparer plusieurs estimateurs, notamment lorsque l'un d'eux est biaisé.

6.5.1 Racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM)

La racine de l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs attendues et réelles est appelée REQM. Il est donné par la formule suivante :

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (IQE_A^i - IQE_P^i)^2} \dots\dots (12)$$

6.5.2 Erreur moyenne absolue (EMA)

L'erreur absolue moyenne évalue l'étendue des erreurs dans une série de prédictions sans tenir compte de leurs signes. Il s'agit d'une estimation des différences absolues entre les valeurs attendues et observées sur l'échantillon de test. Il est défini comme suit :

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |IQE_P^i - IQE_A^i| \dots\dots (13)$$

6.5.3 Erreur absolue relative (EAR)

L'erreur absolue totale est normalisée en la divisant par l'erreur absolue totale de l'indicateur de base dans l'erreur absolue relative.

$$EAR = \left| \frac{IQE_A^i - IQE_P^i}{IQE_P^i} \right| \times 100 \dots\dots (14)$$

6.5.4 Racine d'erreur quadratique relative (REQR)

L'erreur quadratique totale est normalisée en la divisant par l'erreur quadratique totale de l'indicateur de base dans l'erreur quadratique relative. L'erreur est réduite aux mêmes dimensions que la quantité prédite en prenant la racine carrée de l'erreur quadratique relative.

$$REQR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (IQE_P^i - IQE_A^i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (IQE_A^i - IQE^-)^2}} \dots\dots (15)$$

6.5.5 Erreur quadratique moyenne :

L'erreur quadratique moyenne (MSE) d'un estimateur mesure la moyenne des carrés d'erreur, c'est-à-dire la différence quadratique moyenne entre les valeurs estimées et la valeur vraie. Il s'agit d'une fonction de risque, correspondant à la valeur attendue de la perte d'erreur

au carré. Il est toujours non négatif et les valeurs proches de zéro sont meilleures. L'EQM est le deuxième moment de l'erreur (sur l'origine) et incorpore donc à la fois la variance de l'estimateur et son biais [1]

6.5.6 Coefficient de corrélation :

Le terme de corrélation est utilisé dans le langage courant pour désigner la liaison (relation / association) entre 2 variables quelconques. En statistique, le terme de corrélation est réservé pour désigner la liaison entre 2 variables quantitatives (le plus souvent continues).

Domaine de définition : Le coefficient de corrélation est indépendant des unités de mesure des variables, ce qui autorise les comparaisons. La mesure est normalisée, elle est définie entre :

$$-1 < r < +1$$

Lorsque :

R= +1, la liaison entre les deux variables est linéaire, positive et parfaite c.-à-d. la connaissance de fournir la valeur de (et inversement)

R= -1, liaison est linéaire et négative.[9]

6.5.7 Coefficient de détermination :

C'est le carré de coefficient de corrélation

6.6 Modèles d'intelligence artificielle :

On va d'abord appliquer cinq modèles de la série chronologique, des modèles d'arbres aléatoire (RandomTree 'RT'), forêts aléatoires (Random Forest 'RF'), comité aléatoire (Random Committee 'RC'), Ensachage (Bagging) et de Régression Additive (Additive Regression), après en choisit le meilleur modèle et on l'optimiser.

6.7 Présentation des différents modèles :

6.7.1 Modèle d'arbre aléatoire:(RT)

Les arbres aléatoires sont des méthodes prédictives s'appliquant autant aux variables réponses nominales que continues. Les approches ne sont pas particulièrement récentes. Les travaux de Kass (1980) sur l'algorithme CHAID ont essentiellement été réalisés dans le cadre de sa thèse dans les années 1970. Ceux de Breiman (2001) sur les forêts aléatoires datent de la fin du siècle dernier. C'est l'intérêt croissant du secteur de l'informatique pour

les modèles prédictifs et l'augmentation fulgurante de la puissance de calcul qui ont rendu possible leur actuelle popularité. [9]

6.7.2 Modèle de forêt aléatoire : (RF)

Les forêts aléatoires sont une combinaison de prédicteurs d'arbres tels que chaque arbre dépende des valeurs d'un vecteur aléatoire échantillonné indépendamment et avec la même distribution pour tous les arbres de la forêt. L'erreur de généralisation pour les forêts converge vers une limite à mesure que le nombre d'arbres dans la forêt devient grand. [9].

6.7.3 Modèle de Bagging (BG) :

Le mot Bagging est une contraction de Bootstrap Aggregation. Le bagging est une technique utilisée pour améliorer la classification notamment celle des arbres de décision, considérés comme des « classifieurs faibles », c'est-à-dire à peine plus efficaces qu'une classification aléatoire.

En général, le bagging a pour but de réduire la variance de l'estimateur, en d'autres termes de corriger l'instabilité des arbres de décision (le fait que de petites modifications dans l'ensemble d'apprentissage entraînent des arbres très différents). Pour ce faire, le principe du bootstrap est de créer de « nouveaux échantillons » par tirage au hasard dans l'ancien échantillon, avec remise. L'algorithme, par exemple l'arbre de décision, est entraîné sur ces sous-ensembles de données

6.7.4 Modèle Régression Additive (AR) :

Les modèles additifs représentent une généralisation de la **Régression Multiple** (qui est un **modèle linéaire général** particulier). Plus précisément, dans la régression linéaire, un ajustement linéaire des moindres carrés est calculé pour un ensemble de prédicteurs ou variables X, pour prévoir une variable dépendante Y.

6.7.5 Modèle comité aléatoire (RC) :

Chaque classificateur de base est construit en utilisant une graine de nombres aléatoire différente (mais basée sur les mêmes données). la prédiction finale est une moyenne linéaire des prédictions générées par les classificateurs de base individuels. [9]

6.8 Méthodologie de travail:

Dans le cadre de l'élaboration de ce travail concernant l'étude et la comparaison des changements climatiques des régions de (Ouargla) et (Guelma).

On a procédé, après avoir regroupé les données climatiques (température, précipitations et humidité), au calcul des indicateurs chaleur et aridité des deux régions pour une période approximative de trente (30) ans ; (Ouargla : de 1991 à 2021) et (Guelma : de 1981 à 2011).

Par la suite, on a inséré les valeurs des deux indicateurs chaleur et aridité dans le programme « Weka » à savoir le programme spécialisé dans les prévisions à venir.

On a fixé la période prévisionnelle à 24 mois (deux années) (la raison du choix de la durée de cette période réside dans le fait qu'un programme est plus performant plus la base des données est grande et la période de prévisions est courte.

Par la suite on a choisi les modèles sur lesquels doivent s'effectuer les prévisions ainsi que les indicateurs de réalisation adoptés dans l'évaluation de réalisation des modèles.

On procède à la division des données et à la réalisation des prévisions sur plusieurs étapes :

La première étape : 50% des données pour l'étalonnage et 50% pour la validation et c'est le choix habituel. On n'arrive pas à de bons résultats ;

La deuxième étape : 70% des données pour l'étalonnage et 30% pour la validation. On n'arrive pas à de bons résultats ;

La troisième étape : 90% des données pour l'étalonnage et 10% pour la validation. On arrive à de bons résultats que l'on extrait et analyse à travers les courbes et tableaux prévus pour faciliter leur lecture et compréhension.

Au niveau de la troisième étape, il est constaté que le meilleur modèle est (Comité aléatoire) concernant aussi bien l'indicateur chaleur qu'aridité dans les régions de Ouargla et Guelma.

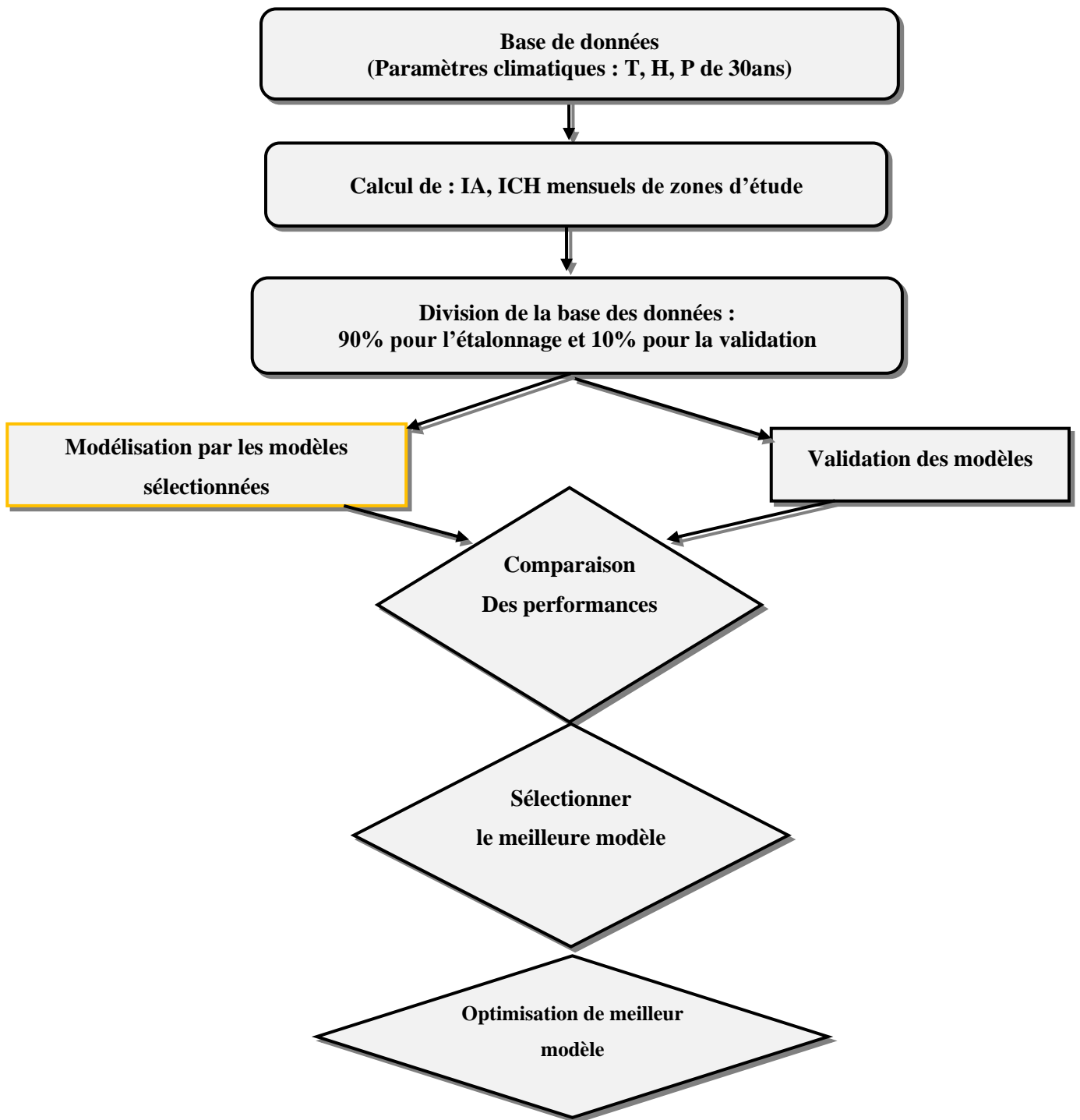


Figure II.17: Méthodologie de travail

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Résultats en fonction des paramètres initiaux :

1.1. Région de Ouargla :

1.1.1. Indice d'aridité :

Le tableau (Tableau III.1) et les courbes ci-dessous représentent les résultats de performance et le coefficient de détermination du cinq modèles en fonction des paramètres initiaux dans la phase d'étalonnage et la phase de validation de l'indice d'aridité de la région de Ouargla. A travers le tableau, on note que lors de la phase d'étalonnage, les meilleurs résultats ont été enregistrés pour le modèle Comité aléatoire avec un coefficient de détermination R^2 :0.9998et des indicateurs de performance $EMA=0.031$, $RRSE=1.4703$, $RAE=1.4599$, $RMSE=0.0653$ et $MSE=0.0043$.

Tableau III.1: Résultats du modèle en fonction des critères de performance et coefficient de détermination dans la phase d'étalonnage et de validation

MODELE	La phase	EMA	RRSE	RAE	RMSE	MSE
RT	Étalonnage	0,0517	4,3011	2,0553	0,191	0,0365
	Test	2,7475	143,8623	140,439	4,7892	22,9361
RF	Étalonnage	0,7144	31,0377	33,606	1,3731	1,8992
	Test	1,6888	75,1467	128,6159	2,5326	6,4142
RC	Étalonnage	0,031	1,4703	1,4599	0,0653	0,0043
	Test	1,6741	80,3622	126,7152	2,7127	7,3585
BG	Étalonnage	1,6792	67,4787	78,9617	2,9965	8,9788
	Test	1,378	71,6137	107,5212	2,3781	5,6554
AR	Étalonnage	1,7206	67,2599	81,0637	2,9859	8,9158
	Test	1,6947	76,0716	130,6635	2,5431	6,4672

Le modèle Arbre aléatoire :

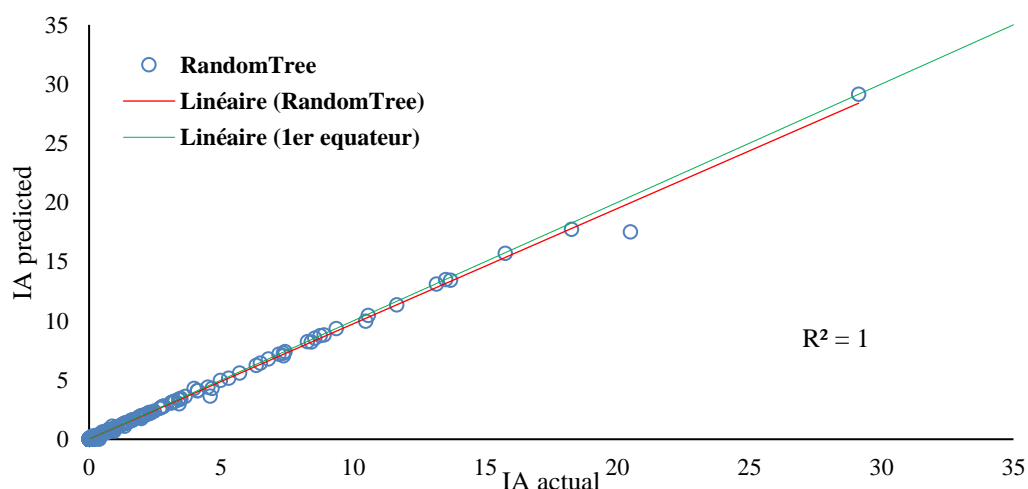


Figure III.1: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

Le modèle Foret aléatoire :

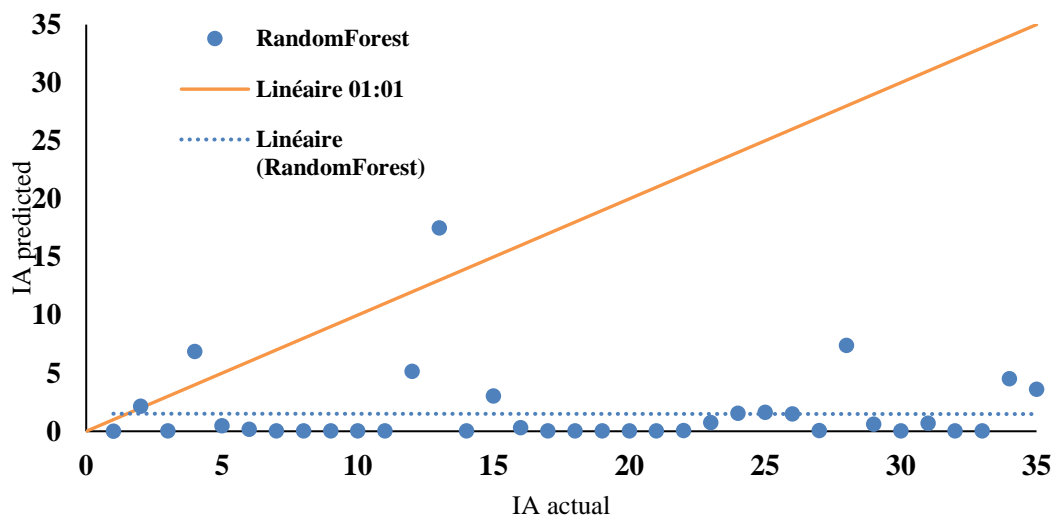


Figure III.2: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

Le modèle Comité aléatoire :

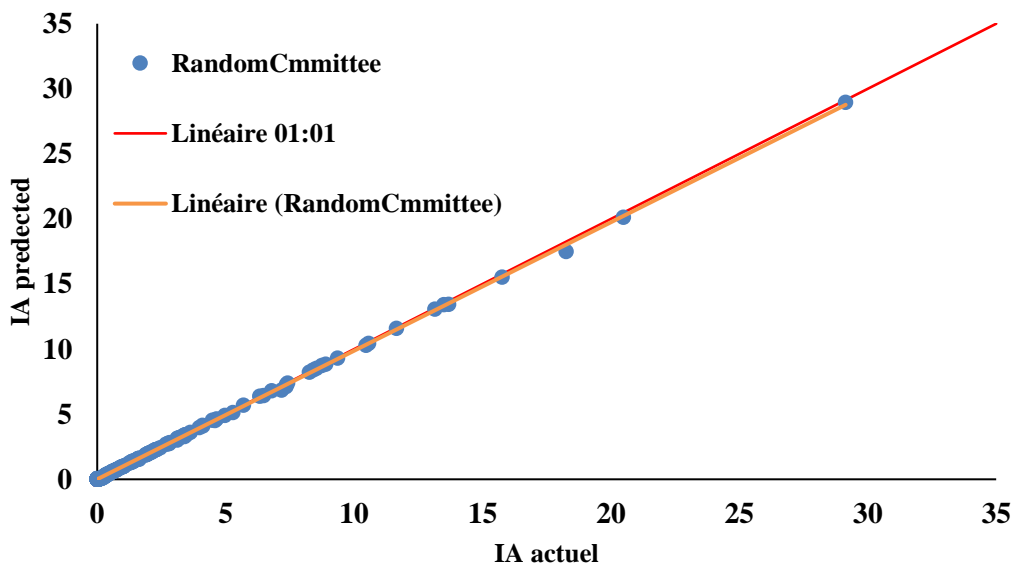


Figure III.3: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

Le modèle Bagging :

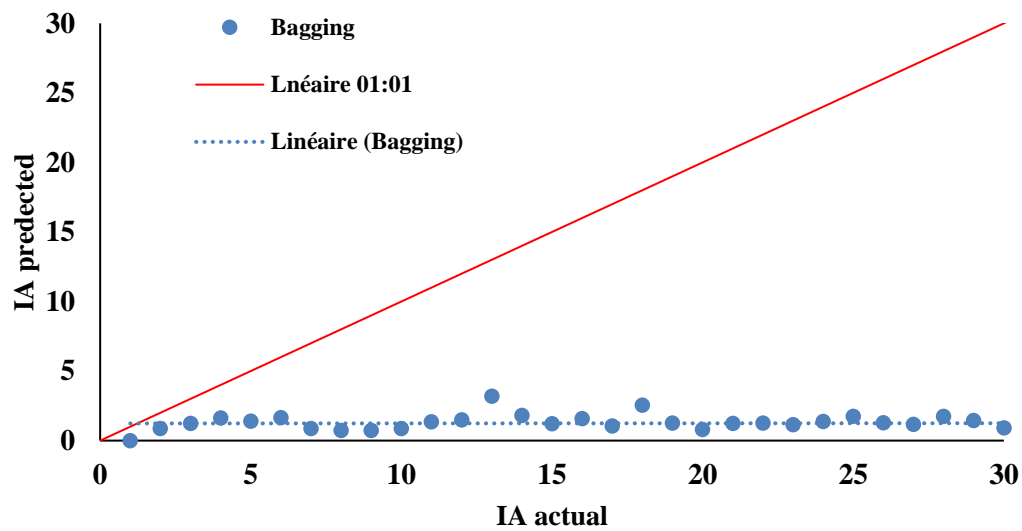


Figure III.4: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

Le modèle Regression Additif :

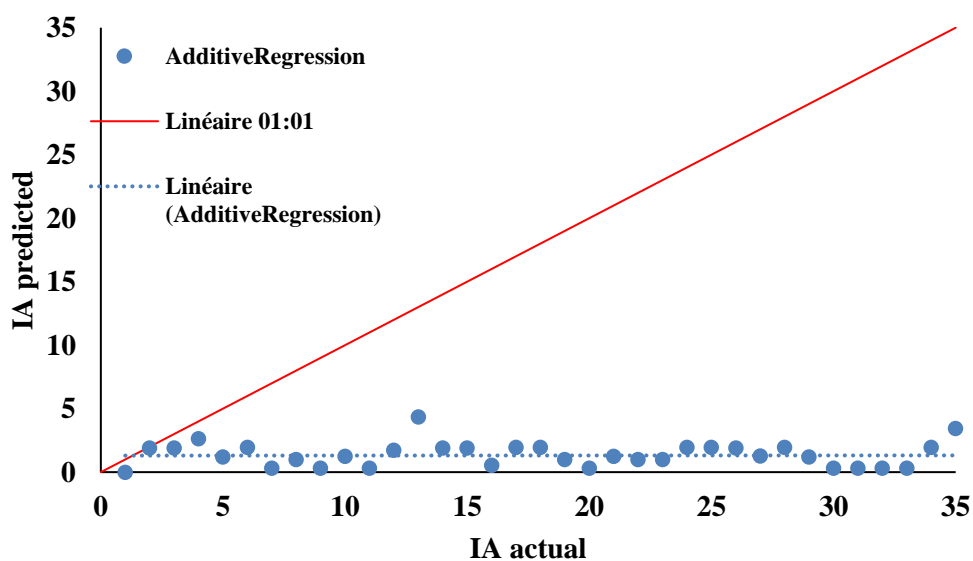


Figure III.5: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

1.1.2. Indice de chaleur :

Le tableau (Tableau III.2) et les courbes ci-dessous représentent les résultats de performance et le coefficient de détermination du cinq modèles en fonction de paramètres initiaux dans la phase d'étalonnage et la phase de validation de l'indice de chaleur de la région de Ouargla. A travers le tableau, on note que lors de la phase d'étalonnage, les

meilleurs résultats ont été enregistrés pour le modèle Comité aléatoire avec un coefficient de détermination R^2 :0.9999et des indicateurs de performance EMA=0.0436, RRSE=0.9229, RAE=0.7453, RMSE=0.0656et MSE=0.0043

Tableau III.2: Résultats du modèle en fonction des critères de performance et coefficient de détermination dans la phase d'étalonnage et de validation

MODELE	La phase	EMA	RRSE	RAE	RMSE	MSE
RT	Étalonnage	0,0741	1,8129	1,2706	0,128	0,0164
	Test	3,7406	73,1335	67,263	4,9236	24,2416
RF	Étalonnage	0,9618	17,7694	16,4425	1,2645	1,599
	Test	2,8991	50,9637	50,9637	3,5154	12,3578
RC	Étalonnage	0,0436	0,9229	0,7453	0,0656	0,0043
	Test	3,2399	58,3621	55,7412	4,0571	16,4597
BG	Étalonnage	2,0017	37,3427	34,299	2,6458	7,0003
	Test	2,7948	55,3178	49,2471	3,7534	14,0881
AR	Étalonnage	2,4626	47,399	42,2097	3,355	11,2563
	Test	5,5957	94,3867	96,7988	6,5454	42,8429

Le modèle Arbre aléatoire :

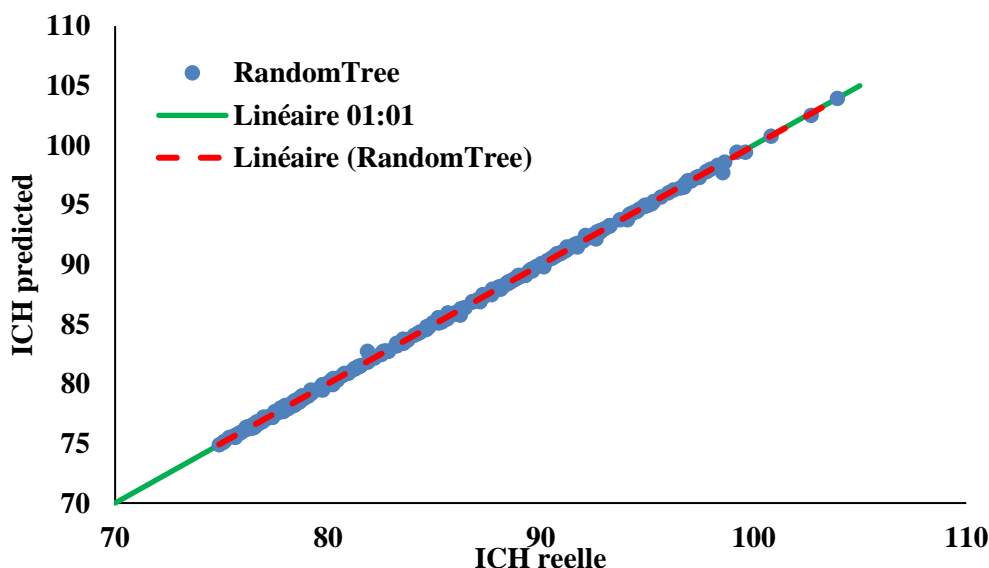


Figure III.6: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

Le modèle Foret aléatoire :

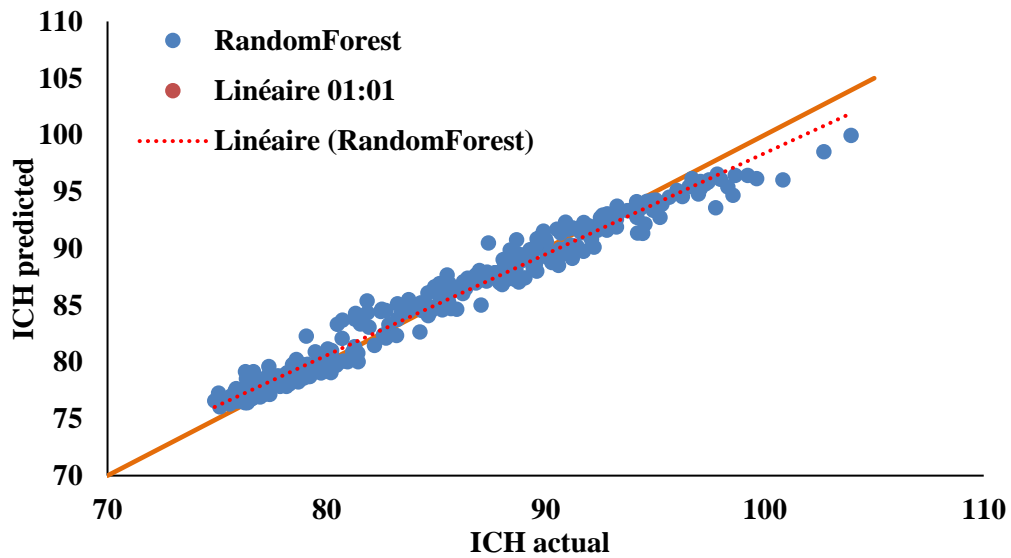


Figure III.7: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

Le modèle Comité aléatoire :

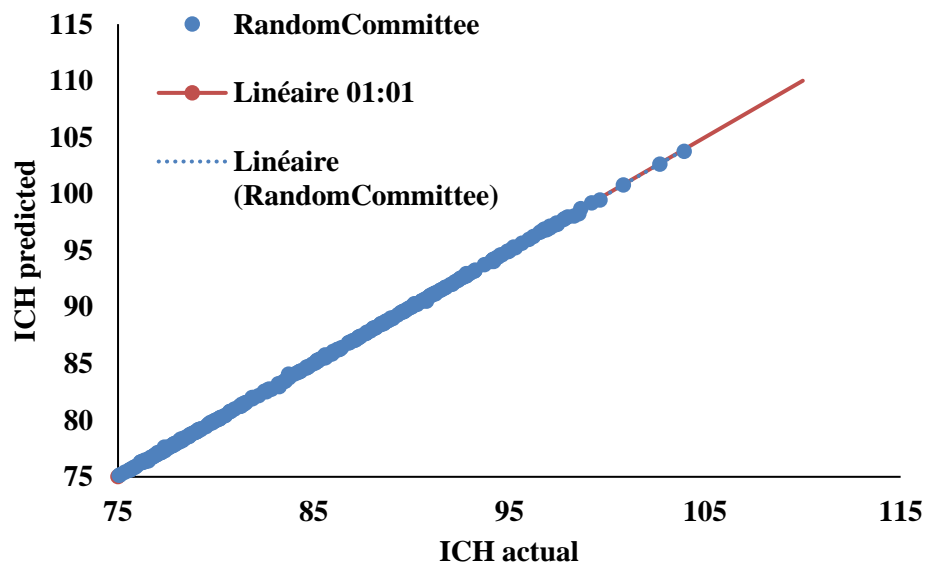


Figure III.8: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

Le modèle Bagging :

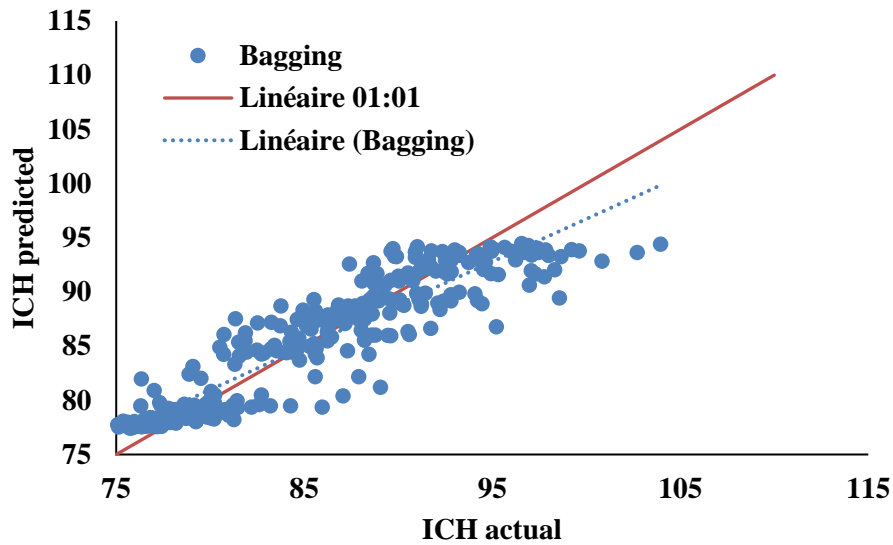


Figure III.9: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

Le modèle Regression Additif :

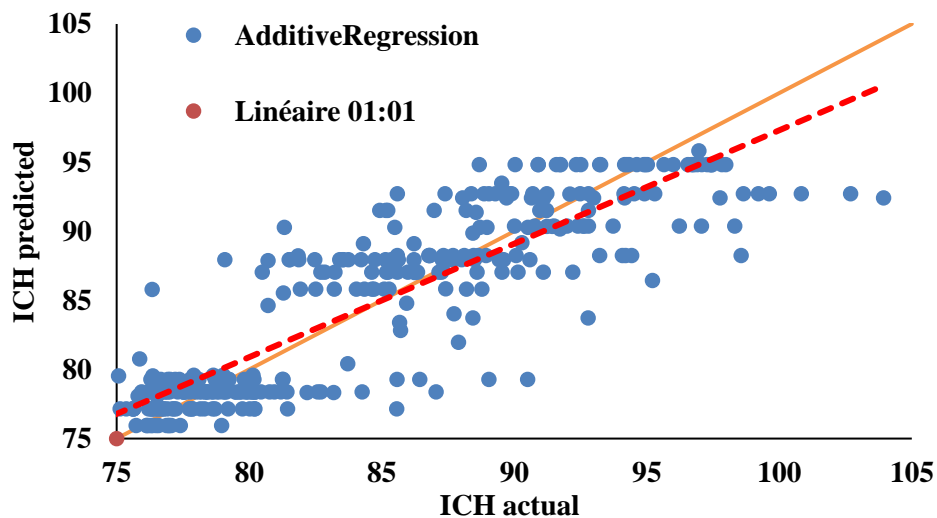


Figure III.10: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice de chaleur de la zone de Ouargla dans la phase d'étalonnage

1.2 Région de Guelma :

1.2.1 Indice d'aridité :

Le tableau (Tableau III.3) et les courbes ci-dessous représentent les résultats de performance et le coefficient de détermination du cinq modèles en fonction des paramètres initiaux dans la phase d'étalonnage et la phase de validation de l'indice de chaleur de la région de Ouargla. A travers le tableau, on note que lors de la phase d'étalonnage, les

meilleurs résultats ont été enregistrés pour le modèle Comité aléatoire avec un coefficient de détermination R^2 :0.9999et des indicateurs de performance EMA=0.2379, RRSE=1.5779, RAE=1.2909, RMSE=0.4338et MSE=0.1882

Tableau III.3: Résultats du modèle en fonction des critères de performance et coefficient de détermination dans la phase d'étalonnage et de validation

MODELE	La phase	EMA	RRSE	RAE	RMSE	MSE
RT	Étalonnage	0,3358	3,847	1,8276	1,0555	1,114
	Test	26,9882	173,5348	150,3616	42,145	177,2169
RF	Étalonnage	5,6226	28,8719	30,6865	7,9199	62,7255
	Test	16,0395	84,4477	88,5921	20,5158	420,8977
RC	Étalonnage	0,2379	1,5779	1,2909	0,4338	0,1882
	Test	15,9579	90,8326	88,493	22,0526	486,3151
BG	Étalonnage	12,0661	64,1837	65,8265	17,6075	310,0257
	Test	13,9308	75,0424	76,5103	18,2558	333,2742
AR	Étalonnage	13,3011	66,6015	72,5341	18,2731	333,9058
	Test	17,2718	93,5669	94,6128	22,7813	518,9876

Le modèle arbre aléatoire :

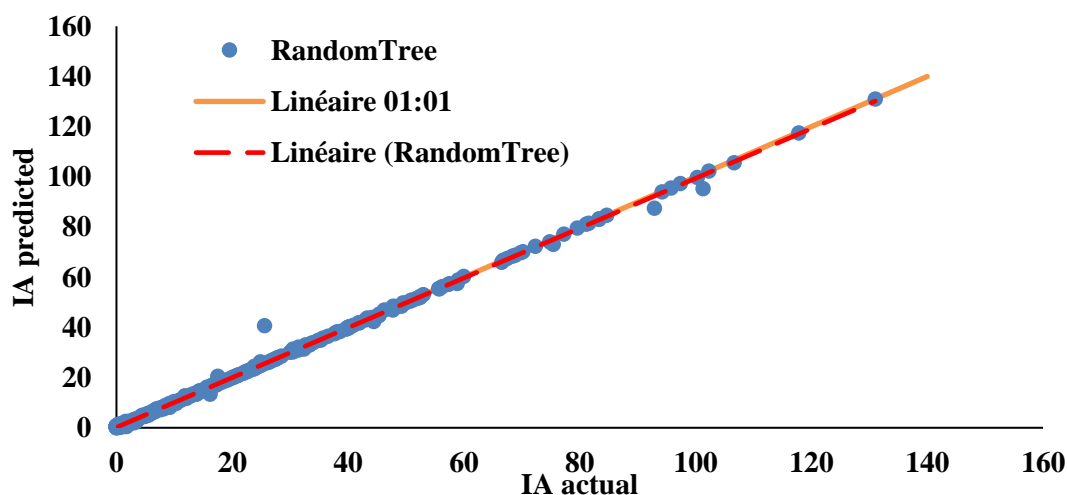


Figure III.11: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage

Le modèle forêt aléatoire :

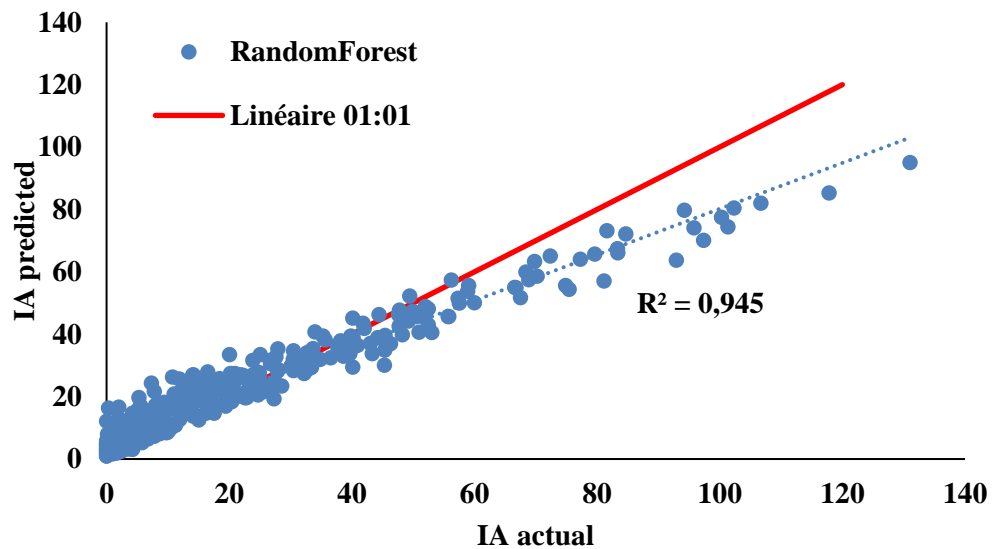


Figure III.12: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage

Le modèle Comité aléatoire :

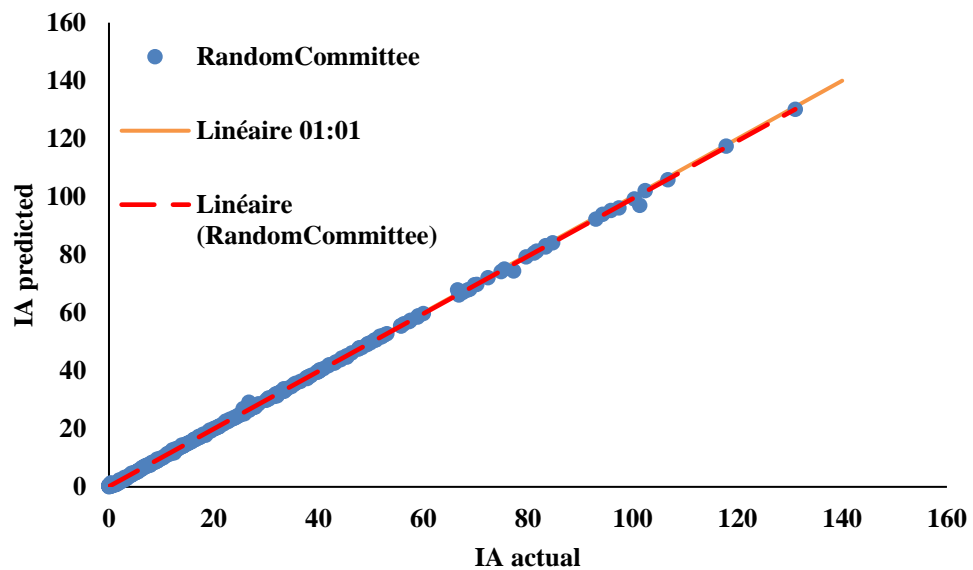


Figure III.13: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage

Le modèle Bagging :

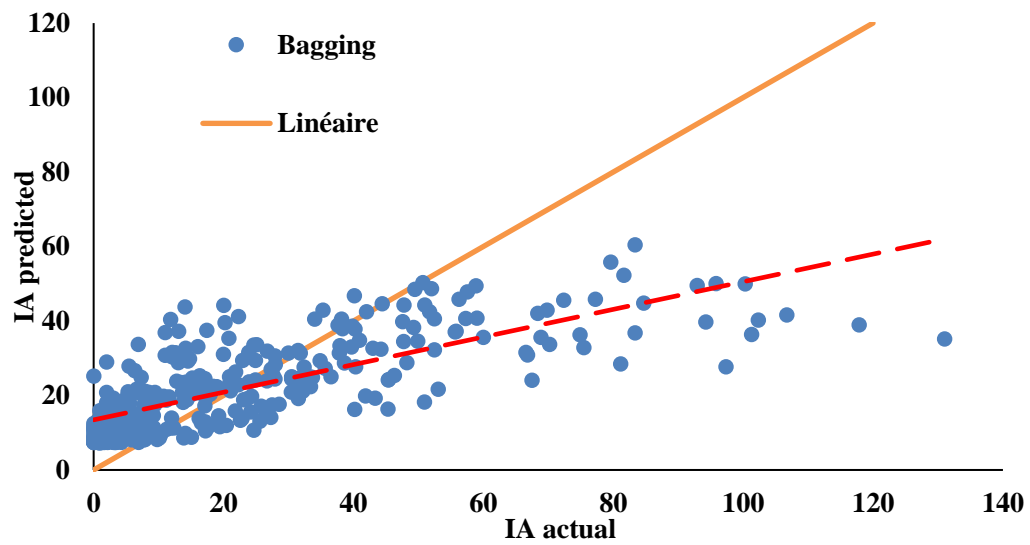


Figure III.14: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage

Le modèle Additive Régression :

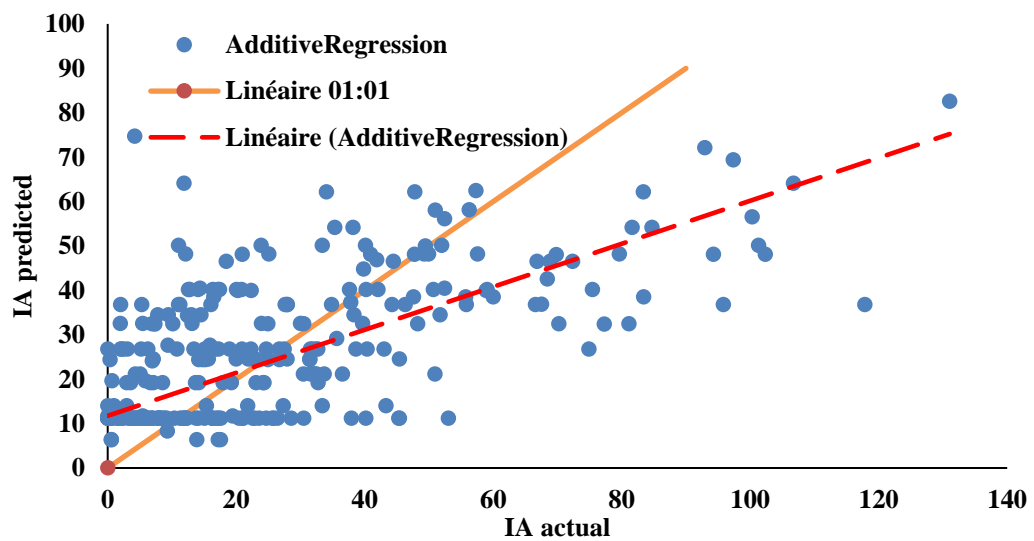


Figure III.15: Comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites de l'indice d'aridité de la zone de Guelma dans la phase d'étalonnage

2. Optimisation du meilleur modèle pour les deux zones et les deux indices climatiques :

Les résultats obtenus montrent que le meilleur modèle de prévision pour les deux zones d'étude (Ouargla et Guelma) et les deux indices climatiques (l'indice d'aridité et l'indice de chaleur) est : « **Random Committee (comité aléatoire)** ».

On entreprend maintenant son perfectionnement à travers des modifications apportés à certains paramètres. A travers plusieurs modifications aléatoires on est arrivé aux réalisations « **graine d'algorithme** » en choisissant le numéro 1 puis le 2, le 3 et enfin le 4 et on compare les indicateurs entre les quatre choix.

- **Graine aléatoire :**

Une graine aléatoire (ou état de graine, ou simplement graine) est un nombre (ou vecteur) utilisé pour initialiser un générateur de nombres pseudo-aléatoires. Pour qu'une graine soit utilisée dans un générateur de nombres pseudo-aléatoires, elle n'a pas besoin d'être aléatoire. En raison de la nature des algorithmes de génération de nombres, tant que la graine d'origine est ignorée, le reste des valeurs générées par l'algorithme suivra la distribution de probabilité de manière pseudo-aléatoire.

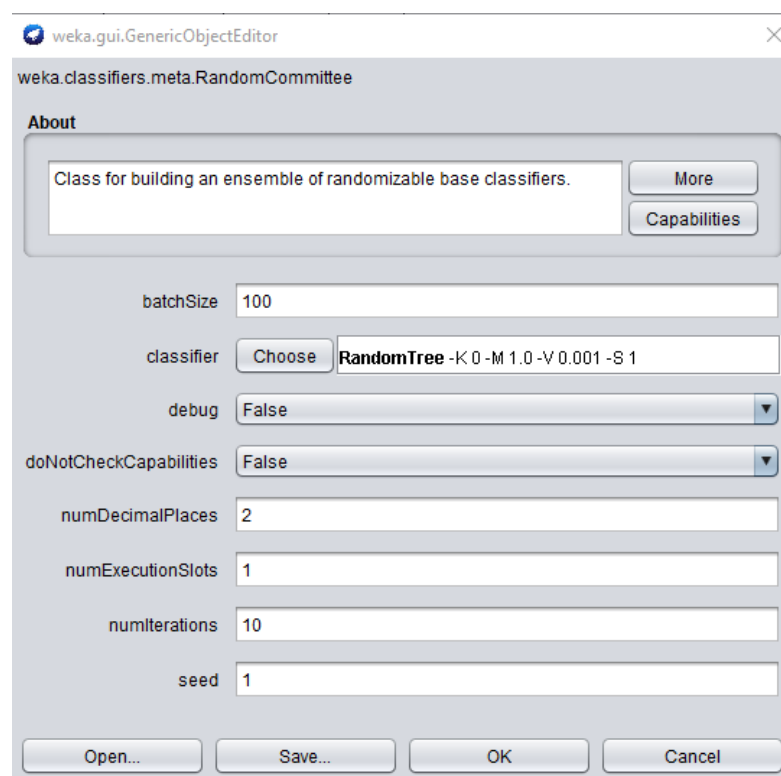


Figure III.16: Fenêtre de propriétés

Les résultats sont représentés dans les tableaux **Tableau III.4** **Tableau III.5** **Tableau III.6** et les courbes **Figure III.17** **Figure III.18** **Figure III.20** **Figure III.22**:

2.1 Région de Ouargla :

2.1.1 Indice d'aridité :

Le tableau (**Tableau III.4**) et la courbe (**Figure III.17**) représentent les résultats des critères de performance du modèle Comité aléatoire de l'indice d'aridité de la région de Ouargla en fonction des différentes graines. Par observation, on trouve que les bons résultats sont en fonction de:(graine 2 et graine 4). Mais ils sont très proches. Donc on fait une comparaison entre (graine 2 et graine 4).

Tableau III.4: Résultats de critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire

	Graine (Seed)			
	1	2	3	4
MAE	0,0517	0,0328	0,0382	0,035
RRSE	4,3011	1,8195	2,16	1,7169
RAE	2,0553	1,5203	1,7772	1,6344
RMSE	0,191	0,0813	0,0963	0,0764
MSE	0,0365	0,0066	0,0093	0,0058

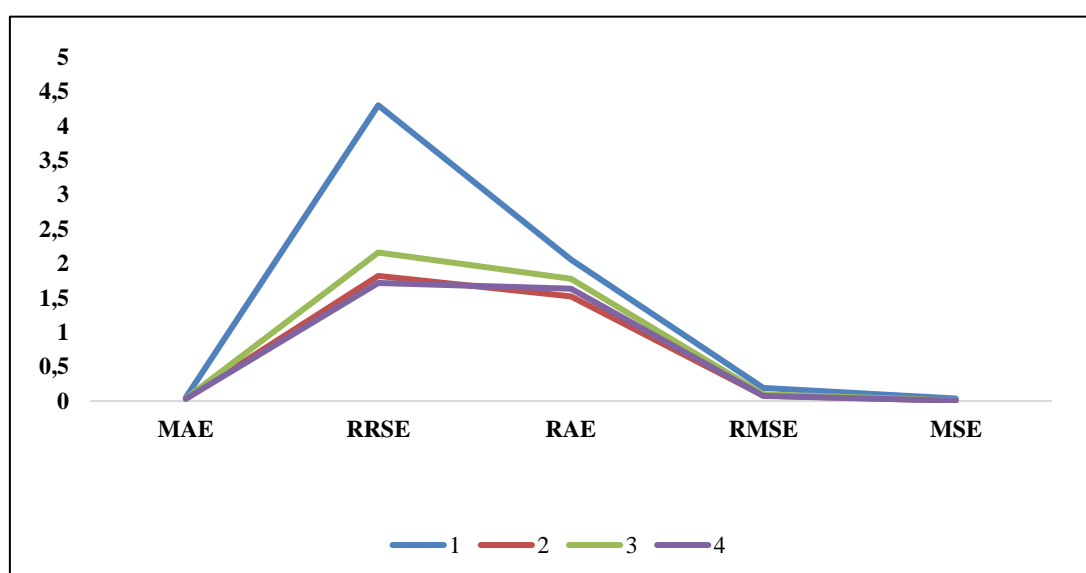


Figure III.17: Critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire (Indice d'aridité de Ouargla)

Les résultats obtenus sont représentés dans la courbe (Figure III.18) ci-après :

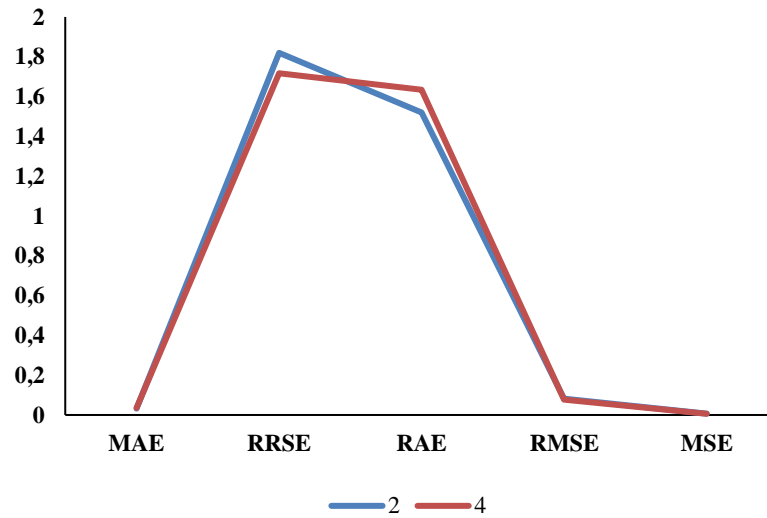


Figure III.18: Critères de performance en fonction de seed 2 et seed 4 du modèle Comité aléatoire (Indice d’aridité de Ouargla)

Par observation, on trouve que le meilleur résultat est en fonction de (seed 4).

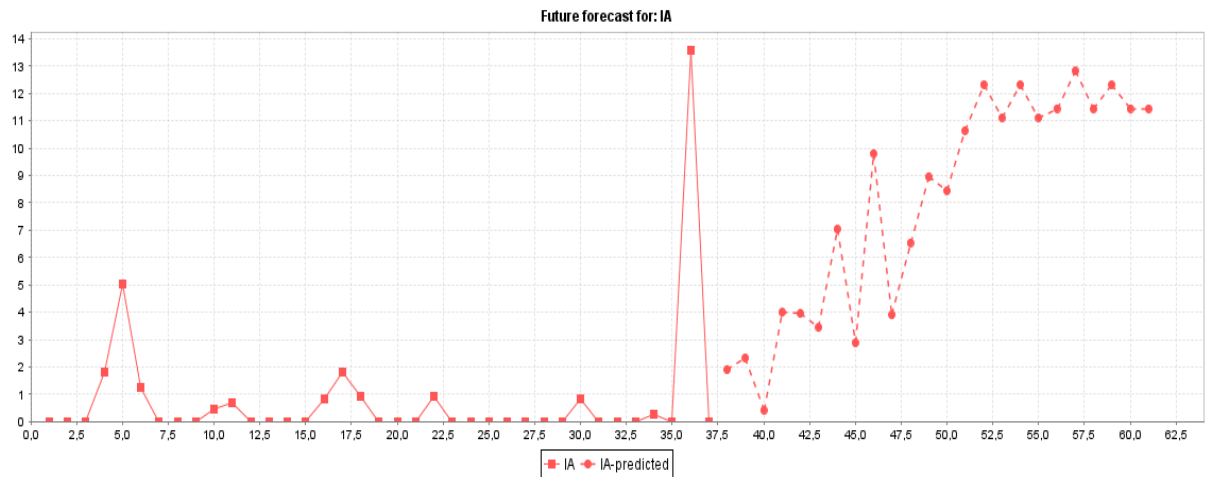


Figure III.19: Séries chronologiques de l’indice d’aridité de Ouargla

La figure (Figure III.19) représente les résultats de prévision de futur de l’indice d’aridité de la région de Ouargla dans la phase de validation.

2.1.2 Indice de chaleur :

Le tableau (Tableau III.5) et la courbe (Figure III.20) représentent les résultats des critères de performance du modèle Comité aléatoire de l’indice de chaleur de la région de

Ouargla en fonction des différentes graines. Par observation, on trouve que les bons résultats sont en fonction de:(seed 2).

Tableau III.5: Résultats de critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire

	Graine (seed)			
	1	2	3	4
MAE	0,0436	0,0432	0,0433	0,0426
RRSE	0,9229	0,8128	0,8782	0,9136
RAE	0,7453	0,7224	0,7489	0,7233
RMSE	0,0656	0,0623	0,0618	0,0656
MSE	0,0043	0,0039	0,0038	0,0043

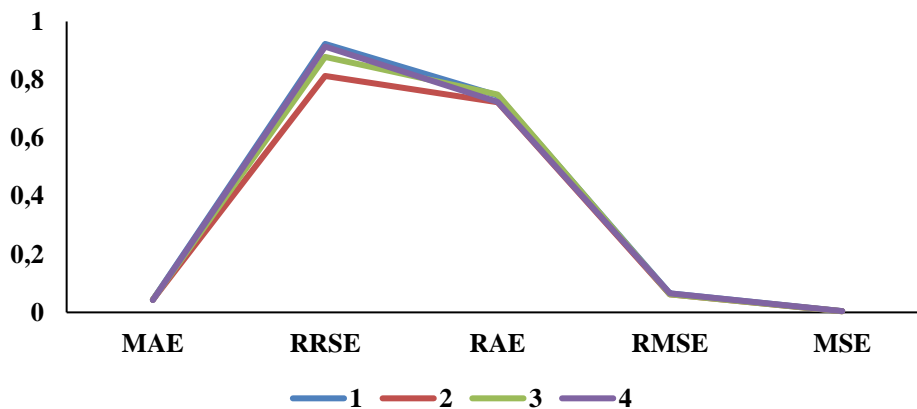


Figure III.20: Critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire (Indice de chaleur de Ouargla)

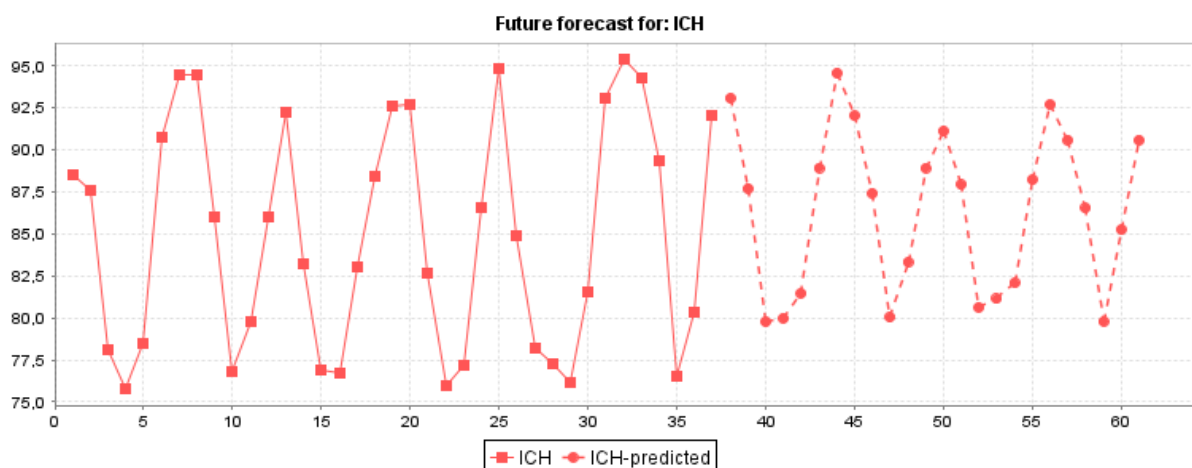


Figure III.21: Séries chronologiques de l'indice de chaleur de Ouargla

La figure (Figure III.21) représente les résultats de prévision de futur de l'indice de chaleur de la région de Ouargla dans la phase de validation.

Analyse : on remarque une stabilité dans les mêmes valeurs de l'indice de chaleur au cours de la période de prévision.

2.2 Zone de Guelma :

2.2.1 Indice d'aridité :

Le tableau (Tableau III.6) et la courbe (Figure III.22) représentent les résultats des critères de performance du modèle Comité aléatoire de l'indice de chaleur de la région de Ouargla en fonction des différentes graines. Par observation, on trouve que les bons résultats sont en fonction de:(seed 3).

Tableau III.6: Résultats de critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire (Indice d'aridité de Guelma)

	Seed			
	1	2	3	4
MAE	0,2379	0,2107	0,198	0,257
RRSE	1,5779	1,356	1,1134	1,8888
RAE	1,2909	1,1505	1,0785	1,4038
RMSE	0,4338	0,3719	0,305	0,5181
MSE	0,1882	0,1383	0,0934	0,2684

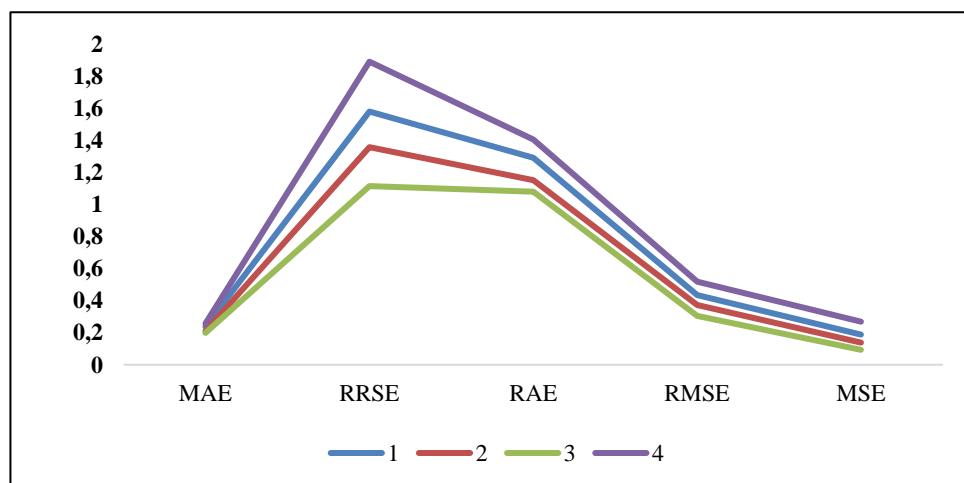


Figure III.22: Critères de performance en fonction des différentes graines du modèle Comité aléatoire (Indice d'aridité de Guelma)

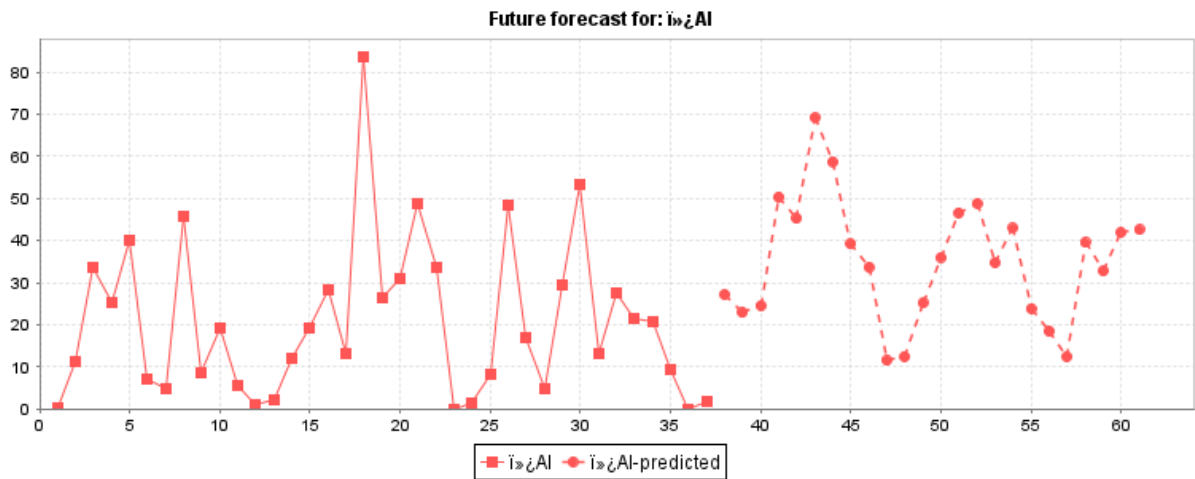


Figure III.23: Séries chronologiques de l'indice d'aridité de Guelma

La figure (Figure III.23) représente les résultats de prévision de futur de l'indice d'aridité de la région de Guelma dans la phase de validation.

Analyse : on remarque une diminution de l'indice d'aridité au cours de la période de prévision.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le changement climatique constitue un facteur d'aggravation des risques naturels déjà connus en Algérie, le réchauffement planétaire est désormais une réalité incontestable et ses effets sur le climat global et les climats régionaux sont pratiquement inévitables dans le siècle à venir.

L'objectif de cette étude est d'étudier le changement climatique par les indices climatiques dans les régions de Ouargla de Guelma par l'utilisation de logiciel de modélisation « Weka ». Avant de commencer l'étude on a jugé qu'il était nécessaire de définir certains concepts clés en relation avec le climat et le changement climatique.

Pour suivre l'évolution du climat, les scientifiques utilisent des modèles dits des modèles climatiques. Ces modèles peuvent déterminer l'évolution du climat à l'aide des scénarios qui décrivent l'évolution de certains éléments clés. Ensuite pour déterminer les impacts de ce changement, ils utilisent des modèles d'impacts qui prennent comme données d'entrée les variables climatiques issues des simulations par les modèles climatiques. Jusqu'à présent, la modélisation du changement climatique et ses impacts présentent une certaine incertitude liée à plusieurs facteurs (incertitude des scénarios, incertitude des modèles et l'incertitude des modèles d'impacts).

Pour atteindre à l'objectif de notre étude, on va collecter les séries climatologiques

(Température, précipitations, humidité) de 30 ans (Ouargla :1991-2021 et Guelma :1980-2010), Avant de commencer l'étude statistiques, nous avons comblé les lacunes d'observation par la méthode de régression linéaire, ensuite nous avons calculé l'indice d'aridité et de chaleur pour la région de Ouargla et seulement l'indice d'aridité pour la région de Guelma à cause de l'absence de données (humidité) de la région de Guelma.

Dans une recherche bibliographique, on a traité de généralités liées au climat et au changement climatiques, leurs causes, conséquences et impacts sur les différents secteurs (santé, agricole et eau).

La présente étude axe sur les régions de Ouargla et Guelma, les stations météorologiques, les instruments de mesures utilisés en météo, les données climatiques utilisées. Ensuite, on présente un article bibliographique sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique afin de modéliser des séries chronologiques.

On a choisi cinq modèles différents de la série chronologique, qui sont (Arbre aléatoire ; Forêt aléatoire ; Comité aléatoire ; Ensachage (Bagging) et Regression additif), à comparer entre eux et choisir le modèle optimal qui a donné la valeur la plus faible de critères de performance, qui est le modèle Comité **aléatoire** dans des conditions initiaux.

Conclusion Générale

On a conclu que pour une bonne et efficace performance de prédiction, il vaut mieux choisir les conditions idéales pour son travail, qui sont : (pourcentage de test, nombre de graine, nombre de temps de prévision).

On a fait une prévision de l'indice d'aridité et l'indice de chaleur pour une période de deux ans pour les deux régions (Ouargla: 2022-2023 et Guelma: 2011-2012) sur la base des séries chronologiques précédentes de trente ans (de 1991 à 2021 et de 1980 à 2010) respectivement pour les zones d'étude en utilisant le modèle Comité aléatoire, avec un coefficient de détermination **$R^2:0.9998$** et des indicateurs de performance **EMA=0.031, RRSE=1.4703, RAE=1.4599, RMSE=0.0653** et **MSE=0.0043** pour les prévisions de l'indice d'aridité de Ouargla et un coefficient de détermination **$R^2:0.9999$** et des indicateurs de performance **EMA=0.0436, RRSE=0.9229, RAE=0.7453, RMSE=0.0656** et **MSE=0.0043** pour les prévisions de l'indice de chaleur de Ouargla et avec un coefficient de détermination **$R^2:0.9999$** et des indicateurs de performance **EMA=0.2379, RRSE=1.5779, RAE=1.2909, RMSE=0.4338** et **MSE=0.1882** pour les prévisions de l'indice d'aridité de la région de Guelma . puis , on entreprend son perfectionnement à travers des modifications apportés à certains paramètres. A travers plusieurs modifications aléatoires, on est arrivé aux réalisations « **graine d'algorithme** » en choisissant **le numéro 1 puis 2, le 3 enfin le 4** et on compare les indicateurs entre les quatre choix.

On a conclu que les changements dans les valeurs prévues de l'indice d'aridité sont apparus en augmentation, ce qu'on interprète comme la présence de changement climatique claire, et les valeurs prévues de l'indice de chaleur sont apparues en stabilisation, ce qu'on interprète comme la présence de changement climatique à un rythme faible dans la région de Ouargla , et dans la région de Guelma .on a conclu que les changements dans les valeurs prévues de l'indice d'aridité sont apparues en diminution, que 'on explique comme la présence de changement climatique faible en l'absence de données climatologiques permettant de calculer l'indice de chaleur .

L'augmentation de l'indice de chaleur dans les années à venir nous oblige à prendre certaines mesures pour éviter les maladies de la santé qui liées à la chaleur.

Conclusion Générale

Recommandations :

Comme perspectives à ce travail, il est important de considérer les points suivants :

- Les ressources en eau délibérément exploitées dans la région de Ouargla sont les eaux souterraines. Fin de les préserver face aux changements climatiques, on évitait de jeter de l'eau polluée sur les couches superficielles. Et améliorer l'utilisation journalière de l'eau et non excessive. Réglementation du prélèvement d'eau au niveau des nappes souterraines.
- Les ressources en eaux exploitées dans la région de Guelma sont les eaux de barrages, fin de les préserver face aux changements climatiques, en diminue de l'évaporation sur les lacs des barrages-réservoirs. Protection des zones humides en tant que lieu d'habitat des espèces faunistiques locales et migrantes.

Références bibliographiques

1. (ARMSTRONG, J. SCOTT; COLLOPY, FRED (1992). "Mesures d'erreur pour la généralisation des méthodes de prévision : comparaisons empiriques " (PDF). Journal international de prévision. 8 (1) : 69-80. Cite SeerX 10.1.1.423.508. Doit : 10.1016/0169-2070(92)90008-w.)
2. AIDOU, AHMED. (2000). "Fonctionnement Des Ecosystemes Mediterraneens."
3. BAGNOULS F AND GAUSSEN, HENRI. (1952). "Indice Xérothermique," 10–16.
4. BAGNOULS, F., AND. GAUSSEN H. 1957. "Les Climats Biologiques et Leur Classification." Annales de Géographie 66 (355) : 193–220.
5. BELTRANDO GERARD. (2000) "La climatologie : une science géographique. In : L'information géographique", volume 64, n°3, pp.241-261.doi : 10.3406/ingeo.2000.2705http://www.persee.fr/doc/ingeo_0020093_2000_num_64_3_2705Document généré le 16/10/2015
6. BENACER, M. ET AL. (2018). Mémoire En Vue de l ' Obtention du Diplôme de Master Thème : "Le stress hydrique en Algérie : cas de la wilaya de Guelma."
7. BERKAL, ISMAIEL. (2016) école nationale supérieure agronomique (ENSA, A.) "Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride. Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie", p. 200.
8. BOUZIANI M., (2006.) - L'eau dans tous ses états. Ed. Dar El Gharb, Algérie, 260p.
9. BREIMAN, L. (2001) 'No Title', pp. 1–33.
10. Colmet-Daâge Raphaël, Malet Nathalie et Dufresne Christiane (2019) ; "Changement climatique et données météorologiques infrarégionales en méditerranée occidentale " Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes Laboratoire Environnement Ressource Provence Azur Corse. Ode/ul/ler-pac/19-02. 51pages
11. DAGET, PHILIPPE. (1977). "Le Bioclimat Méditerranéen : Caractères Généraux, Modes de Caractérisation. "Végétation 34 (1) : 1–20.
12. DAGET, PHILIPPE. (1977). "Le Bioclimat Méditerranéen : Caractères Généraux, Modes de Caractérisation. "Végétation 34 (1) : 1–20.
13. DE MARTONNE, EM. (1926) ; "Une nouvelle fonction climatologique : l'Indice d'aridité : L'Indice d'aridité, Paris : Imprimerie Gauthier-Villars", 1 vol. (10 p.- [1] f. de dépl. : ill. ; In-8°
14. DERRID AREZKI (1990) ; "Etude des populations de Cedrusatlantica M. en Algérie" ; thèse, Doctorat : Ecologie : Toulouse : Université Paul Sabatier : 288 pages
15. DES, F. ET AL. (No date) "Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien", pp. 2013–2014.
16. DUMAS, P., RIBOLI-SASCO, L., SPYRATOS, V & KURITA, F., (2005), "Fonctionnement du système climatique, perturbations humaines, dérèglements dangereux", Pp17.
17. DUSBOIS, M., (2008), "Cycle solaire et réchauffement climatique." <http://www.tv5.org/climats>.
18. EMBERGER, L. (1942). "Un projet de classification des climats du point de vue phytogéographique". Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse,
19. FOURIER, J. (2012) "Corrélation et régression linéaire simple".
20. GORCZINSKI W. (1920). Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la climatologie. Geographic Annaler 2: 324–331.
21. KARPE H. J., (1990).- "Climate and development. Climate change and variability and the resulting social. Economic", 1-10.
22. KHIDER, M. (no date) .Doctorat en sciences en : Architecture Intitulé L ' influence des contraintes physiques sur l "urbanisation des établissements humains, cas de l ' agglomération de Guelma GUECHI Imen".

Références bibliographiques

23. MOKHTARI, N, R MRABET, P Le bailly, and L Bock. (2013). "Spatialisation Des Bioclimats, de L'Aridité et Des Étages de Végétation Du Maroc,"50–66.
24. MORICE, C. P., J. J. KENNEDY, N. A. RAYNER, AND P. D. JONES (2012), "Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates": The HadCRUT4 data
25. NANGOMBE, S., ZHOU, T., ZHANG, W., WU, B., HU, S., ZOU, L., & LI, D. (2018). Record-breaking climate extremes in Africa under stabilized 1.5 °C and 2 °C global warming scenarios. *Nature Climate Change*, 8(5), 375-380. doi: 10.1038/s41558-018-0145-6
26. NICHANE M., KHELIL M.A ; (2015) "Changements climatiques et ressources en eau en Algérie vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation ". Article: Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°21, March 2015, pp. 15-23 © 2015 All rights reserved, Legal Deposit 1266-2002; [2]
27. NOURY BENABADJI ET BOUAZZA MOHAMMED, (2000) "Contribution à une étude bioclimatique de la steppe à Artemisia herba-alba Asso. Dans l'Oranie (Algérie occidentale) ", *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 11, no 2, juin 2000, p. 117-23
28. PARRY MARTIN L., (1991). – "The potential socio-economic effects of climate change". Nairobi, UNEP: 1-25.
29. RAMEAU, J-C, D MANSION, G DUME, AND C GAUBERVILLE. (2008). "Flore Forestière Française, Région Méditerranéenne." Institut Pour Le Développement Forestier ; ministère de L'agriculture et de La Pêche.
30. ROUSSET NATHALIE, ARRUS RENE, (2006); "L'agriculture du Maghreb au défi du changement climatique : quelles stratégies d'adaptation face à la raréfaction des ressources hydriques " Communication à WATMED 3,3 conférence internationale sur les e Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen, Tripoli (Liban), 1 -3 novembre 2006
31. SIMONE RUSSO1, ANDREA F MARCHESE2, J SILLMANN3 AND GIUSEPPINA IMMÉ (2016) "When will unusual heat waves become normal in a warming Africa "Published 12 May 2016 • © 2016 IOP Publishing Ltd
32. STEWART P, (1969) "Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique ", *Bull Soc Hist Nat Afrique. Du Nord*, vol. 59, nos 1-4, 1969, p. 23-36.
33. SULTAN BENJAMIN, ROUDIER P., TRAORE S. (2015). "Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest". In : SULTAN BENJAMIN (ED.), LALOU RICHARD (ED.), Amadou Sanni M. (ed.), Oumarou A. (ed.), Soumaré M.A. (ed.). *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*. Marseille: IRD, p. 209-225. (Synthèses). ISBN 978-2-7099-2146-6.
34. THOMAS, F. STOCKER, QIN DAHE, PLATTNER GIAN-KASPER, AND M.B TIGNOR MELINDA; (2013). IPCC : "CLIMATE CHANGE"
➤ **Sans nom:**
35. ANONYME, (2019)"Evaluation du potentiel démographique et de production des élevages camélins en fonction de différents paramètres et identification des trajectoires d'élevages dans la région de Ouargla". And M. (2019) 'FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES Mémoire Présenté par: Mme HADJERES Salima Melle RAOUANE Cherifa'
36. CLIMATE CHANGE (2001) : The Scientific Basis : Contribution of Working Group I
37. FORMMES, sans date, p09
38. GIEC (2020) : Rapport N° 5 de Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat en janvier 2020.

Références bibliographiques

39. GIEC., (2007). "Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat" [Équipe de rédaction principale, PACHAURI, R.K. ET REISINGER, A. (publié sous la direction de GIEC, Genève, Suisse, p. 30.
40. GREENFACTS (2008) "Changement climatique : un résumé du rapport d'évaluation 2007 du GIEC", La Météorologie, 8(58), p. 21. Available at : <http://hdl.handle.net/2042/18204>
41. ONERC., (2007), "Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique", Paris, ISBN : 978-2-11-00-6618-0.

Références site web

1. [1] <https://bu.umc.edu.dz/theses/biologie/FAR6649.pdf>
2. [2] <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/125/12/1/55229>
3. [3] <https://www.rapport-gratuit.com/memoire-de-fin-detudes-phenomenes-relies-aux-conditions-meteorologiques/>
4. <https://datascientest.com/algorithmes-de-boosting-adaboost-gradient-boosting-xgboost#:~:text=Les%20algorithmes%20de%20Boosting%20se,des%20%C2%AB%20weak%20learner%20%C2%BB%20pr%C3%A9c%C3%A9dents>
5. https://lrouviere.github.io/TUTO_GRANDE_DIM/mod-add.html
6. [6] <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9t%C3%A9orologie#:~:text=La%20m%C3%A9t%C3%A9orologie%20est%20une%20science,la%20temp%C3%A9rature%20et%20l'humidit%C3%A9>.
7. <https://fsnv.univsetif.dz/images/telecharger/SA/M1%20Production%20v%C3%A9g%C3%A9tale%2019>
8. <https://www.google.com/search?q=FAO&oq=FAO&aqs=chrome..69i57j0i27113.4420j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
9. <https://www.google.com/search?q=infoclimat&oq=info&aqs=chrome.1.69i57j69i59j0i27112.9005j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
10. <https://donnees.banquemondiale.org/>

