

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Hassiba Benbouali de Chlef  
Faculté Génie Civil et d'Architecture  
Département Hydraulique



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT

Filière : Hydraulique

Spécialité : Aménagement Hydraulique

Par

**AFAF BOUKLIKHA**

Thème :

---

***Changement Climatique, Situation Actuelle et Future : Cas du Bassin  
Versant de la Tafna***

---

Soutenue le 01/04/2021, devant le jury composé de :

EZZIANE Karim	Professeur	UHB Chlef	Président
ELMEDDAHI Yamina	MCA	UHB Chlef	Examineur
REMINI Boualem	Professeur	USD Blida 1	Examineur
HABI Mohammed	Professeur	UAB Tlemcen	Rapporteur
HAMOUDI Saaed	Professeur	UHB Chlef	Co-Rapporteur

# Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements particuliers au Pr. Mohammed Habi, qui a rendu ce travail possible. Ses conseils et ses avis d'expert ont été d'une valeur inestimable à toutes les étapes du travail.

Je remercie Pr. Saad Hamoudi Abdelamir, professeur à l'université de Chlef pour m'avoir encouragé et soutenu, je lui exprime toute ma gratitude.

J'aimerais également remercier Monsieur Elouissi Abdelkader Maître de Conférences à l'université de Mascara, ce travail n'aurait pas été réalisé sans son soutien, ses encouragements, ses orientations et ses réponses immédiates à mes nombreuses questions.

Je remercie professeur Karim Ezziane à l'université de Chlef qui a bien voulu présider ce jury.

Mes sincères remerciements aux examinateurs de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail, Madame Elmeddahi Yamina professeur à l'université de Chlef, Monsieur le professeur Remini Boualem de l'université de Blida.

J'exprime également mes amples remerciements et pieuse pensée à Monsieur Remaoun Mohamed professeur à l'université de Chlef.

Un merci tout particulier à ma famille. Les mots ne peuvent exprimer à quel point je suis reconnaissante envers mon père, ma mère pour tous les sacrifices qui l'ont faits pour moi.

# *Table des Matières*

<b>Titre</b>	<b>N° page</b>
Table des matières	
Résumé	
Listes des figures	
Liste des tableaux	
Abréviations	
Introduction générale.....	<b>1</b>
 <b>Chapitre I : Généralités sur le changement climatique et les ressources en eau</b> 	
1.1.Généralité sur le changement climatique.....	<b>4</b>
1.1.1 Climat.....	<b>4</b>
1.1.2 Changement climatique.....	<b>4</b>
1.1.3 Sécheresse.....	<b>5</b>
1.1.3.1 Sécheresse en Méditerranée.....	<b>5</b>
1.1.3.2 Sécheresse en Algérie.....	<b>6</b>
1.1.4 Variabilité climatique.....	<b>7</b>
1.1.5 Causes de la variabilité climatique et du changement climatique.....	<b>7</b>
1.1.5.1 Origine naturelle.....	<b>7</b>
1.1.5.1.1 Périodicité astronomique .....	<b>7</b>
1.1.5.1.2 Volcans.....	<b>7</b>
1.1.5.1.3 Courants océaniques.....	<b>7</b>
1.1.5.1.4 Cryosphère.....	<b>8</b>
1.1.5.2 Origine anthropique.....	<b>8</b>
1.1.5.2.1 Modification de la composition naturelle de l'atmosphère.....	<b>8</b>
1.1.5.2.1.1 Gaz à effet de serre.....	<b>8</b>
1.1.5.2.1.2 Composés chlorés et combustion des énergies fossiles.....	<b>10</b>
1.1.5.2.2 Changement dans l'utilisation des terres et la couverture terrestre.....	<b>11</b>
1.1.6 Impacts des changements climatiques.....	<b>11</b>
1.1.6.1 Eau.....	<b>11</b>

1.1.6.2 Précipitation et sécheresse.....	12
1.1.6.3 Santé.....	12
1.1.6.4 Neige et glace terrestre.....	12
1.1.6.5 Evapotranspiration .....	13
1.1.7 Changement climatique observé au cours du 20 <sup>ème</sup> siècle .....	13
1.1.7.1 Changement climatique à l'échelle globale .....	13
1.1.7.2 Changement climatique dans la région méditerranéenne.....	15
1.1.7.3 Changement climatique au Maghreb.....	16
1.1.7.4 Changement climatique en Algérie.....	19
1.2 Ressources en eau en Algérie.....	20
1.2.1 Eaux superficielles.....	22
1.2.1.1 Les potentialités hydriques.....	22
1.2.2 Eaux souterraines.....	25
1.3 Modèles climatiques .....	27
1.3.1 Historique du développement du modèle de changement climatique.....	27
1.3.2 Modèles climatiques.....	28
1.3.3 Principes de bases d'un modèle de circulation générale de l'atmosphère.....	30
1.3.4 Vue d'ensemble des types de modèle à évaluer.....	31
1.3.4.1 Modèles de circulation générale atmosphère-océan.....	31
1.3.4.2 Modèles du système terrestre.....	32
1.3.4.3 Modèles du système terrestre de complexité intermédiaire.....	32
1.3.5 Scénario climatique.....	32
1.3.5.1 Scénarios SRES (Special Report on Emission Scenarios).....	33
1.2.1.1 Les nouveaux scénarios (scénarios RCP).....	35

## **Chapitre II: Description de la zone d'étude**

2.1. Présentation géographique.....	36
2.1.1. Situation géographique.....	36
2.1.2. Zones montagneuses.....	36
2.1.3. Zones des plaines et des plateaux.....	37
2.2. Hydrographie du Bassin.....	38

2.3. Morphologie.....	40
2.3.1. Forme du bassin versant .....	40
2.3.2. Rectangle équivalent.....	41
2.4. Fonctionnement hydrologique du bassin.....	41
2.5. Etude du relief .....	42
2.6. Sols et végétation.....	45

## **Chapitre III: Climatologie**

3.1 Introduction.....	47
3.2 Collecte et traitement des données.....	47
3.2.1 Collecte des données .....	47
3.2.2 Homogénéisation des données et identification des ruptures dans les séries pluviométriques.....	49
3.2.2.1 Homogénéisation des données.....	49
3.2.2.2 Lois statistiques.....	49
3.2.2.3 Loi racine-normale.....	49
3.2.2.4 Valeurs aberrantes appelées aussi «outlier».....	51
3.2.2.5 Estimation des données manquantes.....	56
3.2.2.5.1 Types de données manquantes.....	56
3.2.2.5.2 Méthode de l'Analyse en Composante Principale (ACP).....	56
3.3 Etude de la stationnarité.....	59
3.3.1 Généralités.....	59
3.3.1.1 Définition de la stationnarité et non stationnarité.....	59
3.3.1.2 Présentation des différents tests.....	59
3.3.1.2.1 Test de pettitt.....	60
3.3.1.2.2 Test de Buishand.....	60
3.3.1.1 Résultats et analyse .....	60

## **chapitre IV : Etude de l'évolution de la pluviométrie (tendances)**

4.1 Introduction.....	64
4.2 Etude de la tendance (coefficient de corrélation de Bravais-Pearson).....	64

4.2.1	Introduction.....	64
4.2.2	Méthodologie (Le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson).....	65
4.2.2.1	Limites du coefficient de Pearson.....	65
4.2.3	Résultats et discussion.....	65
4.2.3.1	Etude de la tendance mensuelle.....	65
4.2.3.2	Etude de la pluviométrie saisonnière.....	76
4.2.3.3	Etude de la pluviométrie annuelle.....	87
4.3	Etude de la tendance par le test de Kendall.....	91
4.3.1	Introduction.....	91
4.3.2	Méthodologie.....	91
4.3.3	Résultats et discussion.....	92
4.3.3.1	Etude de la tendance mensuelle.....	92
4.3.3.2	L'étude de la tendance saisonnière.....	101
4.3.3.3	Etude de la pluviométrie annuelle.....	106
4.4	Etude des tendances par l'Analyse innovante de la tendance de la pluviométrie (The Innovative Trend Analysis ITA).....	108
4.4.1	Méthodologie.....	108
4.4.2	Résultats et discussion.....	110
4.4.2.1	Tendances saisonnières.....	118
4.4.2.2	Tendances annuelles.....	121
4.5	Conclusion.....	123

## **Chapitre V : Préviation de la pluviométrie**

5.1	Introduction.....	122
5.2	Méthodologie.....	123
5.2.1	Fonction de dépendance spatiale (Spatial Dependence Function, SDF).....	123
5.2.2	la projection de la précipitation.....	125
5.3	Résultats et discussion.....	126
5.3.1	Etude de la tendance annuelle par le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson.....	126
5.3.2	Etude de la tendance annuelle par l'Analyse innovante de la tendance .....	130

Conclusion générale.....	<b>136</b>
Références bibliographiques.....	<b>141</b>



## ملخص

تغير المناخ له تأثير على موارد المياه في الجزائر , التأثير الرئيسي هو انخفاض هطول الأمطار. الهدف من هذه الرسالة هو أن تكون قادرة على تحديد تأثير تغير المناخ على البيانات الشهرية من 17 محطة هطول الأمطار خلال فترة (1970-2015) , وتقع في مجوعات المياه تافنة (شمال غرب الجزائر) . يتم استخدام طريقتين للكشف عن الاتجاهات الشهرية والموسمية والسنوية (r لبيرسون، كيندال  $\tau$ ) , وأظهرت النتائج انخفاضاً شهرياً خلال أشهر مارس وأبريل ومايو ويونيو ويوليو. تم تسجيل أكبر انخفاض في مارس. على المستوى الموسمي, أشارت النتائج أن فصلي الشتاء والربيع هما الموسمان الأكثر تضرراً من تغير المناخ. على المستوى السنوي, أظهرت غالبية المحطات اتجاهاً تنازلياً موزعاً على طول الحوض.

تم تطبيق دراسة الاتجاهات عن طريق تحليل اتجاهات هطول الأمطار المبتكر الذي يحدد اتجاهات القيم المنخفضة والمتوسطة والعالية على سلسلة الأمطار الموسمية و السنوية, وكانت النتائج متوافقة مع النتائج السابقة. حيث أظهرت الدراسة الموسمية أن الشتاء والربيع يظهران اتجاهاً تنازلياً بنسبة 88 % و 100 % من المحطات على التوالي. في الشتاء, كانت الفئات ذات القيم المنخفضة والعالية هي الأكثر تأثراً بالانخفاض, أما بالنسبة لفصل الربيع, فتتأثر القيم المتوسطة و العالية, بالإضافة إلى أن الربيع أظهر أكبر انخفاض في المتوسط الحسابي و من الانحراف المعياري. على المستوى السنوي تم الكشف عن اتجاه تنازلي في 71 % من المحطات, وتتميز معظم المحطات بانخفاض متوسطها الحسابي السنوي وانحرافها المعياري.

أخيراً, تم تصحيح التوقعات الشهرية لهطول الأمطار للفترة من 2006 إلى 2100 من نموذج CCSM4 من خلال تطبيق طريقة القياس الإحصائي المصغر. ثم تم استخدام السيناريوهات RCP 2,6 و RCP 8,5 للتقرير الخامس للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ لوصف الاتجاه المستقبلي. تتنبأ نتائج السيناريو RCP 8,5 بالاتجاه التنازلي لجميع المحطات المدروسة, وهذه النتائج مماثلة للنتائج التي تم العثور عليها من خلال السلسلة المرصودة.

**الكلمات المفتاحية:** تغير المناخ - تافنة - هطول الأمطار - التباين المكاني والزمني - أفق التنبؤ 2100

## **Abstract**

Climate change has an impact on water resources. In Algeria, the main effect is the reduction of rainfall. The aim of this thesis is to be able to determine the effect of climate change on monthly data from 17 rainfall stations over a period of (1970-2015), located in the Tafna watershed (north-west Algeria). Two methods are used to detect monthly, seasonal and annual trends (Bravais Pearson's  $r$ , Kendall's  $\tau$ ), the results showed a monthly decrease during the months of March, April, May, June, July. The largest decrease was recorded in March. At the seasonal level, we determined that the winter and spring seasons are the two seasons most affected by climate change. On an annual scale, the majority of stations showed a decreasing trend distributed along the basin.

The study of trends through the innovative rainfall trend analysis, which identifies the trends of low, medium and high values of a series, was applied to the seasonal and annual rainfall series, the results are in agreement with the previous results. The seasonal study showed that winter and spring show a decreasing trend of 88% and 100% of the stations respectively. In winter the categories of low and high values are most affected by the decrease, while in spring the medium and high values are affected. In addition, spring showed the largest decrease in the arithmetic mean and standard deviation. At the annual level, a decreasing trend was detected in 71% of the stations, with most stations showing a decrease in their annual arithmetic mean and standard deviation.

Finally, the monthly precipitation forecasts for 2006 to 2100 from the CCSM4 model were corrected by applying the statistical downscaling method. Then the scenarios RCP2.6 and RCP8.5 of the IPCC Fifth Report (AR5) were used to describe the future trend. The results of scenario RCP 8.5 predict a downward trend for all stations studied, these results are similar to the results found by the observed series.

**Keywords:** Climate change - Tafna - Rainfall - Spatial-temporal variability - Forecast horizon 2100.

## Résumé

Le changement climatique a un impact sur les ressources en eau. En Algérie, le principal effet est la réduction des précipitations. Le but de cette thèse est de pouvoir déterminer l'effet du changement climatique sur des données mensuelles de 17 stations pluviométriques sur une période de (1970-2015), situées dans le bassin versant de Tafna (nord-ouest de l'Algérie). Deux méthodes sont utilisées pour détecter les tendances mensuelles, saisonnières et annuelles ( $r$  de Bravais Pearson,  $\tau$  de Kendall), les résultats ont montré une diminution mensuelle au cours des mois de mars, avril, mai, juin, juillet. La plus forte baisse a été enregistrée au mois de mars. Au niveau saisonnier, nous avons déterminé que les saisons d'hiver et de printemps sont les deux saisons les plus touchées par le changement climatique. Sur une échelle annuelle, la majorité des stations ont montré une tendance à la baisse distribuée le long du bassin.

L'étude des tendances par l'analyse innovante de la tendance de la pluviométrie qui identifie les tendances des valeurs faibles, moyennes et élevées d'une série a été appliquée sur les séries de précipitations saisonnières et annuelles, les résultats sont en accord avec les résultats précédents, L'étude saisonnière a montré que l'hiver et le printemps présentent une tendance à la baisse de 88% et 100% des stations respectivement. En hiver les catégories de valeurs faibles et élevées sont les plus touchées par la diminution, alors que pour le printemps, ce sont les valeurs moyennes et élevées qui sont affectées, En outre, le printemps a montré la plus grande diminution de la moyenne arithmétique et de l'écart-type. Au niveau annuel, une tendance à la baisse a été détectée dans 71% des stations, la plupart des stations sont marquées par une diminution de leurs moyennes arithmétiques annuelles et leur écart-type.

Finalement, les prévisions mensuelles des précipitations de 2006 à 2100 provenant du modèle CCSM4, ont été corrigées par l'application de la méthode de réduction d'échelle statistique. Ensuite les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 du cinquième rapport (AR5) du GIEC ont été utilisés pour décrire la tendance future. Les résultats du scénario RCP 8.5 prévoit une tendance à la baisse de toutes les stations étudiées, ces résultats sont similaires aux résultats trouvés par la série observée.

**Mots clés** : Changements Climatiques - Tafna - pluviométrie - Variabilité spatio-temporelle - Prévision horizon 2100.

## Liste des figures

N° de figure	Titre	Page
1.1	Répartition des gaz à effet de serre .....	9
1.2	Evolutions des concentrations de gaz carbonique (CO <sub>2</sub> ), de méthane (CH <sub>4</sub> ), de Protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O) et des principaux halocarbures (IPCC, 2007).....	10
1.3	La température moyenne de l'air en surface entre 2017 et 2018 par rapport à sa moyenne de 1981-2010 (OMM, 2019).....	14
1.4	Changement de température en surface et de précipitations projetées pour la période 2081-2100 par rapport à la période 1980-1999(GIEC, 2013).....	15
1.5	Le réchauffement de l'atmosphère d'échelle mondiale et dans le bassin méditerranéen.....	16
1.6	Les précipitations moyennes annuelles (1960-2010) (Mutin, 2011)...	17
1.7	Le changement des températures annuelles à l'horizon 2080/2099 par rapport à 1980/1999 (moyenne de 21 modèles) (IPCC, 2007)....	18
1.8	Le changement des précipitations annuelles à l'horizon 2080/2099 par rapport à 1980/1999 (moyenne de 21 modèles) (IPCC, 2007)...	19
1.9	Évolution du CO <sub>2</sub> à la station d'Assekrem (ONM, 2009).....	20
1.10	Émissions de GES du secteur de l'énergie en 1994 et 2000 (MATE, 2010).....	20
1.11	Précipitations (carte de l'Algérie) (moyennes annuelle entre 1981 et 2015).....	23
1.12	Cinq principaux bassins hydrauliques de l'Algérie (Hamiche et al., 2016).....	24
1.13	Exemple d'un maillage horizontal et vertical (spencer and Braswell, 2008).....	30
2.1	Cadre géographique de la Tafna et de la wilaya de Tlemcen (Benmossat, 2012).....	38
2.2	Cadre géographique de la Tafna et de la wilaya de Tlemcen (Benmossat, 2012).....	40
2.3	Moyennes interannuelles pour chaque sous-bassin versant entre 2000 et	42

	2013 (Zettam et al., 2017).....	
<b>3.1</b>	Carte des stations retenues.....	<b>48</b>
<b>3.2</b>	Ajustement à la loi Racine Normale de quelques stations.....	<b>50</b>
<b>3.3</b>	Exemple de graphe de la méthode de Potter. Cumul mensuel des précipitations.....	<b>52</b>
<b>3.4</b>	Exemple de graphe de la méthode d'Alexandersson. Cumul annuel des précipitations.....	<b>53</b>
<b>3.5</b>	Exemple de graphe du cumul des résidus.....	<b>54</b>
<b>3.6</b>	Exemple de détection des anomalies.....	<b>55</b>
<b>3.7</b>	Étude d'homogénéité par le test statistique de pettitt.....	<b>61</b>
<b>3.8</b>	Étude d'homogénéité par le test statistique de Buishand.....	<b>62</b>
<b>4.1</b>	exemple des courbes de la régression linéaire appliquée sur la pluviométrie mensuelle.....	<b>67</b>
<b>4.2</b>	Fréquence des stations selon le type de tendance mensuelle (r de Pearson).....	<b>69</b>
<b>4.3</b>	Carte des tendances du mois de janvier (r de Pearson).....	<b>70</b>
<b>4.4</b>	Carte des tendances du mois de février (r de Pearson).....	<b>70</b>
<b>4.5</b>	Carte des tendances du mois de mars (r de Pearson).....	<b>71</b>
<b>4.6</b>	Carte des tendances du mois d'avril (r de Pearson).....	<b>71</b>
<b>4.7</b>	Carte des tendances du mois de mai (r de Pearson).....	<b>72</b>
<b>4.8</b>	Carte des tendances du mois de juin (r de Pearson).....	<b>72</b>
<b>4.9</b>	Carte des tendances du mois de juillet (r de Pearson).....	<b>73</b>
<b>4.10</b>	Carte des tendances du mois d'aout (r de Pearson).....	<b>73</b>
<b>4.11</b>	Carte des tendances du mois de septembre (r de Pearson).....	<b>74</b>
<b>4.12</b>	Carte des tendances du mois d'octobre (r de Pearson).....	<b>74</b>
<b>4.13</b>	Carte des tendances du mois de novembre (r de Pearson).....	<b>75</b>
<b>4.14</b>	Carte des tendances du mois de décembre (r de Pearson).....	<b>75</b>
<b>4.15</b>	Courbes de la pluviométrie saisonnière (Automne) (avec droites de tendances).....	<b>79</b>
<b>4.16</b>	Courbes de la pluviométrie saisonnière (Hiver)(avec droites de tendances).....	<b>80</b>
<b>4.17</b>	Courbes de la pluviométrie saisonnière (Printemps) (avec droites de	<b>81</b>

	tendances).....	
<b>4.18</b>	Courbes de la pluviométrie saisonnière (Eté) (avec droites de tendances).....	<b>82</b>
<b>4.19</b>	Nombre de station pour chaque type de tendance saisonnière (r de Pearson).....	<b>83</b>
<b>4.20</b>	Carte de la tendance de la saison de l'Automne (r de Pearson).....	<b>83</b>
<b>4.21</b>	Carte de la tendance de la saison de l'Hivers (r de Pearson).....	<b>85</b>
<b>4.22</b>	Carte de la tendance de la saison du Printemps (r de Pearson).....	<b>85</b>
<b>4.23</b>	Carte de la tendance de la saison de l'Eté (r de Pearson).....	<b>86</b>
<b>4.24</b>	Pluviométrie annuelle des stations étudiées.....	<b>89</b>
<b>4.25</b>	Nombre de stations pour chaque type de la tendance annuelle (r de Pearson).....	<b>90</b>
<b>4.26</b>	Carte de la tendance de la pluviométrie annuelle (r de Pearson).....	<b>90</b>
<b>4.27</b>	Nombre de stations par type de tendance ( $\tau$ de Kendall).....	<b>93</b>
<b>4.28</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de janvier).....	<b>95</b>
<b>4.29</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de février).....	<b>95</b>
<b>4.30</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de mars).....	<b>96</b>
<b>4.31</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois d'avril).....	<b>96</b>
<b>4.32</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de mai).....	<b>97</b>
<b>4.33</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de juin).....	<b>97</b>
<b>4.34</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de juillet).....	<b>98</b>
<b>4.35</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois d'Août).....	<b>98</b>
<b>4.36</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de septembre)...	<b>99</b>
<b>4.37</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois d'octobre).....	<b>99</b>
<b>4.38</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de novembre)...	<b>100</b>
<b>4.39</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de décembre)...	<b>100</b>
<b>4.40</b>	Nombre de stations de la tendance saisonnière ( $\tau$ de Kendall).....	<b>103</b>
<b>4.41</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (la saison d'automne).	<b>104</b>
<b>4.42</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (la saison d'hiver).....	<b>104</b>
<b>4.43</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (la saison de printemps).....	<b>105</b>
<b>4.44</b>	Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (la saison d'été).....	<b>105</b>

<b>4.45</b>	Nombre de stations pour chaque type de la tendance annuelle ( $\tau$ de Kendall) .....	<b>107</b>
<b>4.46</b>	Carte des tendances annuelles ( $\tau$ de Kendall).....	<b>108</b>
<b>4.47</b>	Modèle de tendance innovante.....	<b>109</b>
<b>4.48</b>	Tendance des précipitations d'hiver.....	<b>111</b>
<b>4.49</b>	Tendance des précipitations de printemps.....	<b>112</b>
<b>4.50</b>	Tendance des précipitations d'été.....	<b>113</b>
<b>4.51</b>	Tendance des précipitations d'automne.....	<b>114</b>
<b>4.52</b>	Tendance des précipitations annuelle.....	<b>115</b>
<b>4.53</b>	Fréquences des tendances saisonnières des précipitations.....	<b>119</b>
<b>4.54</b>	Comparaison des moyennes arithmétiques saisonnières.....	<b>120</b>
<b>4.55</b>	Comparaison de la variabilité saisonnière.....	<b>121</b>
<b>4.56</b>	Fréquences des tendances annuelles des précipitations.....	<b>122</b>
<b>4.57</b>	Comparaison de la variabilité annuelle.....	<b>123</b>
<b>5.1</b>	SDF des stations di bassin versant la Tafna.....	<b>123</b>
<b>5.2</b>	Carte de localisation des stations avec les nœuds du modèle CCSM4...	<b>124</b>
<b>5.3</b>	Les concentrations atmosphériques en équivalent CO <sub>2</sub> de tous les agents de forçage (en parties par million en volume (ppmv)) selon les quatre RCP utilisés par le cinquième rapport d'évaluation du GIEC.....	<b>126</b>
<b>5.4</b>	Courbes de la pluviométrie annuelle avec leurs droites de tendances (2006-2100).....	<b>128</b>
<b>5.5</b>	Nombre de stations par type de tendance.....	<b>129</b>
<b>5.6</b>	Tendance des précipitations annuelle (RCP2.6).....	<b>131</b>
<b>5.7</b>	Tendance des précipitations annuelle (RCP8.5).....	<b>132</b>
<b>5.8</b>	Graphe de l'identification de la variabilité régionale (moyenne arithmétique) (RCP2.6).....	<b>133</b>
<b>5.9</b>	Graphe de l'identification de la variabilité régionale (écart-type) (RCP2.6).....	<b>133</b>
<b>5.10</b>	Graphe de l'identification de la variabilité régionale (moyenne arithmétique) (RCP8.5).....	<b>134</b>
<b>5.11</b>	Graphe de l'identification de la variabilité régionale (écart-type) (RCP8.5)	<b>134</b>

## Liste des tableaux

N° de tableau	Titre	Page
1.1	Evolution des gaz à effet de serre depuis 1750 (Nefzi, 2012).....	11
1.2	Mobilisation des ressources en eau en Algérie.....	22
1.3	L'utilisation de l'eau en Algérie (Ministere des Ressources en Eau, MRE, Alger).....	22
1.4	Ressources en eau (Hamiche et al., 2016).....	24
1.5	Les potentialités en eau superficielle des bassins hydrographiques de l'Algérie (MRE, 2012) .....	25
1.6	Principaux aquifères du Nord (FAO, 2009).....	26
1.7	Quatre familles de scénarios du SRES du quatrième rapport et les pré visions des hausses de températures globales moyennes en 2100 (IPCC, 2001).....	34
2.1	Caractéristiques de forme des unités hydrologiques de la Tafna (Bouanani, 2004).....	43
3.1	Liste des stations météorologiques retenues.....	48
3.2	Groupes de stations formées.....	54
3.3	Exemple de reconstitution des données manquantes (Station Meffrouche, mois de décembre).....	58
4.1	Pluviométrie mensuelle des stations retenues du mois de septembre.....	66
4.2	Symbole de la tendance mensuelle pour chaque station (r de Pearson)....	68
4.3	Répartition des mois au sein des saisons.....	76
4.4	Données de la pluviométrie saisonnière (Automne) (1970-2015).....	77
4.5	Données de la pluviométrie saisonnière (hiver) (1970-2015).....	77
4.6	Données de la pluviométrie saisonnière (Printemps) (1970-2015).....	78
4.7	Données de la pluviométrie saisonnière (Eté) (1970-2015).....	78
4.8	Symbole de la tendance saisonnière pour chaque station (r de Pearson).	83
4.9	Résultats du test statistique de Mann Kendall appliqué au niveau mensuel à la station 160601.....	93
4.10	Symbole de la tendance mensuelle pour chaque station (test de Kendall)..	93
4.11	Résultats du test statistique de Mann Kendall appliqué au niveau de la saison hiver.....	102



<b>4.12</b>	Symbole de la tendance saisonnière pour chaque station ( $\tau$ de Kendall)...	<b>102</b>
<b>4.13</b>	Résultats du test statistique de Mann Kendall appliqué au niveau des précipitations annuel.....	<b>107</b>
<b>4.14</b>	Paramètres d'analyse des tendances innovantes (la saison d'hiver).....	<b>116</b>
<b>4.15</b>	Paramètres d'analyse des tendances innovantes (la saison de printemps).....	<b>116</b>
<b>4.16</b>	Paramètres d'analyse des tendances innovantes (la saison d'été).....	<b>117</b>
<b>4.17</b>	Paramètres d'analyse des tendances innovantes (la saison d'automne)...	<b>117</b>
<b>4.18</b>	Paramètres innovants de l'analyse des tendances (précipitations annuelles).....	<b>118</b>
<b>4.19</b>	Fréquences des tendances par catégorie de précipitations.....	<b>118</b>
<b>5.1</b>	Calcule des coefficients de corrélation pour chaque station.....	<b>129</b>

## **Abréviations**

**ANRH:** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Algérie CCNUCC.

**AR4:** 4ème rapport d'évaluation.

**AR5:** 5ème rapport d'évaluation.

**CCSM:** Community Climate System Model.

**CMIP5:** Coupled Model Intercomparison Project.

**GES:** Gaz à effet de serre.

**GIEC:** Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

**ITA:** Innovative Trend Analysis

**LULCC:** Land Use and Land Cover Change.

**MCG:** Modèle du Climat Global.

**MO:** Mediterranean oscillation.

**NAO:** North Atlantic Oscillation.

**QDM:** Quadrangle Downscaling Methodology.

**RCP:** Representative Concentration Pathways.

**SRES:** Special Report on Emission Scenarios.

**SDF:** Spatial Dependence Function.

# *Introduction*

### Introduction générale

Les ressources en eau sont d'une importance primordiale et leur besoin à l'avenir augmente en raison de la croissance démographique et le développement socio-économique des communautés.

Comme nous le savons, la pluviométrie est un facteur très important dans le climat et l'hydrométéorologie, par conséquent, la variabilité pluviométrique peut provoquer des inondations, des sécheresses et une perte de biodiversité. Ces risques peuvent à la fois menacer l'approvisionnement en eau, l'irrigation et l'industrie, et modifier les stratégies des pays en causant des dommages catastrophiques, tant humains que matériels (Wang et al., 2020 ; Benzater et al., 2019 ; Kreibich et al., 2017 ; Ghenim et al., 2016 ; Labban, 2016 ; Milly et al., 2008).

Le plus grand défi pour ces ressources en eau est le changement climatique. Ces changements sont causés soit directement (variabilité interne) ou indirectement (variabilité externe ou changement climatique, dû aux activités anthropiques) (Mohorji et al., 2017 ; IPCC, 2013 ; 2007).

Une évaluation constate que l'étude des précipitations, les tendances sont devenues un sujet de recherche de plus en plus actif pour une gestion régionale efficace des ressources en eau et risques associés (Sun et al., 2018 ; Fatichi et al., 2012 ; Milly et al., 2008).

Pour la majorité des régions méditerranéennes, ces changements ont entraîné une diminution importante des précipitations, avec une augmentation des phénomènes exceptionnels tels que les graves sécheresses (Ghenim et al., 2016).

L'Algérie est l'un des pays les plus touchés par ces changements climatiques. Les risques affectant l'ensemble du territoire, et qui a été particulièrement sévère dans les régions ouest (Elouissi, 2016 ; Elouissi et al., 2016 ; Taibi et al., 2013).

La mise en évidence de l'évolution des précipitations et de leurs impacts est un outil essentiel pour la planification, l'adaptation, l'atténuation de ces risques météorologiques et la prise de décision (Yevjevich et al., 1984). La détection des tendances, spatiales et temporelles, est une étape importante pour l'analyse de cette évolution (Sayemuzzaman et al., 2013). Pour mieux comprendre cette évolution, plusieurs travaux ont été réalisés en Méditerranée et en Algérie, notamment dans le bassin versant de Tafna (nord-ouest de l'Algérie).

Les travaux de (Ghenim et al., 2011) sur les précipitations dans les barrages de Meffrouche et Beni Bahdel pendant la période 1946-2009, ont détecté des séquences modérées de sécheresse et d'humidité, mais avec une légère tendance à la sécheresse, bien que certaines années aient été très humides ou extrêmement sèches. Taibi et al. (2013) ont étudié les précipitations dans le nord de l'Algérie sur une période de sept décennies (1936-2009) et ont constaté que la décennie 1980-1990 était la plus déficiente. La fluctuation la plus brutale et la plus importante dans l'extrême-ouest de

l'Algérie est observée autour des années 1980, au cours desquelles les précipitations annuelles ont diminué de manière assez importante. Cette période de déficit a été caractérisée depuis lors par sa l'intensité et la durée (Meddi et al., 2009). L'analyse interannuelle de la variabilité des précipitations annuelles est marquée par une diminution de plus de 20 % dans le bassin versant de la Tafna. Ce déclin a été observé dans la deuxième moitié de la année 1970 (Meddi et al., 2010). Le déficit moyen de précipitations, détectée après 1970, est de 26 % ; elle est principalement observée pendant la saison d'hiver et de printemps (Ghenim et al., 2014 ; 2010). Depuis 1970, cette diminution des précipitations a eu un impact significatif sur la réduction d'environ 62% de ruissellement (Meddi et al., 2013).

Notre choix s'est porté sur le bassin versant de la Tafna comme exemple d'étude. Ce choix a notamment été décidé en raison du fait que c'est l'un des bassins les plus importants du nord-ouest Algérien. Ce bassin englobe la plus grande partie de l'ouest de l'Algérie. Cette région est plus affectée par le changement climatique que d'autres parties du pays.

Cette thèse a pour but d'étudier la tendance pluviométrique, Est ce qu'elle augmente ou diminue ? Pour cela des approches statistiques ont été appliquées, qui nous permettent d'étudier la variabilité spatiale et temporelle. Ensuite des prévisions climatiques d'ici l'an 2100 ont été faites.

La thèse est structurée en cinq chapitres :

Le premier est consacré à des recherches bibliographiques sur le changement climatique et son impact sur les ressources en eau dans le contexte mondial, régional et national, enfin un aperçu des différents modèles climatiques et scénarios climatiques.

Le deuxième chapitre est destiné à la présentation des différentes caractéristiques du bassin versant la Tafna (la situation géographique, la structure géologique, sol et végétation, le climat...).

Le troisième chapitre est consacré aux collectes des données pluviométriques, l'homogénéisation des données et l'identification des ruptures dans les séries pluviométriques.

Le quatrième chapitre de cette thèse consiste en l'étude des précipitations, où nous sommes intéressés à la variabilité des précipitations en utilisant les séries pluviométriques mensuelles de 17 stations du bassin versant de la Tafna.

Enfin, le cinquième chapitre est destiné à la prévision climatique, ce chapitre requiert différentes étapes. Tout d'abord, il est nécessaire de corriger les prévisions de la pluviométrie mensuelles provenant du modèle CCSM4 (NCAR, USA) par la fonction de dépendance spatiale.

Ensuite utiliser les deux scénarios du cinquième rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (AR5) pour décrire la tendance future.

# *Chapitre I*

*Généralités sur le changement*

*Climatique et les ressources en eau*

## **1.1. Généralité sur le changement climatique**

### **1.1.1 Climat**

Le climat est traditionnellement défini comme la description en termes de la moyenne et de la variabilité des variables atmosphériques pertinentes telles que la température, les précipitations et le vent (Goosse et al., 2010).

Le climat de la Terre est déterminé par l'énergie reçue du Soleil, l'énergie émise par la Terre et les échanges d'énergie entre l'atmosphère, la Terre, les océans, la glace et les êtres vivants. La composition de l'atmosphère est particulièrement importante car certains gaz et aérosols (très petites particules) affectent le flux du rayonnement solaire entrant et du rayonnement infrarouge sortant (vapeur d'eau, CO<sub>2</sub> et méthane) (World Development Report, 2010).

Le climat peut donc être considéré comme une synthèse ou un agrégat du temps. Cela implique que la représentation du climat dans une région donnée doit contenir une analyse des conditions moyennes, du cycle saisonnier, de la probabilité de phénomènes extrêmes comme le gel et les tempêtes violentes etc. (IPCC, 2007).

L'étude du climat se fait sur des périodes assez longues, classiquement 30 ans, car le climat n'est pas stable et a beaucoup évolué sur de longues périodes (Page et al., 2011).

### **1.1.2 Changement climatique**

La variabilité ou le changement climatique n'est pas un nouveau phénomène. La terre a toujours connu des périodes successives de refroidissement et de réchauffement sur de longues échelles de temps géologiques, mais a également connu des variations plus légères sur des échelles de temps plus courtes.

Ces changements climatiques sont liés à des facteurs internes au système climatique terrestre, tels que l'interaction entre l'atmosphère et l'océan, et à des facteurs naturels comme les activités volcaniques ou solaires (Gachon, 2000).

Selon le 5<sup>ème</sup> rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC, en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC), la température moyenne de la Terre pourrait augmenter de 4°C à l'horizon 2100, selon le scénario le plus pessimiste (IPCC, 2014).

Il est bien connu que l'homme a une influence sur le système climatique. Le GIEC confirme que le changement climatique est essentiellement dû à l'activité humaine. L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre va continuer à avoir des conséquences graves sur les écosystèmes mondiaux (fonte des glaciers, élévation du niveau des mers, modification des précipitations, augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes, modification des habitats et des aires de répartition des espèces végétales et animales) (Bourque, 2000).



Le changement climatique est également désigné comme une variabilité statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité persistante sur de longues périodes (généralement des décennies ou plus) (Albritton et al., 2001).

### **1.1.3 Sécheresse**

La sécheresse est considérée par beaucoup comme le plus difficile mais pas bien compris de tous les risques naturels affectant plus de personnes que les autres risques (Mishra et Desai, 2005). Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliard de personnes ont été affectées par la sécheresse (Khoualdia, 2015 ; Obassi, 1994). Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact de la sécheresse risquent d'augmenter dans les années à venir (Khoualdia, 2015).

Ces résultats ont mis l'accent sur la nécessité d'un plus grand nombre d'activités de la recherche sur les causes et les impacts de la sécheresse et la nécessité d'une planification supplémentaire pour aider à atténuer les pires effets possibles des sécheresses futures. La sécheresse a été la principale cause qui a fait l'objet de nombreuses études systématiques, en particulier la reconstitution de l'histoire de la sécheresse et des calculs de la fréquence des sécheresses. (Wilhite et al., 1985).

La sécheresse est difficile à définir et nécessite des définitions différentes pour expliquer des situations spécifiques. Dans la plupart des cas, la sécheresse est temporaire. Une sécheresse d'un mois peut se produire dans une région qui connaît normalement une alternance de périodes humides et sèches. Il est extrêmement difficile de définir une réduction temporaire de la disponibilité de l'eau et de l'humidité comme une sécheresse et cela dépend de la période considérée (Ramamasy et Baas, 2007).

#### **1.1.3.1. Sécheresse en Méditerranée**

Plusieurs études ont porté principalement sur les sécheresses en Méditerranée. Une augmentation a été remarquée de la fréquence, de la durée et de la gravité des sécheresses dans la zone méditerranéenne (Merabti et al., 2017).

La plupart des pays méditerranéens ont connu des sécheresses de longue durée. Dans la période 1980-1985 au Maroc, dans la période 1982-1983 en Grèce, Espagne, Chypre, Tunisie et Italie du Sud; dans la période 1988-1990 en Grèce ; dans la période 1988-1992 en France ; dans la période 1989-1992 à Chypre ; dans la période 1990-1995 en Espagne et au Maroc ; au cours de la période 1993-1995 en Tunisie ; au cours des années 1995-1996 en Sardaigne et au cours de la période 1995-2000 à Chypre (Tsiourtis, 2008).

#### **1.1.3.2. Sécheresse en Algérie**

L'Algérie est l'un des pays du sud de la méditerranée qui souffre de la rareté de l'eau d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre. Les débits d'eau sont caractérisés par une irrégularité saisonnière et annuelle importante et des inondations rapides. En outre, le climat se caractérise par de longues périodes de sécheresse et des précipitations irrégulières dans le temps et dans l'espace (Meddi et al., 2014).

Des conditions sèches importantes et durables se sont produites dans les années 1540, 1860, 1870, 1920 et 1940; et à quatre reprises au cours des cinq derniers siècles, il y a eu des périodes de six ans où chaque année consécutive était inférieure à la moyenne à long terme : 1548-1553, 1737-1742, 1770-1775 et 1876-1881.

Les épisodes de sécheresse de 1876-1881 sont les plus graves jamais enregistrés (Taithe, 2006), et en particulier d'une sécheresse persistante à Belezma (Batna) qui a causé des dommages massifs aux forêts de cèdres (FAO, 2018). La sécheresse la plus récente (1999-2002) en Algérie semble être la pire depuis au moins le milieu du 15<sup>ème</sup> siècle et est potentiellement due au lien possible avec le changement climatique anthropique (Hoerling et Kumar, 2003).

Plusieurs périodes sèches ont été observées dans le Nord. Elles ont été caractérisées par la famine, les incendies et la perturbation sociale. La période 1973-1992 a été particulièrement sèche, ce qui a eu des effets négatifs sur les ressources en eau : baisse des débits dans les barrages de stockage, baisse du niveau des eaux souterraines et des puits peu profonds et des sources à sec. Les faibles précipitations de 2001 et la saison d'hiver 2002 ont entraîné de graves pénuries d'eau potable dans les grands centres urbains, en particulier dans la Wilaya d'Alger.

Tous les barrages alimentant Alger étaient dans ce que l'on appelle la "zone morte", un déclin qui n'a pas été observé depuis la mise en service des barrages (FAO, 2018).

La sécheresse intense et persistante observée en Algérie au cours des 30 dernières années et caractérisée par un déficit pluviométrique et un impact négatif sur les régimes d'écoulement fluvial entraînant de graves conséquences pour toutes les activités socio-économiques du pays.

#### **1.1.4. Variabilité climatique**

Le système climatique terrestre se compose de l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère, la cryosphère et la lithosphère (Horton et al., 2010). Ces éléments interagissent de façon très compliquée et à une grande échelle spatio-temporelle (Chourghal, 2016).

La variabilité d'une série climatique est caractérisée par une stabilité de la moyenne (on dit que la série est stationnaire), et par une fluctuation des observations autour de cette moyenne.

En revanche, l'évolution du système climatique est caractérisée par une modification des moyennes des variables climatiques. Calculée sur une longue période d'années, qui peut

s'accompagner d'une modification de la distribution de fréquence des événements rares (Salinger et al., 2000).

### **1.1.5. Causes de la variabilité climatique et du changement climatique**

#### **1.1.5.1 Origine naturelle**

##### **1.1.5.1.1 Périodicité astronomique**

Le climat de la Terre dépend de l'influence de facteurs naturels astronomiques, physiques et géodynamiques, parmi lesquels l'impact solaire complexe sur le climat ainsi que l'impact des changements de l'orbite terrestre (Nikolov et al., 2014).

Les saisons sont le résultat de l'orbite de la Terre autour du Soleil et les périodes glaciaires sur des centaines de milliers d'années passées ont presque certainement été causées par des changements bien compris dans cette orbite et dans l'orientation de l'axe terrestre (Coryn et al., 2009).

##### **1.1.5.1.2 Volcans**

Le volcanisme a longtemps été impliqué comme une cause possible des variations météorologiques et climatiques (Robock, 2003). L'activité volcanique à grande échelle peut ne durer que quelques jours, mais l'effusion massive de gaz et de cendres peut influencer les régimes climatiques pendant des années (Wolfe, 2000). Les éruptions volcaniques sont une manifestation forte et visible de la dynamique interne de la Terre solide. Une forte caractéristique est l'émission dans l'atmosphère de grandes quantités de particules solides (cendres) et de substances gazeuses dans un court laps de temps. Les nuages de cendres peuvent bloquer la lumière du Soleil et assombrir visiblement le ciel, ce qui réduit le réchauffement solaire (Cole-dai, 2010).

##### **1.1.5.1.3 Courants océaniques**

Les courants océaniques transportent de grandes quantités de chaleur dans le monde. Cela en fait l'un des principaux moteurs du climat. Parce qu'ils réagissent extrêmement lentement aux changements, les effets du réchauffement de la planète deviendront progressivement perceptibles, mais sur une période de plusieurs siècles. Les changements climatiques associés au vent et à la glace de mer pourraient devenir plus rapidement reconnaissables (Bollmann et al., 2010).

L'océan a une capacité naturelle de tamponner l'atmosphère et la surface de l'océan est en équilibre avec l'atmosphère en ce qui concerne le CO<sub>2</sub> et la chaleur. Lorsque la concentration de l'un ou l'autre augmente dans l'atmosphère, elle augmente également dans l'océan. Ces augmentations modifient les propriétés physiques et chimiques de l'océan et affectent plusieurs processus océaniques (Herr et Galland, 2009).

Le réchauffement des océans a plusieurs conséquences. L'élévation du niveau de la mer en est un exemple bien connu. Au fur et à mesure que l'eau se réchauffe, elle se dilate et la surface de l'océan s'élève (Plateforme Ocean et Climat, 2019)

#### **1.1.5.1.4 Cryosphère**

La cryosphère est l'une des sphères terrestres situées entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère, où les températures sont négatives ou nulles et où l'eau est présente à l'état solide ou surfondu. Les composantes de base de la cryosphère sont la couverture de neige, les glaciers, les calottes glaciaires, les glaces de mer et les icebergs, le pergélisol, la glace de rivière et de lac, etc. (Khromova, 2010).

La cryosphère arctique a changé radicalement au cours de la dernière décennie, avec le retrait et l'amincissement de la glace de mer, la fonte de l'inlandsis et des glaciers du Groenland, la fonte du pergélisol et la diminution de la neige et de la glace. Bien que la variabilité naturelle de ce système complexe soit grande, la direction du changement est claire et le rythme du changement a pris les scientifiques par surprise (AMAP, 2011).

#### **1.1.5.2 Origine anthropique**

##### **1.1.5.2.1 Modification de la composition naturelle de l'atmosphère**

###### **1.1.5.2.1.1 Gaz à effet de serre**

Un gaz à effet de serre (ou GES en abrégé) ou « Green House Gases » (GHG) est tout gaz dans l'atmosphère qui absorbe et réémet de la chaleur, et maintient ainsi l'atmosphère de la planète plus chaude qu'elle ne le serait autrement. Les principaux gaz à effet de serre dans les pays de l'atmosphère terrestre se composent de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de méthane (CH<sub>4</sub>), d'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) et de l'ozone (Brander et al., 2012).

L'effet de serre fait référence au piégeage de la chaleur par certains gaz de l'atmosphère. Bien que ces gaz se produisent en quantités infimes, ils empêchent d'importantes quantités de chaleur de s'échapper dans l'espace, gardant ainsi la Terre suffisamment chaude. Sans les GES, la température moyenne à la surface de la Terre serait d'environ 18°C (Khan, 2017).

Malheureusement, l'humanité, grâce à la production d'énergie, à l'évolution de l'utilisation des terres et à d'autres processus, a produit une augmentation substantielle de la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui renforce l'effet de serre naturel, et on craint que ce changement continu n'entraîne un changement majeur du climat mondial (Figure1.1) (Kelly, 2000).

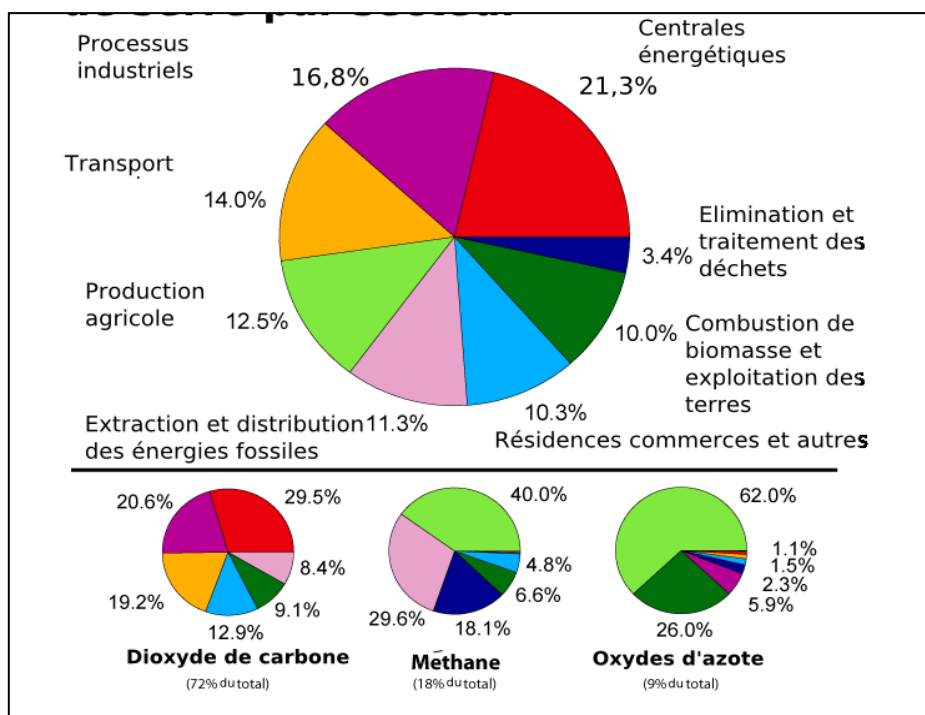
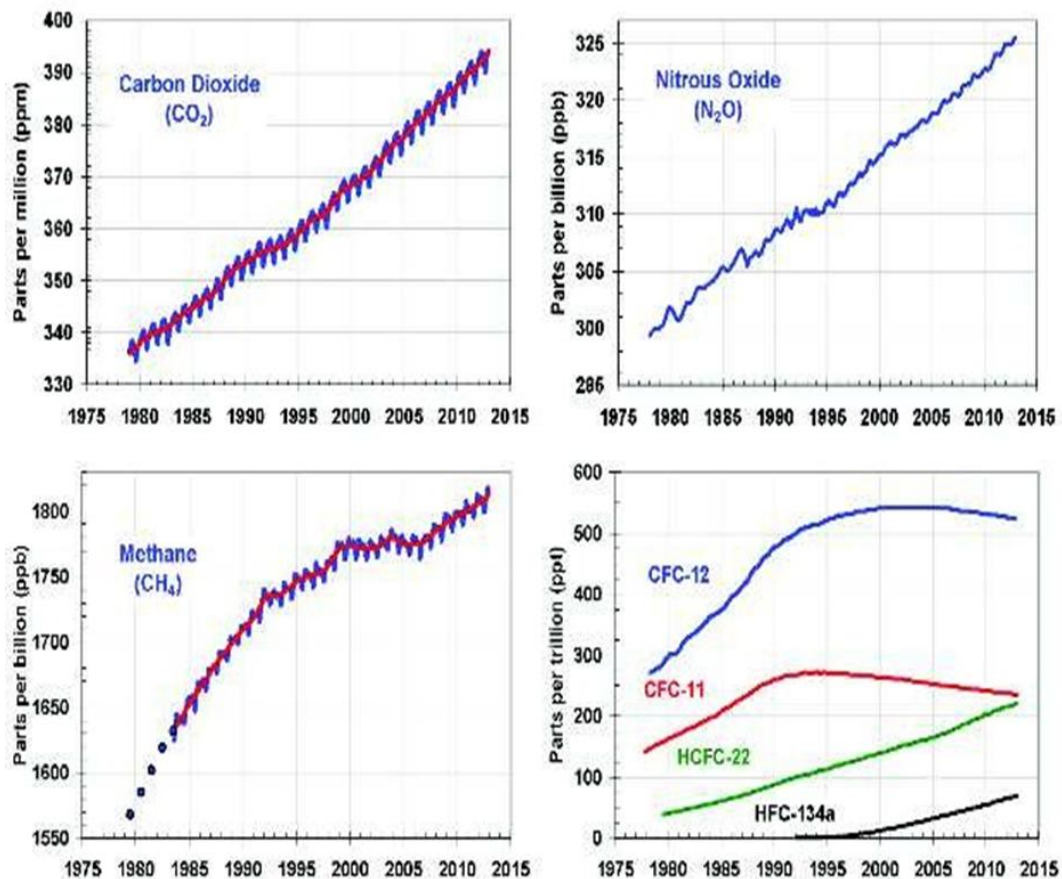


Figure 1.1. Répartition des gaz à effet de serre (Riphah, 2015)

Le taux de CO<sub>2</sub> dans l'air est monté de 280 parties par million (ppm) en 1750 (avant l'ère industrielle) à 380 ppm en 2005, soit une hausse de plus d'un tiers par rapport à l'ère préindustrielle (IPCC, 2001). Le taux de CH<sub>4</sub> a augmenté de plus de 145 % dans les 200 dernières années (Figure 1.2) (Chourghal, 2016).



**Figure 1.2.** Evolutions des concentrations de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), de méthane (CH<sub>4</sub>), de Protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et des principaux halocarbures (IPCC, 2007).

#### 1.1.5.2.1.2 Composés chlorés et combustion des énergies fossiles

L'ozone est présent à la fois dans la haute stratosphère, où il protège l'atmosphère. Cette couche d'ozone absorbe des niveaux nocifs de rayonnement ultraviolet. Au cours des deux dernières décennies, les émissions anthropiques de chlore et de brome contenant des halocarbures, comme les chlorofluorocarbures (CFC), ont appauvri les concentrations d'ozone stratosphérique (Belić, 2006).

Les CFC sont des composés xénobiotiques, ils n'étaient pas présents dans la nature jusqu'à ce que les humains commencent leur production vers 1930. Ils étaient souvent utilisés ces dernières années comme gaz propulseurs, extincteurs d'incendie, fluides frigorigènes (dans les réfrigérateurs et systèmes de climatisation, les expandeurs et les solvants). En plus d'être impliqué dans l'épuisement de la couche d'ozone, ce sont des gaz à effet de serre très forts.

Cette perte d'ozone dans la stratosphère a entraîné un forçage radiatif négatif, représentant un effet indirect des émissions anthropiques de chlore et de brome (IPCC 1996; Belić, 2006).

**Tableau 1.1.** Evolution des gaz à effet de serre depuis 1750 (Nefzi, 2012)

	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>CH<sub>4</sub></b> <b>(ppb)</b>	<b>N<sub>2</sub>O</b> <b>(ppb)</b>	<b>CFC-11</b> <b>(ppt)</b>	<b>HFC-23</b> <b>(ppt)</b>	<b>CF<sub>4</sub></b> <b>(ppt)</b>
<b>Concentration préindustrielle (1750)</b>	280	700	270	0	0	40
<b>Concentration en 1998</b>	365	1745	314	268	14	80
<b>Temps de séjour atmosphérique (ans)</b>		12	150	45	260	>50000

L'IPCC (2001) estime que 75% de l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'air est due à la combustion de carburants fossiles, tandis que 25% est due à de nouvelles utilisations des sols. Le développement des zones agricoles et d'élevage s'est fait au détriment des forêts. La modification de la surface des terres, en particulier la déforestation et le déboisement à grande échelle, affecte l'albédo et la rugosité régionale, ce qui peut affecter le transfert d'énergie, les ressources en eau et d'autres composantes du système climatique (Tableau 1.1) (Chourghal, 2016).

#### **1.1.5.2.2 Changement dans l'utilisation des terres et la couverture terrestre**

L'humanité a modifié plus de 50 % de la surface terrestre mondiale, modifiant ainsi directement l'échange d'énergie, d'élan et d'eau entre l'atmosphère et la surface terrestre. Bien qu'il soit bien connu que la modification de la couverture du sol par l'utilisation des terres (appelée par la suite Land Use and Land Cover Change LULCC) joue un rôle crucial pour le système climatique, on accorde encore beaucoup plus d'attention aux impacts des changements de la composition atmosphérique. Les impacts de LULCC peuvent varier selon les régions. Par exemple, l'urbanisation entraîne généralement une augmentation de la température de l'air à la surface ainsi que des changements dans les configurations spatiales et l'intensité des précipitations (Laux et al., 2017).

Il est donc essentiel de détecter les LULCC avec précision, à des échelles appropriées et en temps opportun afin de mieux comprendre leurs impacts sur le climat et d'améliorer la prévision du climat futur (Roger et al., 2011).

### **1.1.6 Impacts des changements climatiques**

#### **1.1.6.1 Eau**

Le GIEC a conclu qu'il existe un consensus sur le fait que l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère entraînera un changement climatique qui fera monter le niveau de la mer, une fréquence accrue d'événements climatiques extrêmes, notamment des tempêtes intenses, des pluies abondantes et des sécheresses. Cela augmentera la fréquence des risques liés au climat, causant des

pertes en vies humaines, des perturbations sociales et des difficultés économiques. Il y a moins de consensus sur la magnitude du changement des variables climatiques, cependant de nombreuses études ont prouvé que le changement climatique aura un effet sur la disponibilité et la demande en eau (Kusangaya et al., 2014).

#### **1.1.6.2 Précipitation et sécheresse**

Il y a une influence directe du réchauffement climatique sur les changements des précipitations et les fortes pluies (Trenberth, 2005). La première décennie de ce siècle a été enregistrée comme la décennie la plus chaude depuis 1850. Les régions tropicales du monde ont connu des précipitations irrégulières.

L'augmentation de la chaleur entraîne une plus grande évaporation et donc un séchage de surface plus important, augmentant ainsi l'intensité et la durée de la sécheresse. Cependant la capacité de rétention d'eau de l'air augmente d'environ 7% par 1°C, ce qui conduit à une augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, ce qui exerce probablement la plus grande influence sur les précipitations (Mobeen et al., 2017).

#### **1.1.6.3 Santé**

Le changement climatique a un certain nombre d'impacts immédiats et à long terme sur l'environnement fondamental (Mboera et al., 2011). La plupart des scientifiques reconnaissent maintenant que les changements climatiques auront de graves conséquences sur la santé humaine. Le changement climatique et les climats variables, en particulier les changements climatiques extrêmes, affecter l'environnement qui nous fournit de l'air pur, de la nourriture, de l'eau, des abris et de la sécurité (U.S Global Change Research Program, 2016). La vulnérabilité aux risques liés au changement climatique peut exacerber les défis socio-économiques actuels (IPCC, 2007).

#### **1.1.6.4 Neige et glace terrestre**

Les changements possibles dans le bilan massique des glaciers sont parmi les conséquences les plus importantes de l'avenir (Jóhannesson et al., 2006). La réaction des glaciers au réchauffement atmosphérique est devenue une question clé dans les discussions scientifiques, publiques et même politiques sur les impacts humains sur le système climatique (Francou et al., 2007).

La tendance prédominante au rétrécissement continu des glaciers à l'échelle mondiale peut en effet constituer l'une des indications les plus claires de la nature d'un changement climatique rapide à l'échelle mondiale. Plus d'un siècle d'observations systématiques et coordonnées à l'échelle internationale fournissent une documentation quantitative de cette évolution et une base pour l'élaboration de modèles en vue de scénarios futurs possibles. Les chaînes de montagnes situées à des latitudes plus basses ont perdu un grand pourcentage de leurs surfaces et volumes glaciaires depuis la



fin du Petit Âge glaciaire. Beaucoup d'entre elles pourraient même être largement voire complètement déglacées dès les prochaines décennies (Haeberli et al., 2013).

### **1.1.6.5 Evapotranspiration**

Le changement climatique et l'un des plus grandes menaces du monde moderne, a aussi son part des changements qui se produisent dans les terres humides (Jarabíková et al., 2015). Bien que les taux d'évapotranspiration (ET) augmentent avec la température, d'autres facteurs en plus de l'augmentation des températures affectent également l'ET. Par exemple, l'augmentation de l'humidité et des concentrations plus élevées de CO<sub>2</sub> ont tendance à réduire la transpiration et à contrecarrer les effets des températures plus élevées sur l'ET (Snyder et al., 2011).

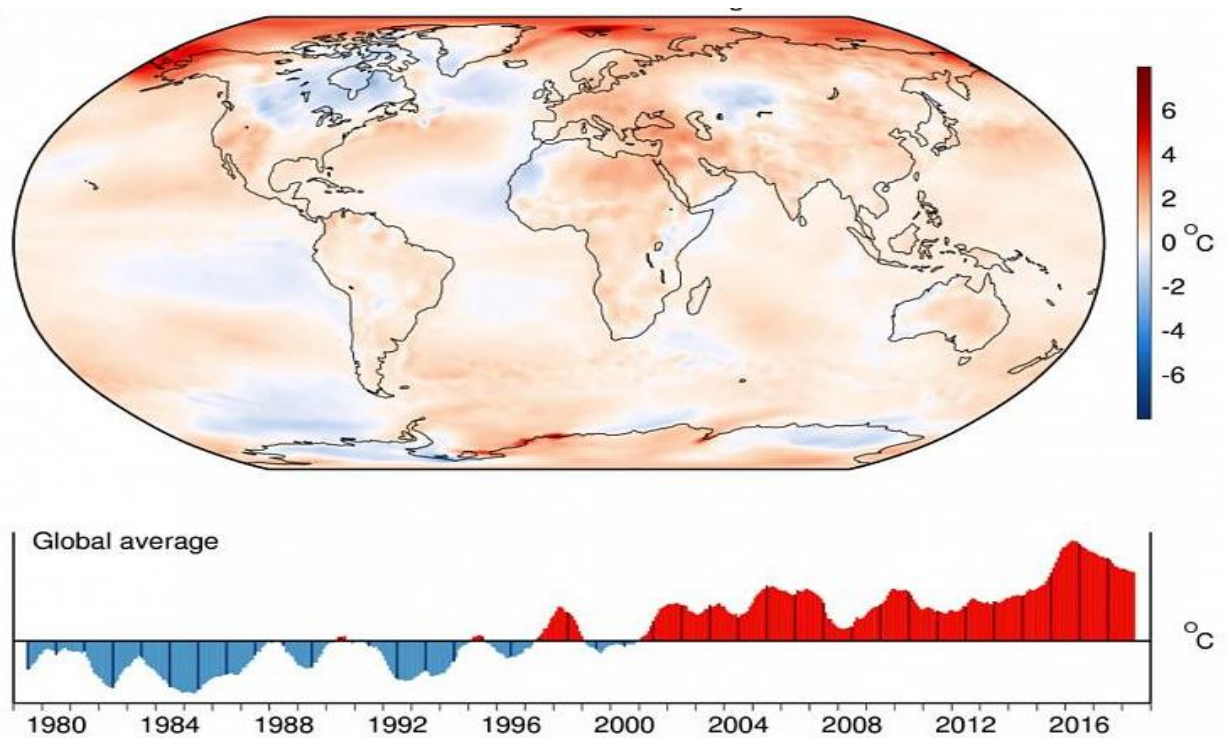
## **1.1.7 Changement climatique observé au cours du 20<sup>ème</sup> siècle**

### **1.1.7.1 Changement climatique à l'échelle globale**

Selon la National Aeronautics and Space Administration (NASA ; en français : l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace) et le GIEC, la température mondiale a augmenté de 1,4°F depuis 1880 (NASA, 2015) (Figure 1.3). Les niveaux de CO<sub>2</sub> ont atteint 400,71 parties par milliard, la perte du couvert forestier mondial entre 2000 et 2012 est de 1,5 million de km<sup>2</sup>. La réduction de la glace terrestre de 287 milliards de tonnes métriques par an, l'augmentation du niveau de la mer de 3,2 mm par an et celle de la glace arctique de 13,3% par décennie.

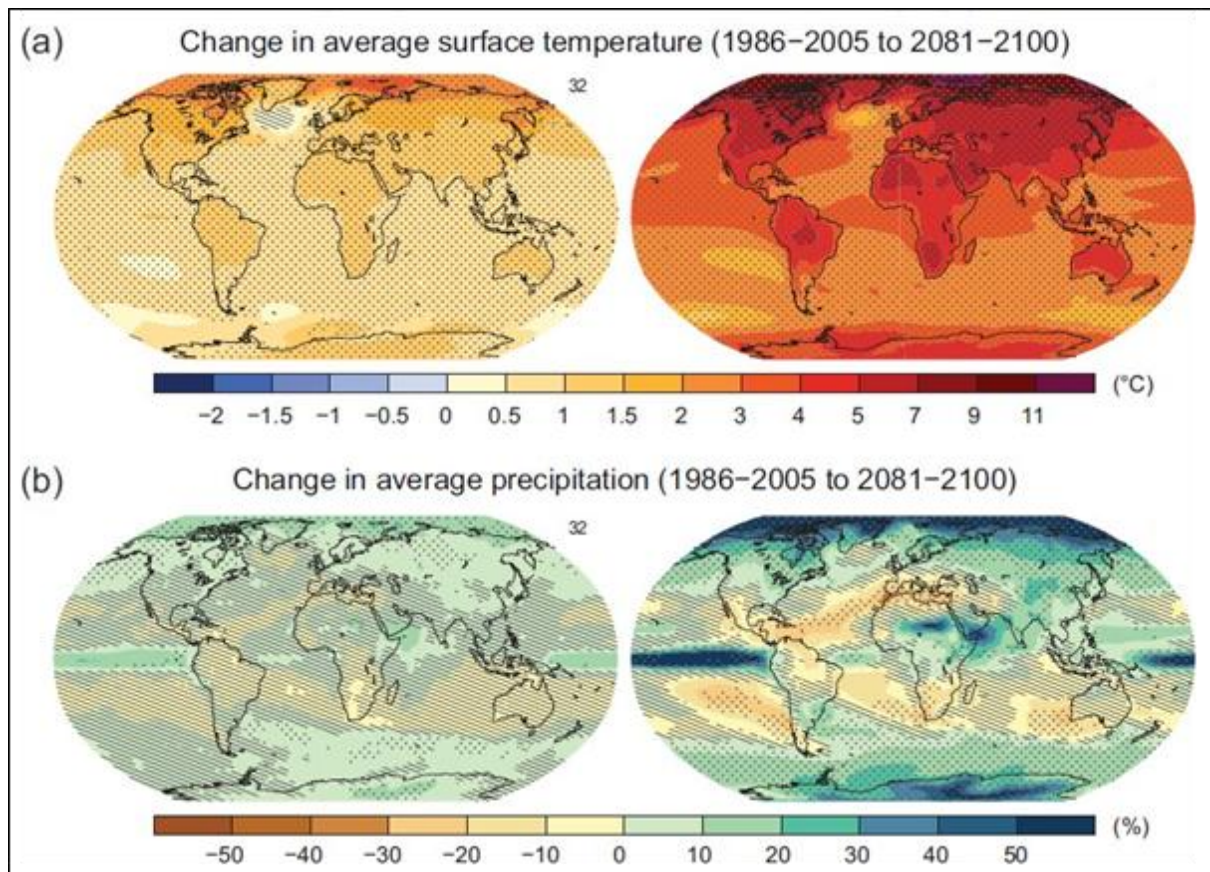
Le risque croissant de changements irréversibles dus à un changement à grande échelle du système climatique, tel que plusieurs espèces sensibles telles que les coraux océaniques, les oiseaux aquatiques, les reptiles tels que les tortues marines et les amphibiens est en voie d'extinction.

L'échec des cultures entraînant la famine dans de nombreux pays d'Afrique orientale, diminution de la quantité d'eau potable en Méditerranée et en Afrique australe et augmentation de l'intensité des phénomènes extrêmes, tels que les incendies de forêt (Australie et Indonésie), les inondations (Bangladesh), les tempêtes (tornades et ouragans aux États-Unis), les sécheresses (région du Sahara) et les vagues de chaleur mortelles (Inde en 2015) enregistrées dans de nombreuses régions du monde (Sivaramanan, 2015).



**Figure 1.3.** La température moyenne de l'air en surface entre 2017 et 2018 par rapport à sa moyenne de 1981-2010 (OMM, 2019)

En fonction du fait que le changement climatique futur dépend fortement du réchauffement de la planète, il est particulièrement important de prévoir la température future de la terre. Différents scénarios de modèles de circulation générale ont prédit une augmentation de la température de la planète en 2060 de 2 à 2,5 degrés centigrades. Alors que le dernier rapport GIEC estime l'augmentation moyenne des températures pour l'année 2060 à environ 1,5 degré centigrade. Si la concentration des gaz à effet de serre à la vitesse actuelle augmente à 7,0 % par an, alors la plupart des modèles existants pour augmenter la température moyenne de la Terre d'environ 2100 sont d'environ 2°C (Figure 1.4). Malgré l'incertitude de ces prévisions, il faut se rappeler que si la température actuelle augmente de 1°C, la Terre atteint sa température maximale depuis 10 000 ans (Rezaie Narimisa, 2018).



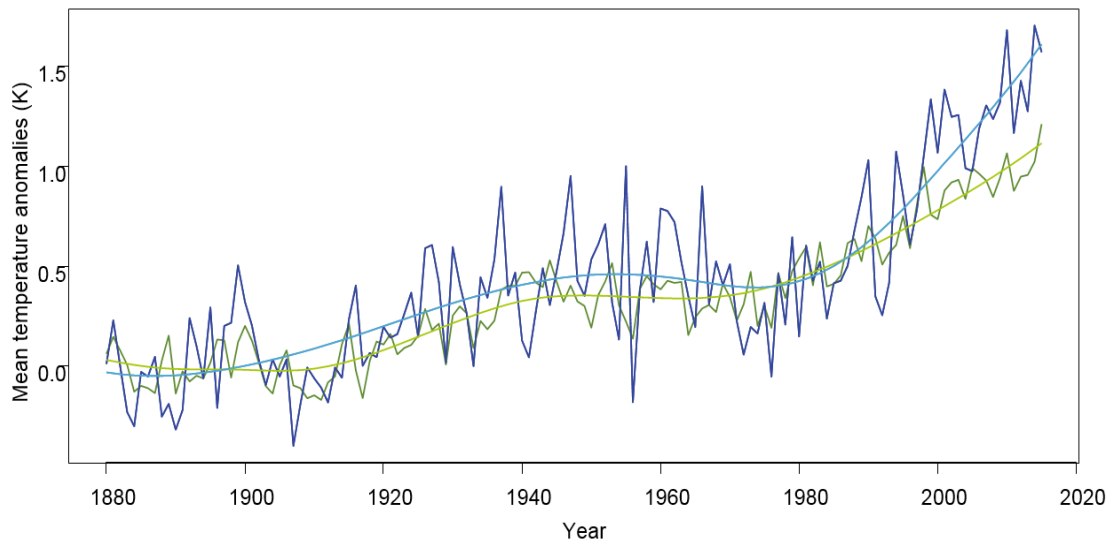
**Figure 1.4.** Changement de température en surface et de précipitations projetées pour la période 2081-20100 par rapport à la période 1980-1999 (IPCC, 2013).

### 1.1.7.2 Changement climatique dans la région méditerranéenne

La région méditerranéenne a un climat très spécifique avec des étés très secs et des hivers humides, qui peuvent être très sensibles aux changements climatiques potentiels (Ulbrich et al., 2006).

Les taux observés de changement climatique dans le bassin méditerranéen dépassent les tendances mondiales pour la plupart des variables. À l'échelle du bassin, les températures moyennes annuelles sont maintenant de 1,4°C supérieures à celles de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, en particulier pendant les mois d'été. Les vagues de chaleur sont maintenant plus fréquentes et la fréquence et l'intensité des sécheresses ont augmenté depuis 1950 (Figure 1.5). Pour chacune des dernières décennies, la surface de la mer Méditerranée s'est réchauffée d'environ 0,4°C. Au cours des deux dernières décennies, le niveau de la mer a augmenté d'environ 3 cm par décennie, ce qui est comparable aux tendances mondiales, mais en partie à cause de la variabilité décennale liée à l'oscillation Nord-Atlantique (ONA, plus connue sous le sigle anglais NAO pour North Atlantic Oscillation). Il s'agit d'une forte augmentation par rapport à la période 1945-2000 (de 0,7± 0,2 mm par an) et à la période 1970-2006 où elle a atteint 1,1 mm par an. Le pH de l'eau de mer

méditerranéenne diminue actuellement de 0,018 à 0,028 unité de pH par décennie (Cramer et al., 2018).



**Figure 1.5.** Le réchauffement de l'atmosphère d'échelle mondiale et dans le bassin méditerranéen.

Les anomalies annuelles moyennes de la température de l'air sont présentées par rapport à la période 1880-1899, le bassin méditerranéen (en bleu) et le globe (en vert) étant présentés avec (courbes claires) et sans lissage (courbes noires). (Cramer, W et al., 2018)

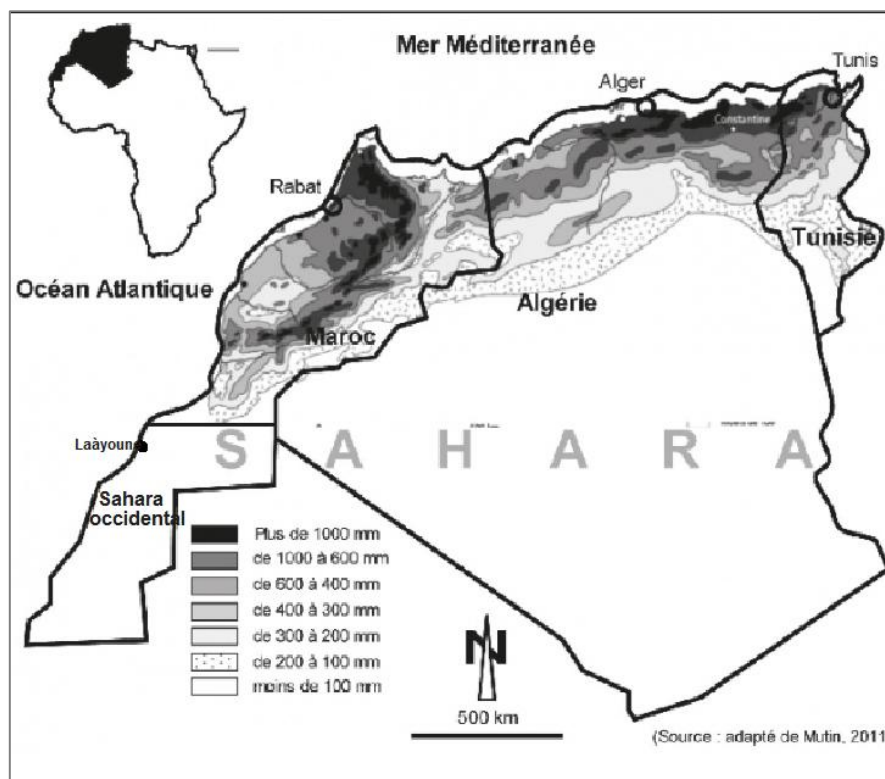
Les impacts les plus critiques des changements climatiques dans la région méditerranéenne sont probablement liés à la disponibilité en eau. L'ensemble de la région est déjà vulnérable à la pénurie d'eau et à la sécheresse, en particulier dans les pays du Sud et de l'Est, tandis que même dans les pays du Nord, un pourcentage croissant de la production d'eau n'est pas durable, ce qui conduit à une surexploitation des ressources en eaux souterraines. Une situation très critique du point de vue du changement climatique dans la région, avec des précipitations diminuées et des pénuries d'eau structurelles, devrait toucher 60 millions de personnes dès 2025. Une autre caractéristique des ressources en eau en Méditerranée est leur répartition géographique irrégulière : 71% sont situés au Nord, 9% au Sud et 20% au Proche-Orient (UN, 2017).

### 1.1.7.3 Changement climatique au Maghreb

La région du Maghreb est gravement menacée par les changements climatiques et apparaît comme l'une des régions les plus vulnérables au monde en termes de ressources en eau face au changement climatique. Les effets du changement climatique pourraient accroître sensiblement la pertinence des politiques de mise en valeur de l'eau, étant donné que la croissance économique de la majorité des pays du Maghreb est étroitement liée aux ressources en eau et contribue fortement à l'équilibre socio-

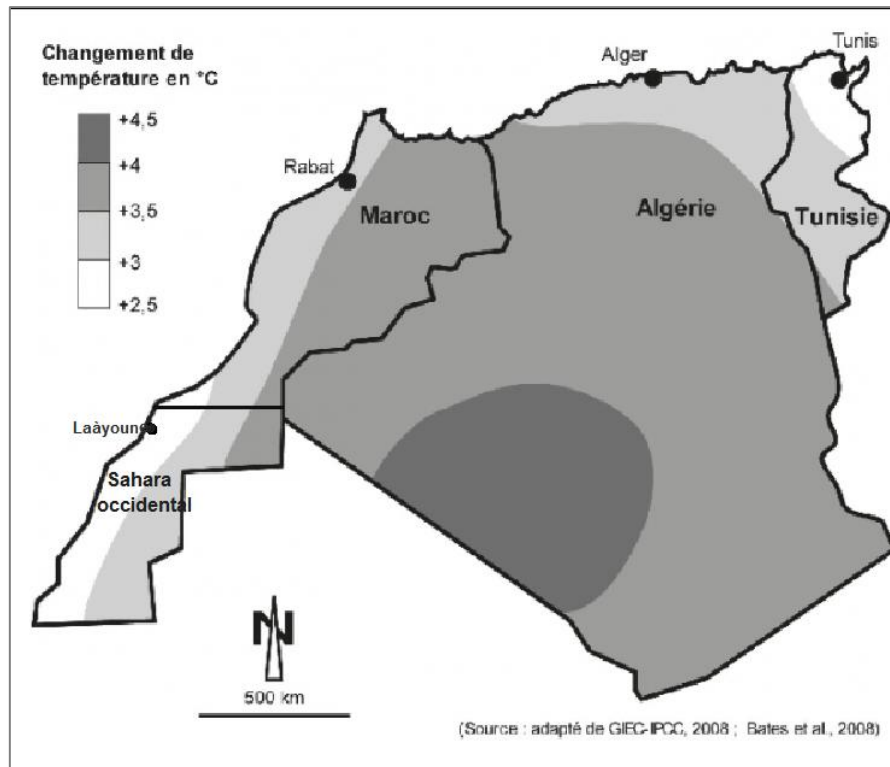
économique et au produit intérieur brut. Dans la région du Maghreb, la nécessité d'intégrer le changement climatique dans les plans de développement est déjà reconnu et souligné (Oualkacha et al., 2017).

Au Maghreb, les volumes moyens des précipitations sont estimés à  $357 \text{ km}^3/\text{an}$ , soit une lame d'eau de 110 mm. La faiblesse de cette lame s'explique par l'aridité climatique plus ou moins marquée selon les régions (Figure 1.6). L'ET, réelle qui est importante, prélève environ 88% des précipitations. Ces dernières, concentrées sur la saison froide (80%), touchent principalement la frange côtière algéro-tunisienne et les montagnes de l'Atlas marocain. Les sécheresses pluriannuelles sont un problème crucial pour les économies des pays du Maghreb. Elles sont de plus en plus longues et rapprochées dans le temps (Stockton, 1988 ; Mutin, 2011). Les eaux de surface, en particulier, sont largement dépendantes de la variabilité des précipitations.



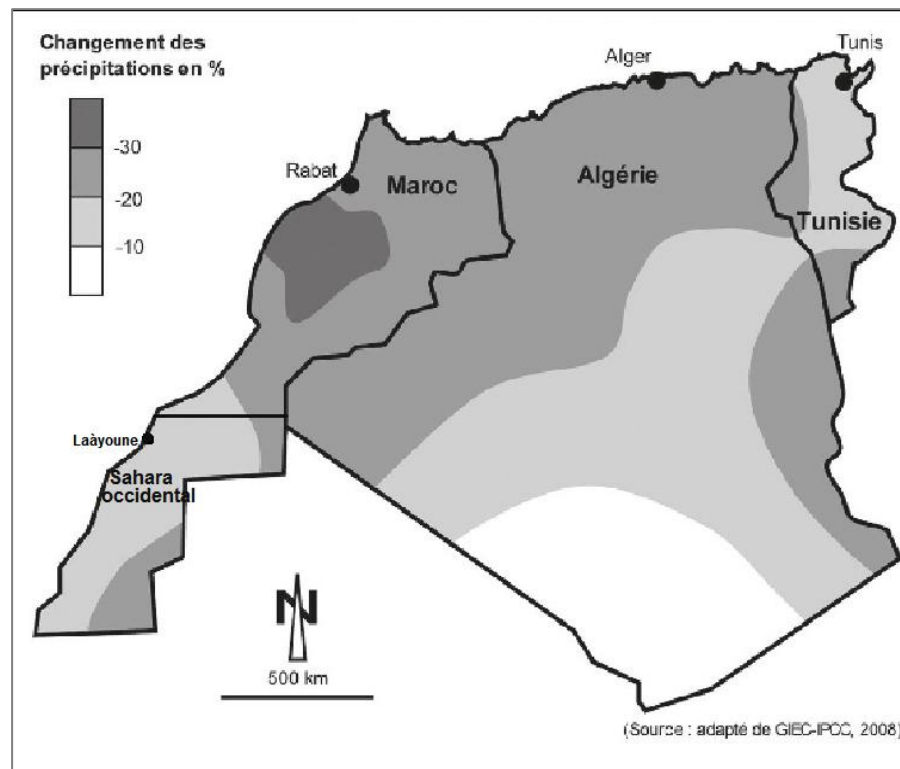
**Figure 1.6.** Les précipitations moyennes annuelles (1960-2010) (Mutin, 2011).

D'ici 2100, les scientifiques estiment que les pays du Maghreb connaîtront un réchauffement de 2,5 à 4,5°C par rapport aux températures enregistrées à la fin du XX<sup>e</sup> siècle. En raison de la grande superficie de son territoire saharien, l'Algérie serait le pays le plus touché, car plus de 90 % de son territoire subirait une augmentation comprise entre 3,5 et 4,5°C (Taabni et al., 2012) (Figure 1.7).



**Figure 1.7.** Le changement des températures annuelles à l’horizon 2080/2099 par rapport à 1980/1999 (moyenne de 21 modèles) (IPCC, 2007).

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, Les précipitations ont diminué de 20% dans plusieurs parties de l'Europe du Sud, cette diminution a été aussi enregistré dans plusieurs pays de l’Afrique du Nord. Les prévisions pour le XXI<sup>e</sup> siècle prévoient une diminution allant jusqu'à 30 % (Figure 1.8).



**Figure 1.8.** Le changement des précipitations annuelles à l'horizon 2080/2099 par rapport à 1980/1999 (moyenne de 21 modèles) (IPCC, 2007).

#### 1.1.7.4 Changement climatique en Algérie

L'eau est l'une des matières premières les plus importantes en Algérie. En raison de son importance, il est essentiel de connaître sa vulnérabilité aux changements climatiques. En Algérie, la vulnérabilité due aux changements climatiques s'exprime à travers plusieurs aspects : explosion démographique, réduction probable des écoulements d'eau, rareté des ressources, dégradation des infrastructures hydrauliques, menaces sur les zones humides, etc. (Touitou et al., 2018).

Depuis 1950, le niveau de CO<sub>2</sub> ne cesse de croître. Dans le cadre du programme international Veille de l'Atmosphère Globale (VAG) qui contribue à améliorer la compréhension des interactions entre l'atmosphère, les océans et la biosphère, le CO<sub>2</sub> mesuré à la station VAG d'Assekrem (altitude : 2710 m), Tamanrasset, Algérie, augmente régulièrement de 360 ppm en 1995 à 385 ppm en 2008, soit une augmentation annuelle de 2 ppm/an. L'Algérie a réalisé deux inventaires nationaux des émissions à GES pour les années 1994 et 2000. L'inventaire portait sur les six gaz à effet de serre directs (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub> et CFC) et les précurseurs indirects des gaz à effet de serre (NO<sub>x</sub>, CO, NMVOC et SO<sub>2</sub>). La part des émissions de chaque gaz à effet de serre est illustrée dans la Figure 1.9 et la Figure 1.10 (MATE, 2010).

A l'horizon 2050, une diminution de la pluviométrie a été envisagée qui varie de 10 à 15%. En hiver, l'augmentation de la température est de l'ordre de 0,9 à 1,6°C d'ici 2050. (Sahnoune et al., 2013).

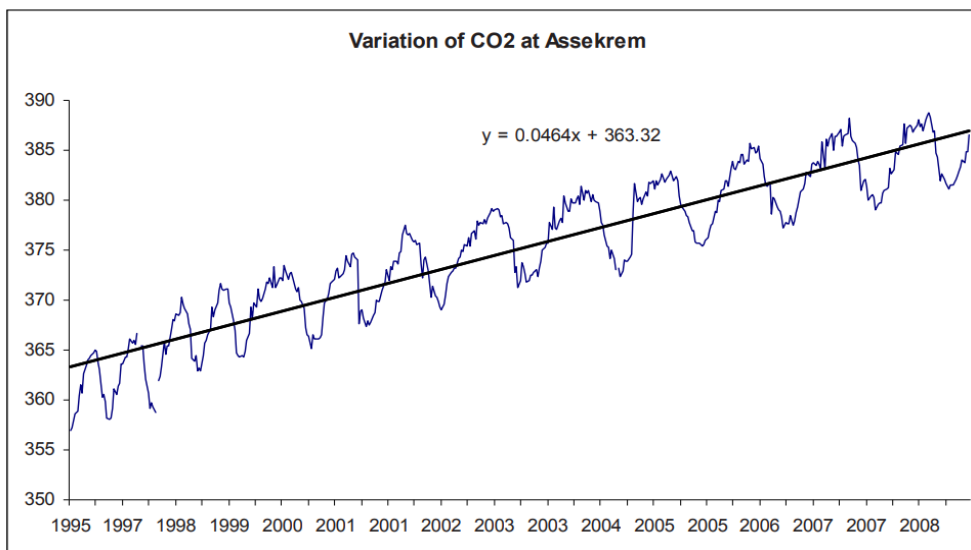


Figure 1.9. Évolution du CO2 à la station d'Assekrem (ONM, 2009)

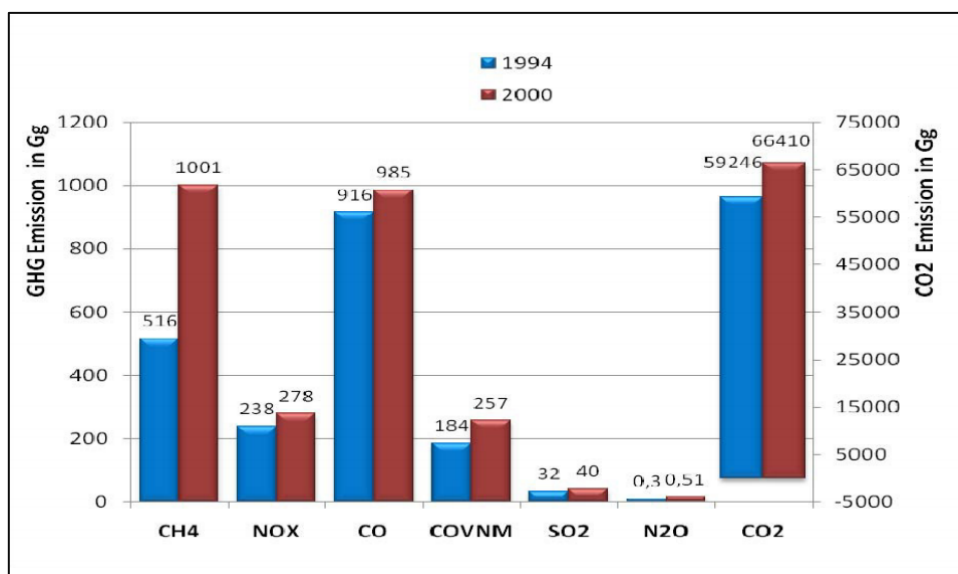


Figure 1.10. Émissions de GES du secteur de l'énergie en 1994 et 2000 (MATE, 2010).

## 1.2 Ressources en eau en Algérie

Le climat est semi-aride et est sujet à la pénurie d'eau. Le pays affiche l'un des taux de croissance démographiques moyens les plus élevés (environ 1,17 %) (Drouiche et al., 2012) et des réserves d'eau naturelles limitées.

Actuellement, la situation en Algérie est caractérisée par un déséquilibre entre les besoins et les



ressources disponibles. Les besoins exprimés par les différents utilisateurs sont nettement supérieurs aux ressources en eau mobilisées, ce qui génère des conflits de mission et nécessite des arbitrages parfois difficiles. De plus, la pollution des eaux souterraines et des ressources de surface par les déchets domestiques, industriels et agricoles dépasse de loin les capacités de traitement des systèmes d'épuration. Ces dégradations réduisent les volumes d'eau susceptibles d'être utilisés (Messahel et al., 2007).

En conséquence, la quantité d'eau renouvelable disponible en Algérie est passée d'une moyenne de 1500 mètres cubes par personne et par an ( $m^3/p/an$ ) en 1962 à  $630 m^3/p/an$  en 1998 et à  $430 m^3/p/an$  dans les années prochaines (Kettab, 2001). La disponibilité moyenne pour la consommation domestique est de 55 litres par habitant et par jour, et l'eau est généralement coupée dans presque toutes les villes (Rubio et al., 2009). L'irrigation agricole est le principal secteur consommateur d'eau, suivie par les secteurs domestique et industriel. L'eau destinée à l'irrigation est tombée de 80 % en 1960 à environ 60 % en 2002 (Drouiche et al., 2012).

Les ressources en eaux en Algérie sont de 17,2 milliards de  $m^3$  (eaux de surface 12,4 milliards de  $m^3$  et eaux souterraines 6,92 milliards de  $m^3$  principalement au Sahara) (Bessaoud, 2019).

Les aquifères souterrains situés au nord du pays sont exploités à 90%, avec 2 milliards de  $m^3$  par an. Certains aquifères deviennent surexploités. Dans la région du Sahara (Bessaoud, 2019 ; Drouiche et al., 2012), le volume extrait est évalué à 1,7 milliard de  $m^3$  (Boukhari, 2018). En ce qui concerne la qualité de l'eau, le rapport national de l'Algérie, sans faire de distinction entre eaux de surface et eaux souterraines, indique que dans l'inventaire mondial des eaux, "44% seraient de bonne qualité, 44% de qualité satisfaisante et 12% de mauvaise qualité". L'approvisionnement en eau douce et en eau potable est assuré par les trois sources suivantes:

- Eaux de surface (réservoir d'eau de pluie).
- Eau souterraine.
- Sources d'eau non conventionnelles (Tableau 1.2) (Drouiche et al., 2012).

La stratégie de l'eau se concentre sur le dessalement pour les villes côtières, les barrages de taille moyenne à irriguer. Les montagnes intérieures et les hauts plateaux, ainsi que d'ambitieux projets de transfert d'eau interconnectant les barrages algériens pour acheminer l'eau vers des régions isolées du pays. Le traitement des eaux usées et les technologies de recyclage de l'eau sont également très recherchés. L'objectif principal de la politique de l'eau du pays consiste à fournir suffisamment d'eau potable pour l'approvisionnement de la population (Tableau 1.3) (Boukhari, 2018).

**Tableau 1.2.** Mobilisation des ressources en eau en Algérie (Drouiche et al., 2011).

Utilisation de l'eau	2000	2011	2025
Nombre de barrages	47	58	110
Barrages (capacité mobilisée)	4.3	6.9	9
Barrages (volume mobilisé)	1.6	4.3	6
Surface (prises RC)	0.2	0.4	0.5
Eaux souterraines du Nord	1.8	2	2.5
Les eaux souterraines Nord-Sahara	1.4	3	4
Dessalement	0	0.54	0.84
Réutilisation	0	0.1	0.9
<b>Total (milliards de m<sup>3</sup>)</b>	<b>5</b>	<b>10.34</b>	<b>14.74</b>

**Tableau 1.3.** L'utilisation de l'eau en Algérie (Ministère des Ressources en Eau, MRE, Algerie, <http://www.mre.gov.dz>)

Utilisation de l'eau	(2006) milliard m <sup>3</sup> /an	(2030) milliard m <sup>3</sup> /an
Domestique et industriel	3.1	4.2-4.6
Irrigation	3.4	7.8-8.2
<b>Total</b>	<b>6.5</b>	<b>12-12.8</b>

### 1.2.2 Eaux superficielles

Le territoire national est représenté par une zone désertique à près de 87%, avec une pluviométrie faible (Figure 1.11), irrégulière et inégalement répartie dans l'espace et le temps. Elles se concentrent principalement dans le nord du pays. Depuis l'indépendance, la mobilisation des ressources en eau s'est concentrée sur les ressources en eaux souterraines.

L'augmentation rapide de la demande en eau dans les secteurs de l'irrigation et de l'industrie, ainsi que les besoins progressifs de la population, ont conduit les pouvoirs publics à mobiliser de plus en plus de ressources de surface. Ainsi, les efforts entrepris au cours de la décennie actuelle ont conduit à des améliorations significatives. Sur le territoire algérien, 72 barrages sont en service avec une capacité d'environ 7,4 milliards de m<sup>3</sup> (Elmeddahi, 2016 ; Elmeddahi et al., 2015) .

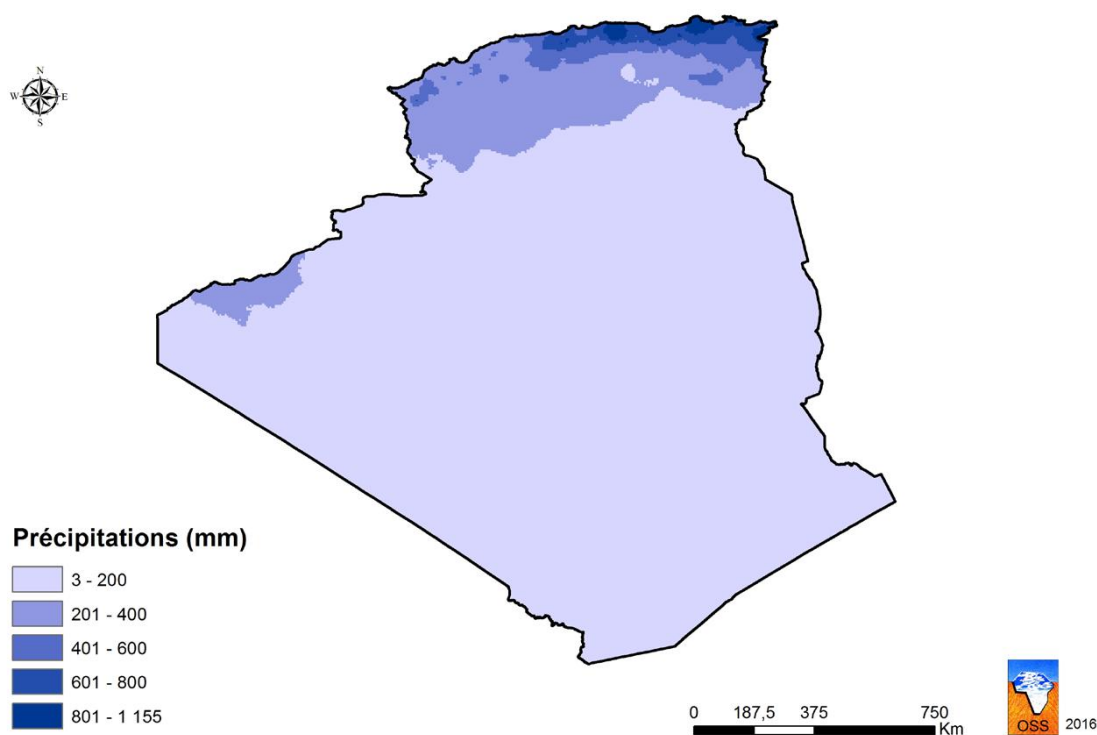
#### 1.2.1.1 Les potentialités hydriques

Les apports d'eau de surface atteignent plusieurs millions de mètres cubes pour les bassins ayant le moins d'eau: les bassins du Sahara Djorf Torba-Béchar (350 hm<sup>3</sup>) et Brézina-El Bayath (122 hm<sup>3</sup>),

et des milliards de mètres cubes pour ceux ayant le plus d'eau : Beni Haroun-Mila (1000 hm<sup>3</sup>) et Kissir-Jijel (680 hm<sup>3</sup>).

Ce ruissellement est en grande partie dû à des inondations rapides et puissantes. Ils sont généralement enregistrés sur une période moyenne estimée de 20 à 30 jours pour les bassins du Sud de l'Algérie et de deux à trois mois pour les bassins du Nord de l'Algérie (Figure 1.12) (Hamiche et al., 2016).

Les bassins de l'Ouest ne reçoivent que 10% du débit avec une surface représentant le tiers de celle du Nord du pays. Celles de l'Est drainent 40% avec seulement 20% de la surface totale et les bassins du centre drainent 50% des écoulements avec 50% du reste de la surface. On estime à près de 1,6 milliard le volume régularisé par an (Boucekima et al., 2008).



**Figure 1.11.** Précipitations (carte de l'Algérie) (moyennes annuelle entre 1981 et 2015) (Ghzel, 2018)



**Figure 1.12.** Cinq principaux bassins hydrauliques de l'Algérie (Hamiche et al., 2016).

D'après les documents du ministère des ressources en eau (MRE) (Tableau 1.4),

- 10 milliards de m<sup>3</sup> dans les régions du nord: 7,4 (eaux de surface), 2,6 (ressources souterraines);

- 5,37 milliards de m<sup>3</sup> dans les régions sahariennes: 0,37 (eau de surface), 5 (ressources souterraines de la nappe phréatique d'Albian).

Le potentiel en eau en Algérie est représenté dans le tableau 1.5

**Tableau 1.4.** Ressources en eau (Hamiche et al., 2016).

Basin	Eaux de surface (milliards de m <sup>3</sup> )	Eaux souterraines (milliards de m <sup>3</sup> )	Total (milliards de m <sup>3</sup> )
Oranie	0.65	0.6	1.25
Cheliff	1.71	0.83	2.54
Algérois	1.69	0.74	2.43
Constantinois	3.00	0.43	3.43
Sahara	0.37	5	5.37
<b>Total</b>	<b>7.42</b>	<b>7.6</b>	<b>15.02</b>

**Tableau 1.5.** Les potentialités en eau superficielle des bassins hydrographiques de l'Algérie (MRE, 2012).

Région Hydrographiques	Bassins versants	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Apport (Hm <sup>3</sup> /an) période globale	Apport (Hm <sup>3</sup> /an) période sèche	Taux de réduction en %
Cheliff- Zahrez	Cheliff	43750	1540	1078	30
	Zahrez	9102	110	77	30
Algérois-Hodna-Soummam	Côtiers Algérois	51089	4290	2634	39
	Isser				
	Soummam				
	Chott Hodna				
Constantinois-Seybouse-Mellegue	Côtiers Constantinois	44219	4985	4137	17
	Kébir Rhumel				
	Medjerdah				
	Seybouse				
	H.P.Constantinois				
Oranie-Chott Chergui	Côtiers Oranais	76835	-	1371	32
	Macta				
	Tafna				
	H.P.Oranais				
Sahara	Sahara	168750	620	440	29
	Chott Melrhir				

### 1.2.3 Eaux souterraines

L'Algérie dispose également d'importantes ressources en eau souterraine, qu'il s'agisse d'eau fossile renouvelable ou non renouvelable.

- **Au Nord**

Dans le nord montagneux, 147 aquifères renouvelables peu profonds ont été identifiés. Ils sont exploités à l'aide de puits et de sources peu profonds. À l'époque précoloniale, les villes d'Alger, de Tlemcen et de Constantine étaient approvisionnées en produits frais provenant de jardins irrigués à partir de ces aquifères peu profonds et facilement exploitables.

Quelque 1 900 hm<sup>3</sup>/an d'eaux souterraines renouvelables sont disponibles, mais les prélèvements sont estimés à 2 400 hm<sup>3</sup>/an, ce qui signifie que certains de ces aquifères sont surexploités principalement en raison de la demande croissante en eau. (MRE, 2012).

Une mauvaise gestion est liée à la mauvaise connaissance de la ressource, à la prolifération de puits illicites et à la mauvaise coordination entre les différentes autorités responsables des eaux souterraines. Les estimations suggèrent que les eaux souterraines représentent jusqu'à 63% des besoins en eau de la région (FAO, 2009).

Il existe trois principaux types d'aquifères : les aquifères alluviaux de remplissage par les pluies et les débris fluviaux le long des plaines côtières ; les aquifères de grès et de calcaire dans les zones montagneuses ; et les aquifères alluviaux le long des vallées fluviales.

La plupart d'entre eux sont rechargeables chaque année (UN, 1988). Les principaux aquifères sont répertoriés dans le Tableau 1.6

**Tableau 1.6.** Principaux aquifères du Nord (FAO, 2009)

Aquifère	Utilisation de l'eau (Hm <sup>3</sup> )	Aquifère	Utilisation de l'eau (Hm <sup>3</sup> )	Aquifère	Utilisation de l'eau (Hm <sup>3</sup> )
<b>Les grandes plaines</b>		<b>Formation de grès et de calcaire</b>		<b>Aquifères alluviaux et grands fleuves</b>	
Mitidja	327	Tlemcen	90	Cheliff	56
Annaba	45	Chott Chergui	55	Soummam	100
Mascara	70	Plateau de Saida	50	Sebaou	53
Sidi Bel Abbas	44	Tolga	60	Rhumel-Kabir	40
Plain Hodna	110				
<b>Total</b>	<b>596</b>		<b>255</b>		<b>249</b>

L'exploitation des eaux souterraines est limitée par l'altitude, la fragmentation et la compartimentation des réservoirs en raison de l'érosion et/ou de la tectonique, et par le risque d'intrusion de sel près de la côte ou à proximité de dépressions fermées.

Les montagnes constituent la principale source d'eau de surface pour l'agriculture et l'usage domestique, ainsi que pour la recharge des nappes souterraines. Seuls les ruisseaux saisonniers coulent vers le sud de l'Atlas tellien.

- **Au Sud**

Dans la région du sud du Sahara, les eaux souterraines comprennent principalement de l'eau fossile dont la recharge est négligeable. Les estimations du rapport national suggèrent que le potentiel économiquement exploitable est d'environ 5 000 hm<sup>3</sup>/an. Ceci est basé sur des estimations de modélisation qui prennent en compte la qualité de l'eau et les coûts de production. La consommation actuelle n'est que d'environ 2 200 hm<sup>3</sup>/an. Les eaux souterraines représentent environ 96% de l'utilisation totale d'eau dans la région (FAO, 2009).

Bien que six aquifères principaux aient été identifiés, la majeure partie des ressources en eau est contenue dans deux grands systèmes aquifères confinés, le complexe terminal (CT) et la couche continentale intermédiaire (CI). Ces aquifères sont exploités conjointement avec la Libye et la Tunisie et forment ensemble le Système Aquifère Septentrional Saharien (SASS). Il existe également un aquifère rechargeable peu profond qui représente environ 700 hm<sup>3</sup> par an (FAO, 2009).

### **1.3 Modèles climatiques**

#### **1.3.1 Historique du développement du modèle de changement climatique**

Les modèles climatiques numériques permettent d'estimer physiquement la gamme des changements climatiques futurs.

Ces modèles, qui reposent sur les lois fondamentales de la physique et de la chimie (conservation de l'énergie, de la masse, de la dynamique, etc.), sont d'une valeur inestimable pour fournir des informations scientifiques en vue de la prise de décision politique et sociétale. Lorsqu'il s'agit d'évaluer les effets d'un doublement de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>, tel qu'il est prévu vers 2050, et d'autres changements dans la composition de l'atmosphère, seuls des modèles climatiques numériques peuvent fournir une réponse quantitative fondée (Stocker, 2011).

Les prévisions climatiques sont développées dans les années 1950 comme l'une des premières applications informatiques. Presque immédiatement, il est devenu évident que les ordinateurs pouvaient être utilisés pour la simulation numérique afin d'étudier le climat. Norman Phillips en a fait la démonstration pour la première fois en 1956. Les premiers modèles météorologiques étaient axés sur la dynamique des fluides plutôt que sur le transfert radiatif et le bilan énergétique de l'atmosphère, qui sont d'une importance capitale pour les simulations climatiques. Toutefois, comme la simulation climatique porte sur des échelles de temps plus longues qu'une saison, les océans et la glace de mer ont été inclus dans le système de modélisation. Ainsi, les modèles de l'océan et de la glace ont été couplés à des modèles atmosphériques. Les premiers modèles climatiques globaux (MCG) océaniques ont été élaborés par Bryan et Cox dans les années 1960, puis couplés à l'atmosphère par Manabe et Bryan dans les années 1970. Parallèlement aux événements survenus aux États-Unis, les années 1960 et 1970 ont également été une période de développement de modèles

climatiques et météorologiques dans le monde entier, avec l'émergence de grands centres en Europe et en Asie (White, 2013).

Ces groupes se sont réunis à Stockholm en août 1974, sous l'égide du Programme de recherche sur l'atmosphère globale, pour produire un traité fondamental sur la modélisation climatique.

Cette rencontre a permis d'établir des collaborations qui favorisent encore aujourd'hui la coopération internationale. L'utilisation de modèles climatiques dans la recherche sur le dioxyde de carbone et le climat a commencé au début des années 1970. L'étude importante, "Inadvertent Climate Modification" (SMIC, 1971), a approuvé l'utilisation de modèles climatiques basés sur les MCG pour étudier la possibilité d'un changement climatique anthropique. Grâce à l'amélioration continue des observations climatiques et de la puissance des ordinateurs, les groupes de modélisation ont fait progresser leurs modèles grâce à des améliorations constantes mais progressives. Vers la fin des années 1980, plusieurs organisations nationales et internationales se sont formées pour évaluer et élargir la recherche scientifique liée au changement climatique mondial. Ces développements ont stimulé l'intérêt pour l'accélération du développement de modèles climatiques améliorés (Ouzeau et al., 2014 ; White, 2013).

Le Groupe de travail 1 du GIEC des Nations Unies, qui a débuté en 1988, s'est principalement intéressé à l'étude scientifique des processus physiques régissant les changements climatiques. La première évaluation scientifique du GIEC (GIEC, 1990) a déclaré : " l'amélioration de la prévision du changement climatique dépend de l'élaboration de modèles climatiques, ce qui est l'objectif du programme de modélisation climatique du programme mondial de recherche sur le climat "(IPCC, 1990).

Le GIEC est chargé d'évaluer les informations scientifiques, techniques et socio-économiques disponibles sur le changement climatique de manière méthodique, claire et objective et sans préjugés. Le GIEC travaille avec des perspectives et des incertitudes différentes, tout en dégageant clairement les événements qui relèvent d'un consensus de la communauté scientifique le GIEC est aussi chargé d'estimer les risques et les conséquences du changement climatique, d'envisager des stratégies d'adaptation aux impacts et d'atténuation des émissions de GES. L'une des principales activités du GIEC est l'évaluation périodique de l'état des connaissances (1990, 1995, 2001, 2007, 2014).

Le GIEC a proposé aux scientifiques du monde de se concentrer sur l'étude du climat futur. Actuellement, la communauté scientifique ne dispose que des modèles climatiques pour tenter de savoir ce qui peut se passer à l'avenir (Elouissi, 2016).

### **1.3.2 Modèles climatiques**

Les modèles climatiques sont des programmes qui calculent les paramètres climatiques et qui sont développés par une équipe de scientifiques.



Ce programme de calcul intègre les équations qui reproduisent les phénomènes atmosphériques et océaniques qui gèrent le climat et qui permettent de calculer la température, pression, humidité, densité, salinité, vitesse, etc. à un moment donné et à un endroit précis. En outre, pour chaque maille, on fixe les conditions initiales des paramètres climatiques avec lesquels l'ordinateur va travailler [s'il s'agit de la terre émergée ou à de l'eau, le type de végétation l'occupe, la température moyenne de départ, la pression, l'humidité, la salinité pour l'eau de mer, la couverture nuageuse, le vent, et plus généralement on initialise tous les paramètres utilisés]. La formation des nuages est un phénomène physique extrêmement difficile à étudier. Cependant, les nuages sont un élément important de la machine climatique. On estime que 70 % de la dispersion entre les modèles climatiques correspond à l'incertitude associée à la modélisation de la formation des nuages (Charles, 2015).

En termes généraux, un modèle climatique pourrait être défini comme une représentation mathématique du système climatique basée sur des principes physiques, biologiques et chimiques.

Les équations dérivées de ces lois sont si complexes qu'elles doivent être résolues numériquement. Par conséquent, les modèles climatiques fournissent une solution discrète dans l'espace et dans le temps, ce qui signifie que les résultats obtenus représentent des moyennes sur des régions, dont la taille dépend de la résolution du modèle, et pour des périodes spécifiques. Par exemple, certains modèles ne fournissent que des valeurs moyennes globales ou zonales alors que d'autres ont une grille numérique dont la résolution spatiale pourrait être inférieure à 100 km. Le pas de temps peut être compris entre quelques minutes et plusieurs années, selon le procédé étudié (Goosse, 2010).

Les modèles climatiques sont soumis à des tests plus approfondis, y compris, par exemple, l'évaluation des prévisions sur des échelles de temps allant de quelques jours à un an. Cet ensemble de tests plus divers augmente la confiance dans la fiabilité avec laquelle les modèles représentent des processus qui affectent les projections climatiques.

Des progrès substantiels ont été effectués dans la compréhension des différences inter-modèles en matière de sensibilité climatique à l'équilibre (Goosse, 2010).

Les modèles de circulation générale (MCG) sont les modèles climatiques les plus sophistiqués et sont le type de modèle actuellement utilisé par le GIEC (Charles, 2015).

Un modèle climatique n'est rien d'autre qu'un logiciel très complexe, il s'agit donc d'un ensemble de programme construit de la manière suivante :

- On découpe la surface terrestre et une colonne d'atmosphère (sur 70 km d'altitude) en petites boîtes de forme rectangulaires : les mailles du modèle (Charles, 2015).
- On sélectionne alors quelques paramètres considérés comme caractéristique pour le système dans son ensemble. Il peut s'agir de la température moyenne et de sa répartition, les

précipitations saisonnières, le taux d'humidité moyenne, la couverture végétale, la vitesse et la direction des vents, etc. (Ellouissi, 2016).

- Le programme informatique du logiciel calcule la valeur du paramètre climatique demandé dans chaque maille, à intervalles de temps réguliers (en fonction de la puissance informatique dont on dispose). (Figure 1.13)

La précision de simulation du modèle climatique s'évalue par la résolution spatiale (Lorsque le modèle calcule les paramètres climatiques à une distance linéaire entre deux points géographiquement différents) et la résolution temporelle (plus petit intervalle de temps qui séparent 2 calculs d'un même paramètre climatique pour un même point) (Charles, 2015).

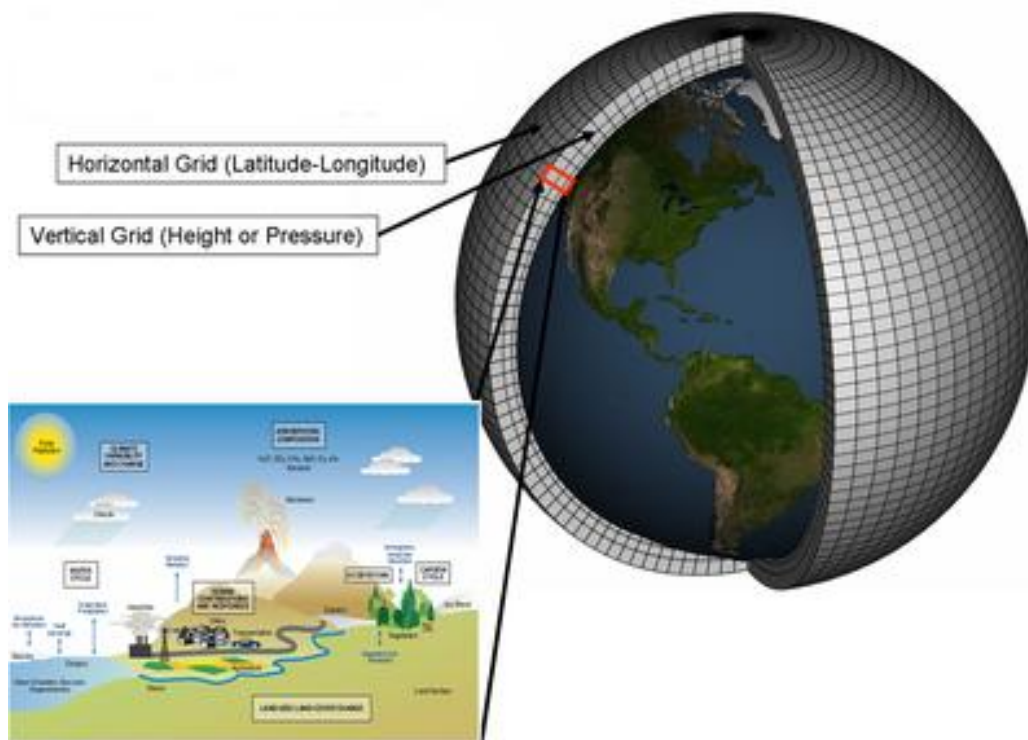


Figure 1.13. Exemple d'un maillage horizontal et vertical (spencer and Braswell, 2008)

### 1.3.3 Principes de bases d'un modèle de circulation générale de l'atmosphère

Un modèle de circulation générale de l'atmosphère calcule l'évolution temporelle de plusieurs variables, essentiellement le vent, la température et l'humidité, en différents points d'un "maillage" 3D qui couvre l'atmosphère entière.

A partir d'un état initial, le modèle calcule l'évolution de ces variables, pas à pas dans le temps.

- A un moment donné  $t$  nous connaissons la variable  $X_t$  à n'importe quel point de l'atmosphère ( $X$  représente soit  $u$  "vitesses du vent en m/s",  $T$  "température en °C", ou  $ps$  "conservation de la masse").

- On calcule ensuite son évolution due à l'advection ( $u, v, T$ ), aux forces de pression et à la force de Coriolis ( $u$  et  $v$ ) ou à la conservation de la masse ( $P_s$ ) c'est-à-dire, tous les termes explicitement représentée par les équations de la dynamique des fluides. Cette évolution s'appelle la tendance dynamique de  $X$  :  $(\partial_t X)_{\text{dyn}}$

- On calcule également son évolution due aux échanges turbulents avec le sol ( $u, v$  et  $T$ ) et dont les mouvements sont trop petits pour être représentés par la dynamique résolue par la grille du modèle. Nous calculons également l'évolution de la température liée au forçage radiatif infrarouge venant du sol, et visible venant du soleil et la réflexion depuis le sol. Cette évolution est appelée la tendance physique de  $X$  :  $(\partial_t X)_{\text{phy}}$

- Au pas de temps suivant,  $t+dt$ , on calcul  $X_{t+df}$  et fonction de  $X_t$  et des tendances, c'est l'intégration des variables dans le temps :

$$X_{t+\delta t} = X_t + (\partial_t X)_{\text{dyn}} \delta t + (\partial_t X)_{\text{phy}} \delta t \quad (\text{lott et guez, 2007}) \quad \text{I.1}$$

### 1.3.4 Vue d'ensemble des types de modèle à évaluer

Les modèles utilisés dans la recherche sur le climat vont des modèles simples de bilan énergétique aux modèles complexes du système terrestre. Nécessitant un calcul à haute performance de pointe. Le choix du modèle dépend directement de la question scientifique traitée (Held, 2005 ; Collins et al., 2006). Les applications incluent la simulation du climat paléo ou historique, des études de sensibilité et de processus pour l'attribution et la compréhension physique, la prévision de la variabilité et du changement climatiques à court terme, à des échelles de temps saisonnières à décennales, faire des projections des changements climatiques futurs au cours du siècle à venir ou plus et réduire ces projections pour fournir plus de détails à l'échelle régionale et locale.

Le coût de calcul est un facteur dans tous ces cas, de sorte que des modèles simplifiés (avec une complexité ou une résolution spatiale réduite) peuvent être utilisés lorsque des ensembles plus grands ou des intégrations plus longues sont nécessaires. Il peut s'agir, par exemple, de l'exploration de la sensibilité des paramètres ou de simulations du changement climatique à l'échelle millénaire ou à plus long terme.

#### 1.3.4.1 Modèles de circulation générale atmosphère-océan

Les modèles de circulation générale atmosphère-océan étaient les modèles climatiques "standard" évalués dans l'AR4 (Fourth Assessment Report). Leur première fonction est de comprendre la dynamique des composantes physiques du système climatique (atmosphère, océan, terre et glace de mer) et de faire des projections basées sur les futurs de GES et le forçage des aérosols.

Ces modèles continuent d'être largement utilisés et en particulier sont utilisés (parfois à plus haute résolution) pour des applications de prévision climatique saisonnière à décennale pour lesquelles les rétroactions biogéochimiques ne sont pas critiques.

#### 1.3.4.2 Modèles du système terrestre

Les modèles du système terrestre sont les modèles de pointe actuels et s'appuient sur les modèles de circulation générale atmosphère-océan pour inclure la représentation de divers cycles biogéochimiques comme ceux qui interviennent dans le cycle du carbone, le cycle du soufre ou l'ozone (Flato, 2011). Ces modèles fournissent les outils les plus complets disponibles pour simuler la réaction passée et future du système climatique au forçage externe, dans lequel les rétroactions biogéochimiques jouent un rôle important.

#### 1.3.4.3 Modèles du système terrestre de complexité intermédiaire

Les modèles du système terrestre de complexité intermédiaire tentent d'inclure des composantes pertinentes du système terrestre, mais souvent de manière idéalisée ou à une résolution inférieure à celle des modèles décrits ci-dessus. Ces modèles sont appliqués à certaines questions scientifiques telles que la compréhension des rétroactions climatiques à des échelles de millénaire ou l'exploration de sensibilités dans lesquelles de longues intégrations de modèles ou de grands ensembles sont nécessaires (Claussen et al., 2002; Petoukhov et al., 2005).

#### 1.3.5 Scénario climatique

Les modèles climatiques sont comparés à des scénarios. Il y a 40 scénarios différents, chacun faisant des hypothèses différentes sur la pollution future par les GES et l'utilisation du sol. Des hypothèses sur l'évolution technologique future ainsi que sur l'évolution économique future sont donc formulées pour chaque scénario. Des hypothèses sur l'évolution technologique future ainsi que sur l'évolution économique future sont donc formulées pour chaque scénario.

Un scénario climatique fait référence à un climat futur plausible qui a été construit pour une utilisation explicite dans l'étude des conséquences potentielles du changement climatique anthropique. Ces scénarios climatiques devraient représenter les conditions futures tenant compte à la fois du changement climatique induit par l'homme et de la variabilité naturelle du climat (IPCC, 2000).

Le GIEC a élaboré des scénarios d'émissions à long terme en 1990 et 1992. Ces scénarios ont été largement utilisés dans l'analyse des changements climatiques possibles, de leurs impacts et des options pour atténuer les changements climatiques.

En 1995, les scénarios du GIEC 1992 ont été évalués. L'évaluation a recommandé que des changements importants (depuis 1992) dans la compréhension des forces motrices des émissions et des méthodologies soient apportés. Ces changements dans la compréhension concernent, par

exemple, l'intensité en carbone de l'approvisionnement énergétique, l'écart de revenu entre pays développés et pays en développement et les émissions de soufre (IPCC, 2000).

#### 1.3.5.1 Scénarios SRES (Special Report on Emission Scenarios)

Le SRES est un rapport du GIEC qui a été publié en 2000. Les scénarios d'émissions de GES décrits dans le rapport ont été utilisés pour faire des projections des changements climatiques futurs possibles. Les scénarios du SRES, comme on les appelle souvent, ont été utilisés dans le troisième rapport d'évaluation (Third Assessment Report TAR) du GIEC, publié en 2001, et dans le quatrième rapport d'évaluation (Fourth Assessment Report AR4) du GIEC, publié en 2007.

Les scénarios du SRES ont été conçus pour améliorer certains aspects des scénarios IS92, qui avaient été utilisés dans le deuxième rapport d'évaluation du GIEC de 1995 (IPCC, 2007). Les scénarios du SRES sont des scénarios "de base" (ou "de référence"), ce qui signifie qu'elles ne tiennent compte d'aucune mesure actuelle ou future visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Les projections des émissions des scénarios du SRES sont à peu près comparables aux scénarios de référence sur les émissions qui ont été élaborés par la communauté scientifique. cependant, ces scénarios ne couvrent pas toute la gamme des avenir possibles : peuvent changer moins que ne le laissent supposer les scénarios, ou ils pourraient changer davantage (Karl et al., 2009).

Ces scénarios socio-économiques sont classés en quatre familles (A1, A2, B1 et B2) (tableau 1.7) et traduits en émissions de gaz à effet de serre pour le XXI<sup>e</sup> siècle.

Les climatologues ont utilisé ces évolutions des émissions et des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols comme données d'entrée pour les modèles simulant le climat futur. Les scénarios climatiques issus de ces simulations sont également utilisés dans des modèles d'impact pour simuler les effets du climat sur les écosystèmes ou l'hydrologie. Ces résultats étaient enfin utilisés dans des études socio-économiques sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques (IPCC, 2007).

**Tableau 1.7.** Quatre familles de scénarios du SRES du quatrième rapport et l'augmentation prévue de la température globales moyennes en 2100 (IPCC, 2001).

AR4	Objectifs plus économiques	Objectifs plus environnementaux
Globalisation (monde homogène)	<b>A1</b> croissance économique rapide (trois groupes : A1T; A1B; A1FI) <b>1.4 - 6.4 °C</b>	<b>B1</b> durabilité environnementale globale <b>1.1 - 2.9 °C</b>
Régionalisation (monde hétérogène)	<b>A2</b> développement économique avec orientation régionale <b>2.0 - 5.4 °C</b>	<b>B2</b> durabilité environnementale locale <b>1.4 - 3.8 °C</b>

### Famille A1

Elle suppose une croissance économique très rapide et uniformément répartie dans le monde entier. La population mondiale a atteint un maximum de 9 milliards de personnes au milieu du siècle pour diminuer ensuite. De nouvelles technologies énergétiques sont introduites rapidement. Les variantes proviennent de l'utilisation plus ou moins intense de combustibles fossiles. Par exemple, la variante A1B suppose l'utilisation de différentes sources d'énergie sans en privilégier une en particulier (scénario médian). A l'inverse, le scénario A1FI suppose que les sources d'énergie fossiles sont principalement utilisées.

### Famille A2

Le monde devrait devenir plus hétérogène selon la famille A2 : la croissance économique et le développement de technologies à haut rendement énergétique varieront considérablement d'une région à l'autre, avec une population de 15 milliards d'habitants d'ici à la fin du siècle, et la croissance se poursuivra.

### Famille B1

Elle décrit la même hypothèse démographique que la famille A1 mais avec une économie rapidement dominée par les services, les technologies de l'information et de la communication et bien équipée en technologie énergétique. Mais sans initiatives par rapport à la situation actuelle pour gérer le climat. Ce sont les plus optimistes.

### Famille B2

Elle décrit un monde à mi-chemin entre les scénarios A1 et A2 en termes économiques et technologiques, avec une population de 10 milliards d'habitants en 2100, qui continue de se développer. ((Elouissi, 2016 ; Elmeddahi, 2016 ; IPCC, 2001)

### 1.3.5.2 Les nouveaux scénarios (scénarios RCP)

Comme il est impossible de prévoir exactement les émissions futures et les autres facteurs qui influent sur le climat, l'élaboration d'une série de scénarios futurs comportant un large éventail d'hypothèses diverses sur les conditions économiques, sociales, technologiques et environnementales futures nous permettent d'évaluer un large éventail d'éventualités à l'échelle mondiale et régionale. Un ensemble de quatre nouveaux scénarios d'avenir, appelés "Representative Concentration Pathways" (RCP), a été développé comme base pour les expériences de modélisation à court et long terme du CMIP5 (Elouissi, 2016)

Les quatre PCP Représentent la gamme des valeurs de forçage radiatif des gaz à effet de serre pour l'année 2100 de 2,6 à 8,5  $W m^{-2}$  : le scénario de niveau de forçage le plus bas RCP2.6, deux scénarios médians de gamme ou de stabilisation RCP4.5 et RCP6.0, et le scénario haut de gamme RCP8.5. Le forçage net est déterminé à la fois par le forçage positif dû aux gaz à effet de serre et par le forçage négatif dû aux aérosols, bien que le facteur dominant dans tous les scénarios soit le forçage dû au  $CO_2$ . Les forçages radiatifs des scénarios d'utilisation des terres sont relativement faibles par rapport aux forçages radiatifs des gaz à effet de serre, bien que la déforestation soit un élément important des émissions de  $CO_2$ . Il est à noter que les valeurs réelles du forçage radiatif à 2100 pour différents scénarios de RCP dépendront du modèle climatique et des rétroactions incluses qui affectent la composition de l'atmosphère (par exemple, liées aux rétroactions du  $CH_4$  ou du carbone). (Nazarenko et al, 2015)

## *Chapitre II*

### *Description de la zone d'étude*



## 2.1. Présentation géographique

### 2.1.1. Situation géographique

Le bassin versant de la Tafna couvre une grande partie de l'Ouest de l'Algérie. Oued Tafna est l'oued dominant avec une aire de drainage de 7245 km<sup>2</sup>. Après un parcours de 170 km, le fleuve atteint la mer Méditerranée près de la ville de Béni-Saf. Il est situé entre 34°11' N, 35°19' N latitude et 0°50' W, 2°20' W longitude (Figure 2.1). Le bassin versant de la Tafna est divisé en deux zones de nature géologique différente : le secteur amont où la rivière coule dans un canyon à travers des roches jurassiques riches en calcaire et dolomie, et le secteur aval où elle coule dans un bassin tertiaire caractérisé par des marnes couvertes d'alluvions récentes (Guardia, 1975).

Le bassin est délimité par le relief principal (monts Tlemcen) entre la Méditerranée et les hautes plaines d'Oran et relayé à l'Ouest par le Moyen Atlas du Maroc et à l'Est par les montagnes de Daia (Saïda). Le bassin est constitué essentiellement au sud d'une barre montagneuse, tandis que les plaines de Maghnia, Hannaya et Sidi Abdelli sont largement dominantes au Nord. Cette structure orographique, dominée au Nord par les monts de Traras (1081 m d'altitude) de faible largeur, constitue une barrière efficace de précipitations, ce qui explique l'aridité de la plaine de Maghnia (Belarbi, 2010).

### 2.1.2. Zones montagneuses

Les zones montagneuses sont dans une certaine mesure entourées par le bassin de Tafna sur les côtés Nord-Ouest, Sud et Nord, laissant une zone de plaine et de dépression au centre. Ces zones sont:

- Les monts des Traras : Cette chaîne de montagnes côtières de 1 250 km<sup>2</sup> occupe le Nord-Ouest de la wilaya de Tlemcen. C'est une zone avec des pentes fortes, donc l'érosion est sévère. Le couvert forestier est principalement situé dans la partie centrale autour de la plus haute montagne (Djebel Fellaoucène).
- Les monts de Sebaa Chioukh : Il s'agit d'une chaîne de montagnes de 250 km<sup>2</sup> située au Nord-Est de la wilaya de Tlemcen. Elle forme une extension du côté est des monts des Traras. Ces terrains ont des pentes supérieures à 25%.

Les monts de Tlemcen : Les monts Tlemcen sont situés au sud de la wilaya de Tlemcen et forment la frontière sud du bassin versant. Ils couvrent une superficie de 3000 km<sup>2</sup> et s'étendent à l'Ouest jusqu'au Royaume du Maroc et à l'Est jusqu'à la wilaya de Sidi Bel Abbès. Ils ont un relief très fort avec des pentes raides et une altitude moyenne de 1200 m à 1500 m, avec le point culminant du Djebel Chenoufi à 1843 m.

### 2.1.3. Zones des plaines et des plateaux

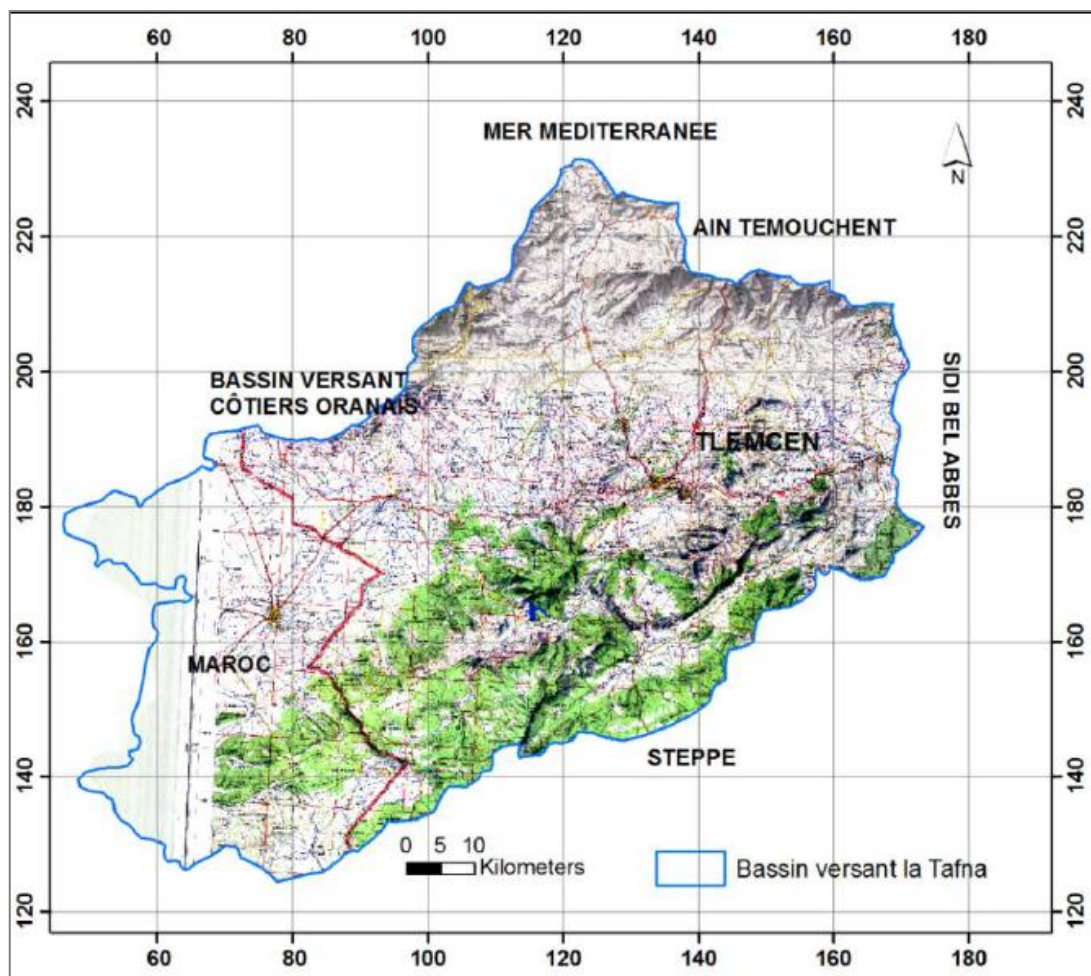
Les plaines et les plateaux occupent la partie centrale du bassin qui est entourée des terrains montagneux. La population est principalement concentrée dans cette région. On distingue :

- La plaine de Maghnia : Délimitée au Nord et au Nord-est par les pentes sud de Traras, au Sud par les piémonts Nord des monts Tlemcen, et à l'Ouest par une extension naturelle de la plaine d'Angad (Maroc).

- La plaine de Hennaya: Au sud, elle est délimitée par les pentes Nord des monts Tlemcen et au Nord par le plateau de Zenata. Les sols sont composés de dépôts alluviaux. En raison de la situation géographique et de la structure granuleuse du sol, la plaine bénéficie de la proximité des cours d'eau (cours d'eau et nappe phréatique) pour le développement de l'agriculture irriguée traditionnelle.

- Plateau de Zenata Ould Riah: Le plateau de Zenata Ould Riah est situé au Nord-Ouest de la plaine du Hennaya, il est formé de sol rouge méditerranéen à base de croûtes.

- Plateau de Sidi Abdelli-Ain Nahala: Le plateau est constitué d'un sol calcaire brun avec une teneur en argile d'environ 45%. En raison des changements de la teneur en humidité de ce sol, la structure se dilate en été, ce qui entraîne l'apparition de grandes fissures. La teneur en calcaire de ces formations est très profonde (Adjim, 2003 ; Belarbi, 2010 ; Belarbi, 2018).



**Figure 2.1.** Cadre géographique de la Tafna et de la wilaya de Tlemcen (Benmossat, 2012).

## 2.2. Hydrographie du Bassin

Le réseau hydrographique de la rivière Tafna se compose principalement de deux artères : Wadi Isser à l'Est et Wadi Tafna à l'Ouest qui prend sa source dans les montagnes de Tlemcen. Les cours de cet oued peuvent se subdiviser en trois parties : la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna.

- La haute Tafna : l'oued prend naissance dans l'Ouled Ouriach et s'affirme après la jonction de nombreuses ramifications creusées dans le terrain jurassique et descendant des crêtes atteignant 1500 m. Ces ramifications se rencontrent dans les environs de Seb dou à une altitude d'environ 900 m. De là et jusqu'à Sidi Medjahed, l'oued suit un cours dans une vallée creusée dans les terres jurassiques. Dans cette zone montagneuse, on trouve Oued Tafna qui reçoit Oued Khemis (rive droite) et Oued Seb dou (rive gauche) (Bouanani, 2004 ; Iratni, 2014).

- Le Tafna moyen : De Sidi Medjahed, l'oued entre dans le bassin tertiaire et coule dans une vallée de faible profondeur sur des sols plus ou moins argileux, cette partie du bassin tertiaire est traversée par de nombreux affluents, dont certains sont importants :

- Sur la rive gauche : Les affluents sont moins importants que sur la rive droite, seul Oued Mouilah, originaire du Maroc, est marquant par son cours et son débit. Oued Boukiou, moins important, venu des montagnes des Traras pour rejoindre le cours de la Tafna dans la plaine du Ghossel.

- Sur la rive droite : La Tafna reçoit Oued Boumessaoud, Oued Zitoun et Oued Isser, qui est le plus important affluent en raison de son cours long et de son débit élevé. Oued Isser prend sa source dans les terres jurassiques des monts Tlemcen et s'étend donc vers l'Est dans la région de la Haute Tafna. A son entrée dans le bassin tertiaire, il est agrandi au Nord d'Ouled Mimoun par Oued Lakhdar (Ex : Chouly) (rive gauche) et Oued Aïn Tellout (rive droite). Au Nord de la plaine d'Ouled Mimoun, il traverse la petite plaine d'El Fehoul. A l'extrémité Ouest de cette plaine, il reçoit à gauche un cours d'eau assez important : Oued Sikkak, qui descend du plateau de Terny.

- La Basse Tafna : Le cours inférieur de la rivière Tafna s'étend de la gorge de Tahouaret au village de Pierre Chat jusqu'à la plage de Rachgoune en mer Méditerranée, sur une distance de 20 km (Figure 2.2) (Bouanani, 2004 ; Iratni, 2014).

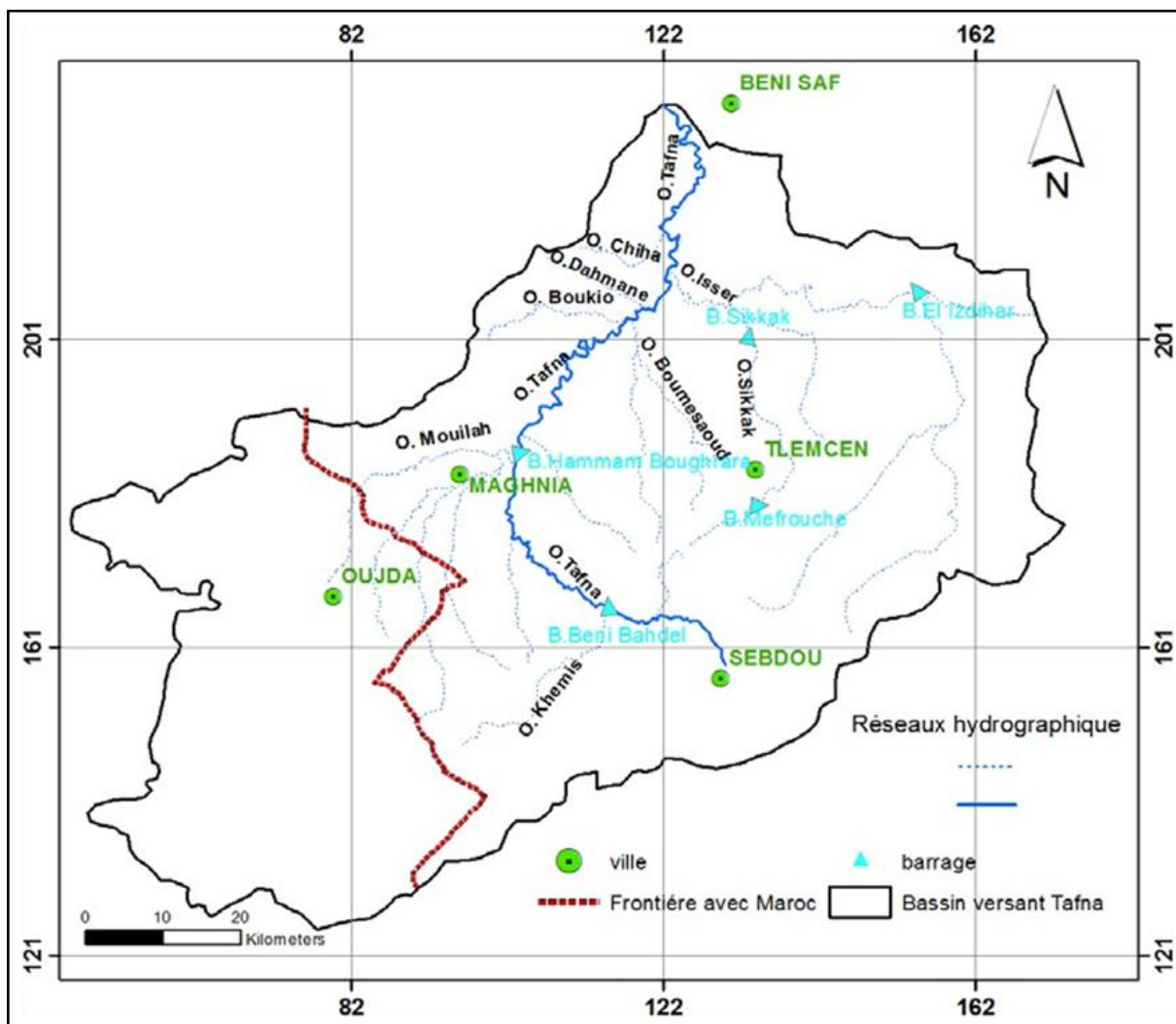


Figure 2.2. Réseau hydrographique du bassin versant de la Tafna (Bemmoussat, 2012).

### 2.3. Morphologie

#### 2.3.1. Forme du bassin versant

La géométrie d'un bassin versant est définie par le coefficient de compacité  $K_c$  de Gravelius, qui est le rapport entre le périmètre du bassin versant et la circonférence du cercle de même surface dans ce bassin. Celle-ci est définie par l'équation suivante :

$$K_c = 0.28 \times P / S^{1/2} \quad \text{II.1}$$

Avec :

**P** : Périmètre du bassin en km ( $P = 354,8 \text{ Km}$ ).

**S** : Surface du bassin en  $\text{km}^2$  ( $S = 7245 \text{ km}^2$ ).

Le bassin versant de la Tafna a un  $k_c = 1,16$  ; bassin versant allongé.

### 2.3.2. Rectangle équivalent

Le concept de rectangle équivalent permet de comparer les caractéristiques morphologiques des deux bassins versants en termes d'écoulement de surface. Il s'agit d'une transformation géométrique, où le bassin versant devient un rectangle de longueur  $L$ , les courbes de niveau sont des droites parallèles au largeur  $l$  du rectangle qui représente l'exutoire du bassin:

$$P = 2(L + l) = K_c \cdot S^{1/2} / 0.28 \quad \text{II.2}$$

$$\text{Avec} \quad S = l \cdot L \quad \text{II.3}$$

Pour le bassin versant de la Tafna, on trouve :  $l = 63,7 \text{ Km}$  ;  $L = 113,7 \text{ Km}$  (Benmossat, 2012).

### 2.4. Fonctionnement hydrologique du bassin

Les conditions climatiques du bassin ont un rôle crucial dans le comportement hydrologique des rivières. Les facteurs qui influencent le climat sont :

La précipitation avec sa répartition dans le temps et l'espace, l'humidité, la température, le vent, etc. qui a un effet sur l'évaporation et la transpiration. Le climat de l'Atlas Tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid avec une amplitude thermique plus ou moins faible avec des chutes de neige et une plaine plus sèche et relativement chaude avec de grandes différences de température.

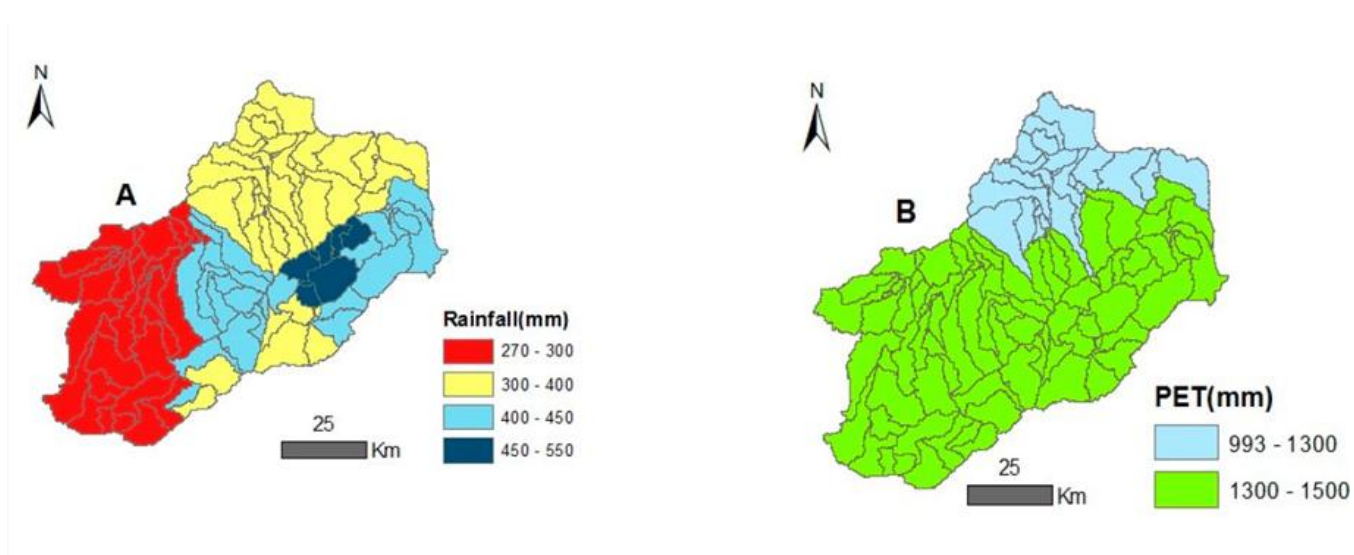
Le climat du bassin de Tafna est similaire à celui de toute la région méditerranéenne d'Afrique du Nord (Meddi et al., 2013). Le régime pluviométrique général est similaire à celui des régions méditerranéennes semi-arides du Nord de l'Algérie (Meddi et al., 2010), avec deux saisons principales : un long été-automne chaud et sec et un hiver-printemps avec de fréquentes précipitations abondantes. La température annuelle moyenne de l'eau varie de  $11^\circ\text{C}$  en hiver à  $28^\circ\text{C}$  en été (Zettam et al., 2017 ; Taleb et al., 2008). Ce système est marqué par des pluies hivernales avec des pics en décembre, janvier et février, et une période longue de sécheresse de juin à septembre. Les précipitations annuelles varient entre 240 et 688 mm.  $\text{an}^{-1}$ . Ce système est également marqué par une forte variabilité spatiale et temporelle des précipitations totales (Meddi et al., 2010).

Les informations pluviométriques collectées dans le bassin versant de la Tafna sont constituées de plusieurs stations plus ou moins uniformément réparties.

Le climat de Tafna est caractérisé par une série de périodes de sécheresse (1917-1924), (1939-1947), (1955-1962) et (1975-1986). On peut dire que les sécheresses se produisent à long terme, tous les 20 à 30 ans (Bouregba, 2006).

En utilisant le model hydrologique SWAT, Zettam et al. (2017) démontre que la moyenne des précipitations annuelles est de 250-550 mm, la plus forte valeur enregistrée étant de 450-550 mm. Ces valeurs ont été remarquées dans le sous-bassin hydrographique montagneux (Figure 2.4. A).

L'évapotranspiration potentielle varie de 993 à 1300 mm en aval du bassin versant, tandis qu'elle est de 1300 à 1500 mm pour l'ensemble du bassin (Zettam et al., 2017) (Figure 2.4. B).



**Figure 2.3.** Moyennes interannuelles pour chaque sous-bassin versant entre 2000 et 2013 (Zettam et al., 2017),

A : précipitations (mm/an).

B : évapotranspiration potentielle (mm/an).

### 2.5. Etude du relief

Les sous-bassins de Tafna ont, dans l'ensemble, une forme assez étroite, favorisant a priori, le temps de concentration des eaux de ruissellement. Mais l'influence du relief est encore plus déterminante (Tableau 2.1).

**Tableau 2.1.** Caractéristiques de forme des unités hydrologiques de la Tafna (Bouanani, 2004).

Bassins	Superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)	Kc	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
<b>Oued Khemis</b>	350	93	1.39	37.23	9.4
<b>Oued Seb dou</b>	255.5	78	1.37	30.70	8.32
<b>Oued Mouilah</b>	2650	230	1.25	82.96	31.94
<b>Oued Zitoun</b>	140	65	1.54	24	5.83
<b>Oued Boumessaoud</b>	118	59	1.52	24.53	4.81
<b>Oued En Nchef</b>	86	46.7	1.41	9.04	9.51
<b>Oued Sikkak</b>	463	116	1.50	48.49	9.55
<b>Oued Chouly</b>	288.9	115	1.28	21.7	13.31
<b>Oued Isser (Bensekrane)</b>	1139.47	180	1.49	85.26	13.37

- **Oued Khemis**

Le bassin d'Oued Khemis, d'une superficie de 350 km<sup>2</sup>, fait partie des monts Tlemcen, c'est un affluent de la haute Tafna. Il se caractérise par des pentes assez abruptes qui dépassent généralement 25% sur les bords de la rivière. A l'Est et à l'Ouest du bassin. Les pentes sont raides à moyennes (de 3% à 25%). Il s'élève à une altitude de 1700 m, autour du djebel Dehar Azouj et coule à 650 m d'altitude au barrage de Beni Bahdel.

- **Oued Seb dou**

Le bassin versant couvre une superficie de 255,5 Km<sup>2</sup> avec une altitude maximale de 1465m. Les pentes au niveau du bassin sont majoritairement très fortes, 49% de la superficie est à pente supérieure à 25%. La longueur du thalweg principal est de 78 km. Le bassin est caractérisé par deux ensembles distincts :

- Au Nord et au Nord-Ouest par un Horst,

- Au Sud et à l'Est par un graben rempli de sédiments plio-quaternaires correspondant au fossé de Seb dou (Benikhlef, 2008).

- **Oued Mouilah**

Faisant partie du bassin versant de la Tafna, le sous-bassin d'Oued Mouilah, régulé depuis 1998 par le barrage de Hammam Boughrara d'une capacité de  $177 \times 106 \text{ m}^3$ , est situé au Nord-Ouest de l'Algérie. Trouvé sur le territoire marocain couvrant les plaines d'Angads et de Maghnia. Il couvre une superficie de 2650 km<sup>2</sup> dans un périmètre de 230 km.



Le bassin versant d'Oued Mouilah est composé de zones très hétérogènes constituées de montagnes (les montagnes Traras au Nord-Ouest et les montagnes Tlemcen au Sud), de plaines et de vallées.

- **Oued Zitoun**

Le bassin d'Oued Zitoun est un sous-bassin de la Tafna (partie septentrionale), il se situe à 20 km au Nord-Ouest de Tlemcen et à 5 km à l'Est de Sabra (Turenne).

Il est limité au :

- Nord, par les Béni Yacoub les Ouled Hamou et le plateau calcaire de Zenâta (200 m).
- Sud, par Djebel Khéane et Djebel Djerdane (reliefs du Jurassique supérieur 100 m).
- Ouest, par Sabra (bassin miocène).
- Est, par Djebel Tamesguida et les Beni Mester (Bouanani, 2004).

- **Oued Boumessaoud**

La région est caractérisée par deux ensembles :

Au Nord, des affleurements miocènes au relief peu accusé et au réseau hydrographique lâche. Au Sud, des affleurements jurassiques très entaillés et marqués de quelques grandes fractures. Le bassin versant d'Oued Boumessaoud est principalement occupé; par les séries jurassiques, dans sa partie sud recouverte au Nord par des niveaux miocènes qui reposent en discordance sur les formations mésozoïques ; et dans la partie Nord en aval ; les niveaux du Miocène sont recouverts par des alluvions d'âge plio-villafranchiens, comprenant des limons briques claires, des poudingues durs à ciment calcaire.

De la base au sommet de la série, on rencontre le secondaire représenté par le Jurassique, le Tertiaire par le Miocène et le Quaternaire par les alluvions.

- **Oued Sikkak**

C'est un affluent de la rive gauche de l'Isser (lui-même affluent de la rive droite de la Tafna) avec lequel il coule au Nord d'Aïn Youcef, originaire du plateau de Terny au sud de Tlemcen, à la source de l'Aïn Rhannous.

Le bassin versant d'Oued Sikkak est situé au Nord-Ouest de l'Algérie. Il couvre une superficie de 218 km<sup>2</sup> pour un périmètre de 65 km coule sur une longueur de 20 km. Les limites amont et aval du bassin sont matérialisés respectivement par les barrages de Mefrouche à 1 100 m et de Sikkak à 200 m d'altitude. L'altitude moyenne du bassin est de 475 m.

- **Oued Lakhder (Ex : Chouly)**

Avec une direction SW/NE, c'est un cours d'eau à l'état d'équilibre qui doit sa durabilité à l'action de nombreuses sources qui l'alimentent telles que : Aïn Tot Hamam et Aïn Ouissert. Le

cours d'eau principal s'écoule plus en bas dans Oued Isser, formant ainsi son affluent principal. Il est originaire des Monts Tlemcen à environ 900 m de ces montagnes, sa vallée est surplombée d'une série de montagnes massives.

- **Oued Isser**

Le bassin versant d'Oued Isser couvre une superficie de 1140 km<sup>2</sup> avec une altitude maximale de 1625 m. La longueur du thalweg principal est de 81 km. Sa limite aval coïncide avec le barrage El Izdihar de Sidi Abdelli. Oued Isser, prend sa source au niveau d'Aïn Isser au Sud d'Ouled Mimoun. Sa confluence avec Oued Tafna se situe dans la plaine du Remchi, à 80 m d'altitude. Dans la partie Nord-Ouest du bassin, les pentes augmentent (15 à 30 %).

Le bassin versant d'Oued Isser est marqué par deux zones différentes:

- Au Sud, une zone montagneuse à forte pente composée de calcaire jurassique,
- Au Nord, une zone de collines en pente douce composée principalement de marnes du

Miocène (Bouanani, 2004 ; Benikhlef, 2008 ; Belarbi, 2010).

## **2.6. Sols et végétation**

Les sols du bassin de Tafna se constituent de quatre grands groupes :

- Les terres d'alluvions qui recouvrent les basses terrasses et les lits majeurs des oueds ;
- Les terres caillouteuses aux piémonts des monts de Tlemcen et des Traras ;
- Les terres rouges à encroûtement, localisées dans les plaines de Maghnia et Ouled Riah ;
- Les terres marneuses, s'étend sur une grande partie de la région de Tlemcen (Boukhateb, 2013).

La végétation est un facteur important pour déterminer la rapidité du ruissellement superficiel, c'est-à-dire l'évaporation et la capacité de rétention du bassin. Ainsi, la présence de la végétation est régénérée. Le rôle du "régulateur" dans le régime des écoulements.

Le couvert végétal a non seulement un impact direct sur l'écoulement fluvial, mais aussi sur les facteurs topographiques et climatiques.

Plus la couverture végétale est dense, plus la résistance à l'écoulement est importante. Ainsi, l'impact des forêts le régime des eaux dans la région méditerranéenne a un rôle considérable à jouer ; le paysage végétal du bassin de Tafna a été dégradé et défriché en montagne principalement par les incendies et la petite agriculture. Un surpâturage généralisé et endémique a eu lieu. Cela a entraîné une perte d'eau par évaporation et une érosion accélérée. Dans les bassins de Sebdou, Mouillah, Isser et Sikkak, à l'exception du périmètre organisé de Maghnia, les zones irriguées sont essentiellement situées dans la plaine d'Hennaya et dans les vallées des oueds comme le Wadi Isser et oued Saf Saf affluent du Sikkak. Les cultures pratiquées sont dominées

par des cultures maraîchères et quelques vergers d'agrumes et d'arbres fruitiers. Les forêts, les maquis et les broussailles occupent pratiquement toute la bande des monts de Tlemcen et une partie des monts des Traras (Belarbi, 2018).

Pour la répartition de la couverture végétale par bassin versant, différents types de couverture végétale ont été collectés et classés. Les types de culture tels que :

- Cultures extensives : Il s'agit de toutes les cultures annuelles, y compris les céréalicultures, les cultures maraîchères et une combinaison d'arboriculture et de maraîchage.

- Couvert forestier dégradé : Ce thème regroupe les zones de maquis, de forêt ouverte et de reforestation. La dégradation des forêts et des maquis due à l'utilisation excessive du sous-sol forestier, ainsi que le pâturage sauvage et irrationnel, ont mis en péril la rénovation. Déforestation complète pour implanter d'autres cultures et l'impact des incendies. Dans les monts de Tlemcen, on observe un matorral élevé à moyen de la série du Toya, avec des enclaves à pin d'Alep, chêne verts et chêne liège. Ceux-ci forment une petite comme celle de Zarif et qui a été incendiée en 1984.

- Couvert forestier normal : Elle est principalement représentée par des forêts denses et des maquis qui n'ont pas été dégradés par les activités humaines (pâturage sauvage et déforestation) ou par les incendies.

- Arboriculture : Il est essentiellement représenté par des vignobles et des oliveraies, avec de petites quantités d'agrumes, des vergers et des murai.

- Couvert mort : On appelle ainsi toute terre sans végétation ou cultures utilisables rendus nu par l'érosion ou par d'autres formes de dégradation.

- Prairies et terrains de pacage : Représentée par des surfaces utilisées principalement pour le pâturage direct des animaux, les terres occupées par l'alfa et la lavande (Bouanani, 2004).

*Chapitre III*  
*Climatologie*

### 3.1 Introduction

Les relevés climatiques permettent d'analyser l'évolution des précipitations. Mais les enregistrements historiques des différentes stations météorologiques, les données manquantes, le changement d'équipements, déplacements et fermetures de postes occasionnent de nombreuses ruptures de continuité dans les séries, ce qui ne facilite pas le travail du climatologue. Ce qui conduit à une certaine hétérogénéité des ensembles de données. La fragmentation spatiale et temporelle ne permet pas de souligner objectivement la tendance sur un siècle. Lorsque les ensembles de données comportent trop de lacunes, l'homogénéisation de longues séries de données climatologiques devient difficile et les résultats sont très risqués.

### 3.2 Collecte et traitement des données

Plusieurs auteurs ont étudié les précipitations en Algérie. La plupart des stations du bassin ont été arrêtées durant la guerre d'Algérie, tandis que le reste a connu des changements après 1962. Cette situation donne des résultats erronés et un nombre important de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle. Par contre, de nombreuses stations ont été installées à la restructuration du réseau pluviométrique algérien, et leurs données sont très efficaces pour l'établissement d'une série pluviométrique récente.

#### 3.2.1 Collecte des données

Les données pluviométriques (valeurs mensuelles des précipitations) proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) Ces valeurs représentent des totaux pluviométriques mensuels.

Dix-sept stations ont été incluses dans cette étude, (Tableau 3.1.). Les années comportant des mois lacunaires ont été remplies si le déficit n'était pas trop important, c'est-à-dire si le nombre de mois manquants ne dépassait pas 3, et si elles n'étaient généralement pas les plus humides.

Tableau 3.1. Liste des stations météorologiques retenues.

N°	Nom de Station	Code	Longitude	Latitude
1	El Abed	160104	-1.68755	34.4766
2	Maghnia	160302	-1.77651	34.7837
3	Beni Ouassine	160303	-1.77739	34.8388
4	Sebdou	160405	-1.32599	34.6547
5	Beni Bahdel	160403	-1.50543	34.7035
6	Sidi Medjahed	160407	-1.64261	34.7752
7	H. Bouhrara	160501	-1.63896	34.89
8	Sabra	160502	-1.51099	34.8305
9	Hennaya	160516	-1.38863	34.9205
10	Chouly	160601	-1.13477	34.8646
11	S. Bounakhla	160610	-1.04595	35.042
12	Sidi Abdelli	160613	-1.14235	35.0849
13	Meffrouche	160701	-1.28585	34.8473
14	Lala Setti	160705	-1.30701	34.8656
15	Piere du Chat	160802	-1.44729	35.1441
16	Dj. Chouachi	160518	-1.48082	35.05
17	Ouled Mimoun	160607	-1.04052	34.9023

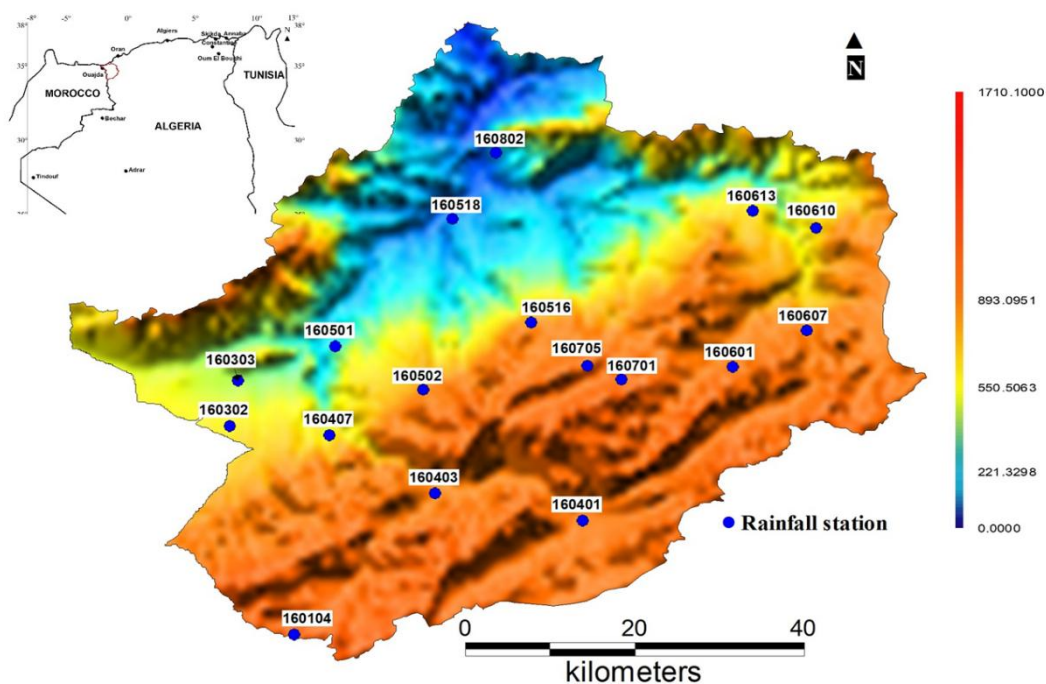


Figure 3.1. Carte des stations retenues.

La répartition spatiale des stations sélectionnées est bonne. Le réseau qu'elles forment couvre tous les sites, ce qui nous permet de distinguer les stations côtières, les stations de montagne, les stations de colline et les stations de plaines.

## 3.2.2 Homogénéisation des données et identification des ruptures dans les séries pluviométriques

### 3.2.2.1 Homogénéisation des données

L'homogénéisation des données et l'identification des ruptures dans les séries de précipitations sont essentielles pour les analyses climatologiques. Ces tests sont effectués à l'aide de la macro Hydrolab insérée dans Excel. Ils précèdent l'identification des lois de distribution statistique.

L'analyse des données climatiques pour détecter les changements et les tendances est plus fiable lorsque des ensembles de données homogénéisés sont utilisés. Un ensemble de données climatiques homogènes est un ensemble dans lequel toutes les fluctuations contenues dans sa série chronologique reflètent la variabilité et le changement réels de l'élément climatique représenté. La plupart des méthodes statistiques supposent que les données examinées sont aussi exemptes que possible d'erreurs d'instrumentation, de codage, de traitement et autres erreurs non météorologiques ou non climatologiques. Toutefois, les données météorologiques ou climatologiques ne sont généralement pas homogènes et ne sont pas exemptes d'erreurs (WMO, 2011).

### 3.2.2.2 Lois statistiques

Plusieurs lois statistiques permettent de vérifier la normalité des séries pluviométriques et de calculer leur répartition temporelle.

### 3.2.2.3 Loi racine-normale

La loi normale est l'une des lois de probabilité les plus appropriées pour modéliser les phénomènes naturels résultant de plusieurs événements aléatoires.

De façon plus systématique, c'est une loi de probabilité absolument continue qui dépend de deux paramètres: son espérance, un nombre réel noté  $\mu$ , et son écart-type, un nombre réel positif noté  $\sigma$ . La densité de probabilité de la loi normale est donnée par : (Laborde, 1998)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{III.1}$$

Après plusieurs essais avec diverses lois statistiques, le constat est que les séries pluviométriques mensuelles s'ajustent mieux à la loi racine-normale. L'adéquation est vérifiée par ajustement graphique des valeurs observées (en utilisant les macro-commandes d'hydrolab (2010)) (Figure 3.2). Balah et al., (2016) ; Louamri (2009) ; Louamri (2013) ; Romain (2018) ; Ellouissi (2016) ; Assaba et al., (2013) ; Berolo (2010) ; Lubès et al., (1994) et Claire Lang Delug (2011) ont prouvé que les données mensuelles s'adaptent mieux à la loi racine-normale.

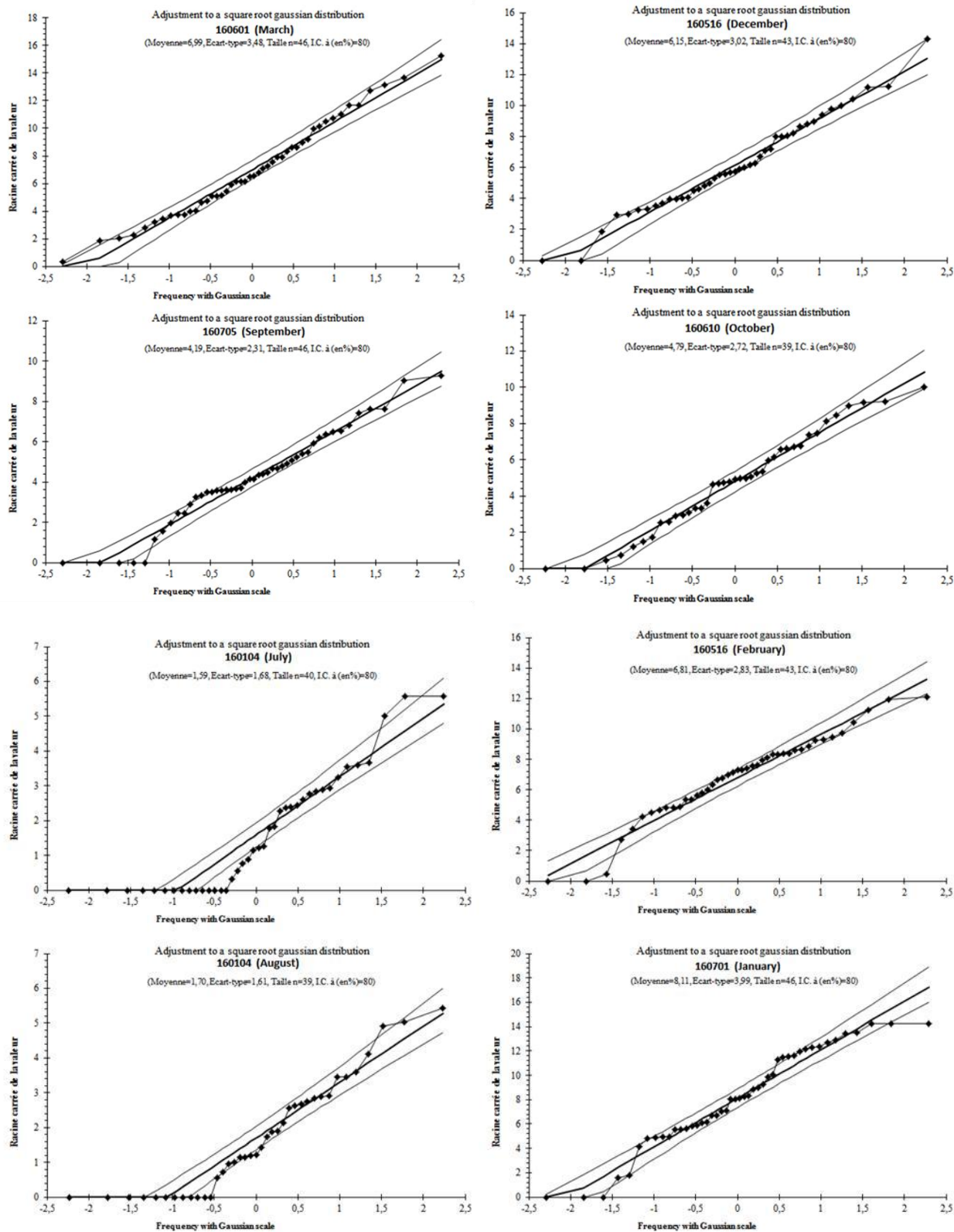


Figure 3.2. Ajustement à la loi Racine Normale de quelques stations.



### 3.2.2.4 Valeurs aberrantes appelées aussi «outlier»

L'évolution rapide des moyens de collecte des données et le traitement informatisé de l'information ont provoqué un énorme problème de valeurs aberrantes au cours des dernières décennies. Par exemple, le développement des systèmes d'information géographique, l'agriculture de précision et l'automatisation de la saisie des données ont conduit à la constitution de grandes bases de données où les valeurs aberrantes peuvent plus facilement passer inaperçues (Planchon, 2005).

Les observations aberrantes ou non représentatives sont considérées depuis toujours comme une source de contamination, ce qui déforme l'information obtenue à partir des données brutes. Il est donc évident de chercher des méthodes pour interpréter ou caractériser ces valeurs anormales. Et développer des méthodes pour les traiter, en éliminant pour rétablir les propriétés initiales des ensembles de données, ou en adoptant des méthodes qui réduisent leur impact sur les analyses statistiques en cours (Barnett et Lewis, 1994).

Ces erreurs peuvent être divisées en deux types : les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques.

- **Erreurs aléatoires**

Ils affectent la fiabilité des données et ne sont pas corrélés. Ce type d'erreur est dû à des raisons nombreuses et variées, généralement inconnues, qui affectent de manière différente chaque mesure individuelle. Ces erreurs sont généralement considérées comme étant les réalisations d'une variable normale aléatoire normale centrée sur 0 et la variance  $S^2$  ces erreurs sont inévitables, leur importance doit donc être estimée afin qu'elles puissent être prises en compte dans l'évaluation de l'incertitude finale. Dans la mesure du possible, la technique de mesure qui induit les erreurs aléatoires les plus faibles doit être privilégiée (Elouissi, 2016).

- **Erreurs systématiques**

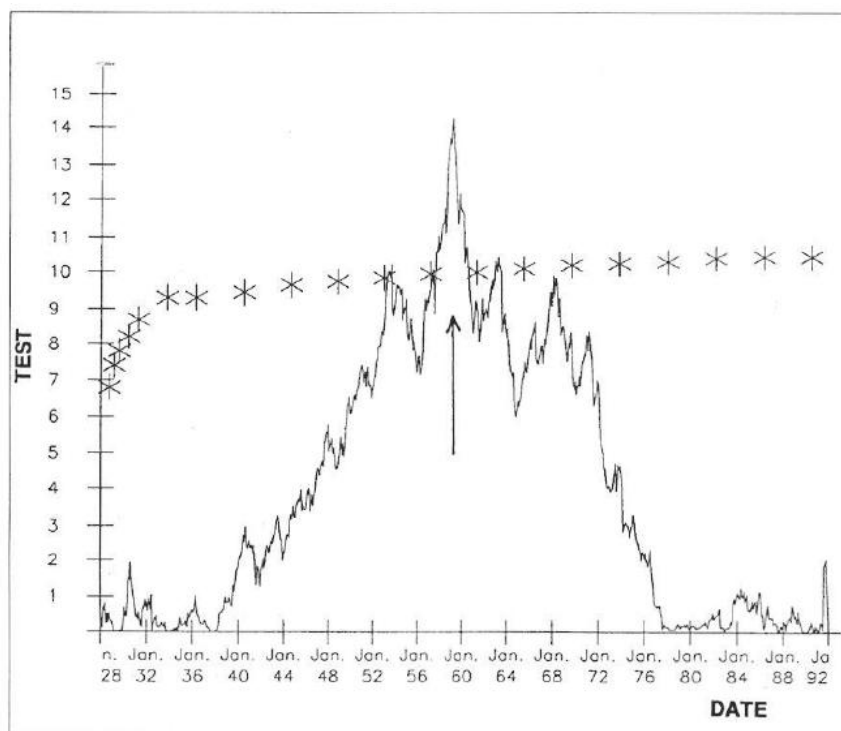
Les erreurs systématiques aussi appelées biais, peuvent être inhérentes au modèle utilisé pour décrire la répartition du phénomène, ou il est possible qu'il s'agisse de quelques valeurs qui sont loin du data center. Les valeurs aberrantes peuvent également indiquer des données fausses, des calculs incorrects ou les limites d'un modèle statistique. Toutefois, dans de grands échantillons, on s'attend à un petit nombre de valeurs aberrantes (ce qui n'est pas dû à des conditions anormales) (Huber, 1981).

De nombreuses méthodes sont utilisées pour détecter les valeurs aberrantes et les supprimer de l'ensemble de données (Maciá-Pérez et al., 2015 ; Maheshwari et Singh, 2016).

- **Méthode de Porter (1981)**

La méthode de Porter (1981) consiste à comparer les séries d'essai et les séries de référence, après les avoir normalisées, dans l'hypothèse d'une modification de la valeur moyenne de l'une d'elles.

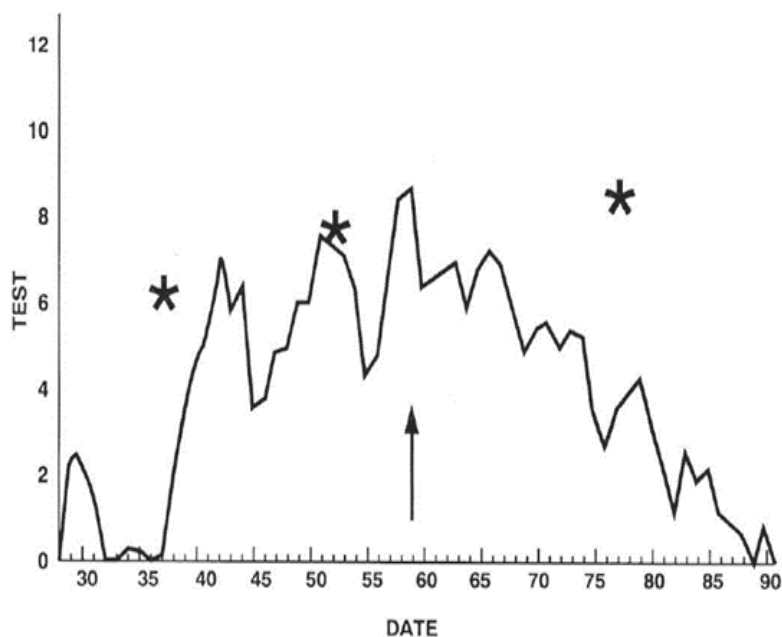
Une valeur de test est calculée pour chaque pas de temps. La date la plus probable de défaillance de l'homogénéité est la valeur maximale de l'essai si elle dépasse la valeur critique pour une confiance donnée. Ce test est en principe conçu pour la recherche d'une rupture unique (Figure 3.3) (Potter, 1981; Lamarque, 1993).



**Figure 3.3.** Exemple de graphe de la méthode de Potter.  
Cumul mensuel des précipitations

- **Méthode d'Alexandersson (1986)**

Au lieu de traiter directement les séries de cumuls, on forme la série de relations entre les valeurs à tester et les valeurs de référence, puis on les normalise. Il s'agit d'une recherche d'un changement dans la moyenne de cette série de rapports. Pour chaque pas de temps, une valeur de test est déterminée et comparée à la valeur critique. En cas de dépassement de cette valeur critique, l'hétérogénéité est considérée comme existante, la date la plus probable de rupture de l'homogénéité correspondant à la valeur maximale de l'essai. Ce test convient donc en principe à la recherche d'une seule rupture. Mais la maxima secondaire peut être une indication valable de rupture (Figure 3.4) (Alexandersson, 1986).



**Figure 3.4.** Exemple de graphe de la méthode d'Alexandersson.  
Cumul annuel des précipitations

- **Méthode des doubles cumuls**

Le principe de la méthode de la double accumulation consiste à tracer progressivement le cumul d'un paramètre de la série d'essai en fonction de celui du même paramètre de la série de références. Lorsque les séries sont homogènes, les points sont sensiblement alignés sur une ligne droite. Les ruptures dans la pente de la ligne donnent les dates probables de rupture d'homogénéité (Calas, 1993 ; Lamarque, 1993).

- **Méthode du cumul des résidus**

Dans la méthode du cumul des résidus, la régression entre la série étudiée et la série de référence est d'abord calculée. La série de résidus peut alors être formée (le résidu est la différence entre la valeur réelle et la valeur estimée de régression). La somme de ces résidus est alors calculée et tracée sur un graphique en fonction du temps. Si la série testée est homogène, la distribution de ces résidus est totalement aléatoire. Par contre, si la série est hétérogène, la courbe a des portions anormalement croissantes ou décroissantes. Si elle sort d'une ellipse de signification définie pour un intervalle de confiance donné, on peut dire que l'hétérogénéité est détectée à la rupture de la courbe (Figure 3.5) (Bois, 1986 ; Lamarque, 1993).

La méthode de cumul des résidus de variables de séries temporelles corrélées permet d'invalider ou de confirmer avec précision l'homogénéité de la variable afin de détecter d'éventuelles erreurs. Cette méthode a deux avantages :

- Un côté graphique donne à l'utilisateur une interprétation visuelle.
- Les seuils de probabilité fournissent de l'information sur les hypothèses suivantes stationnarité ou non-stationnarité.

Elle permet donc de détecter les valeurs aberrantes ainsi que les périodes hétérogènes dues, par exemple en hydrologie à des erreurs de mesure, soit de changements d'équipement, soit de phénomènes naturels (Lamarque, 1993).

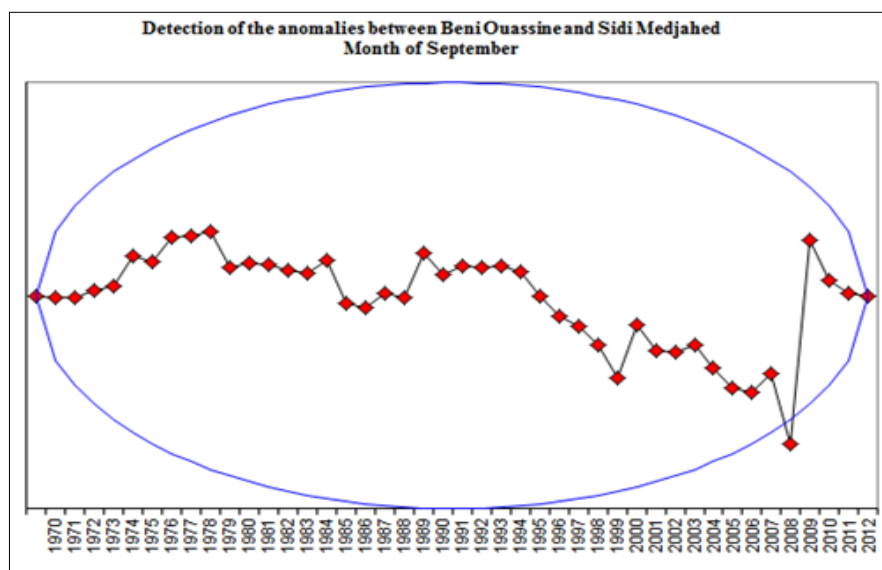


Figure 3.5. Exemple de graphe du cumul des résidus.

Dans ce contexte, il est indispensable de séparer les stations en petits groupes dans la même région et avec presque les mêmes conditions topographiques (Tableau 3.2).

Tableau 3.2. Groupes de stations formées.

Stations
Maghnia, Beni Ouassin, S.mdjahed, H.boughrara,
Pierre du Chat, Dj Chouachi, Sidi Abdelli, S.Bounakhla,
Sabra, Beni Bahdel, Hennaya, Chouly, Ouled Mimoun
Meffrouche, Lala Setti, Sebdou, S.Gourari

Les stations de chaque groupe ont été soumises à la détection des valeurs aberrantes (Figure 3.6).

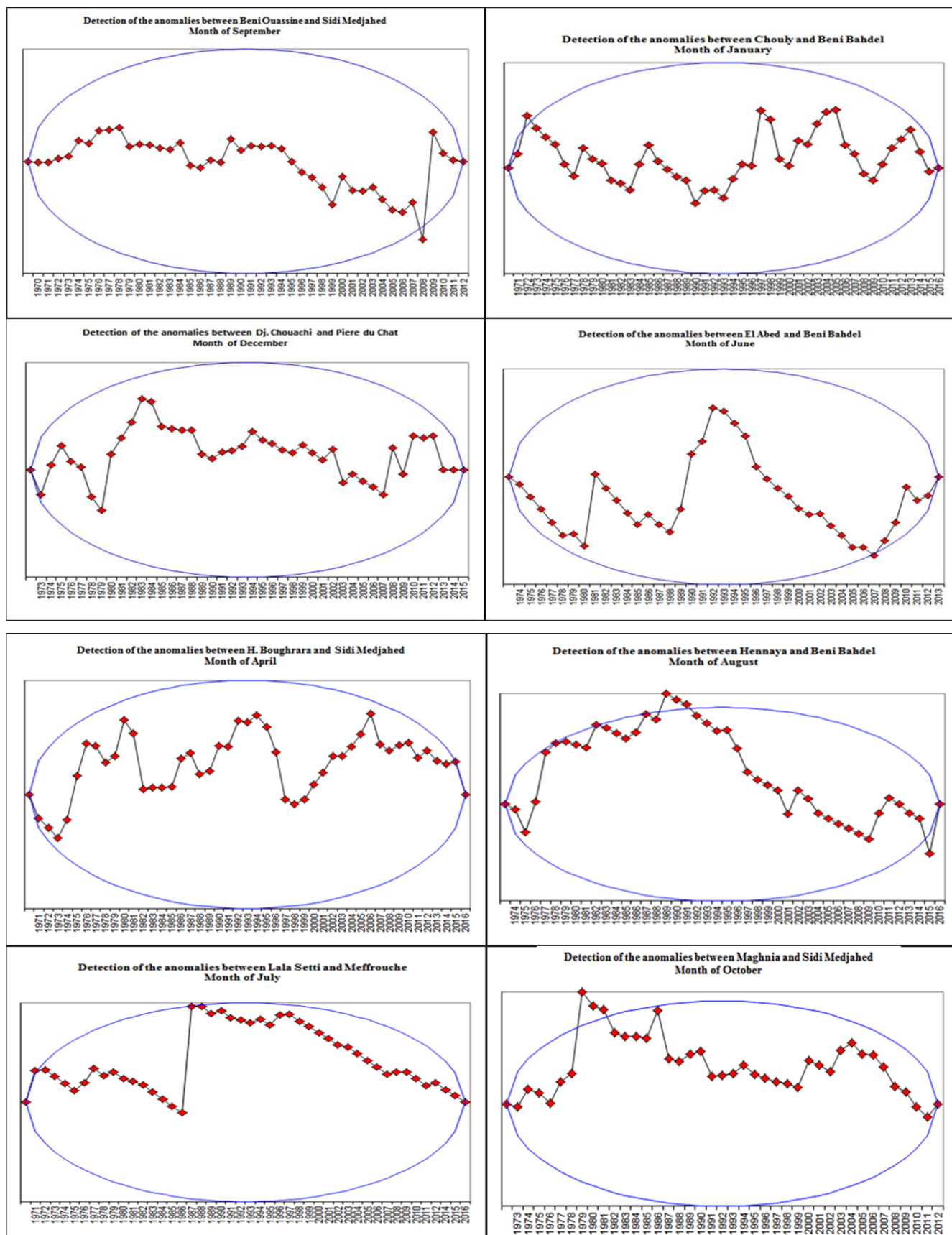


Figure 3.6. Exemple de détection des anomalies.

### 3.2.2.5 Estimation des données manquantes

Les données manquantes constituent une préoccupation majeure, car les informations disponibles sont incomplètes et donc moins fiables. Elles apparaissent lorsqu'aucune valeur de données n'est enregistrée pour la variable dans une observation. Les données manquantes sont courantes et peuvent avoir un impact important sur les conclusions que l'on peut tirer des données.

Les données manquantes ont des causes multiples : Une saisie incorrecte de l'information peut créer des données manquantes, elles peuvent également être causées par la présence de valeurs aberrantes qui doivent être supprimées avant que les analyses puissent être effectuées.

L'absence de certaines informations est un problème majeur pour les analystes, car elles sont incomplètes et donc moins fiables. Il est nécessaire de traiter correctement les données manquantes avant d'effectuer des analyses statistiques (Josse et al., 2009 ; Cicognani et al., 2010).

#### 3.2.2.5.1 Types de données manquantes

Il y a plusieurs types de données manquantes, la classification la plus utilisée ayant été proposée par Little et Rubin (1987) : manquant complètement au hasard (MCAR), manquant au hasard (MAR), ne manquant pas au hasard (informative) (NMAR).

Lorsque la valeur d'une variable d'élément X est manquante, on dit qu'il s'agit d'un Missing Completely At Random (MCAR) si et seulement si la probabilité que la valeur soit manquante est indépendante des valeurs prises par les autres variables explicatives de l'observation, que celles-ci manquent ou non.

Les données manquantes pour une caractéristique X sont dites Missing At Random (MAR) si, et seulement si, la probabilité qu'une valeur X soit manquante est corrélée avec l'existence de variables explicatives dont les valeurs sont remplies. Toutefois, cette probabilité n'est pas corrélée à l'absence de valeurs de variables explicatives.

Les données manquantes sont du type Missing Not At Random (MNAR) lorsque la probabilité de non-réponse est liée aux valeurs prises par la variable avec les données manquantes (Benzaki, 2018).

#### 3.2.2.5.2 Méthode de l'Analyse en Composante Principale (ACP)

L'Analyse en Composante Principale (ACP) est une méthode de réduction dimensionnelle qui nous permet d'explorer et de visualiser un tableau de données individuelles par variables quantitatives. De façon classique, l'ACP est définie comme la recherche du sous-espace qui maximise la variance des points projetés, c'est-à-dire le sous-espace qui représente le mieux la diversité des individus. De même, elle peut être présentée comme la recherche du sous-espace qui minimise l'erreur de reconstruction (Pearson, 1901).

L'ACP est une méthode descriptive multidimensionnelle, appelée méthode factorielle, Ils ne reposent pas sur un modèle probabiliste, mais dépendent d'un modèle géométrique. L'ACP suggère, à travers une table de données rectangulaires qui contient les valeurs des variables quantitatives  $p$  pour  $n$  unités, des représentations de ces unités et variables géométriques. Ces données peuvent être extraites à l'adresse d'une procédure d'échantillonnage ou de l'observation d'une population entière.

Les représentations des unités permettent de voir s'il existe une organisation, non connue a priori, sur cet échantillon d'unités. Les représentations des variables permettent également d'étudier les liaisons linéaires sur l'ensemble des variables.

Ainsi, nous vérifierons si nous pouvons identifier les groupes dans toutes les unités en observant quelles unités qui sont semblables, lesquelles sont différentes les unes des autres, etc. Pour les variables, nous chercherons celles qui sont très corrélées entre elles, celles qui ne le sont pas, au contraire, entre elles, etc. (Duby et Robin, 1996)

Les données manquantes de toute notre série pluviométriques sont estimées à partir de la macro-commande (Bouche-trou) de (Hydrolab, 2010). Cette dernière utilise l'ACP. D'après Laborde (2013), sept à huit itérations sont suffisantes pour stabiliser le processus. Ce moment-là, les données sont maintenant complètes et prêtes pour l'analyse qui suit. Le tableau 3.3, présente un exemple de la méthode d'estimation des données manquantes pour le mois d'octobre de la station de H. boughrara. Les lacunes dans cette station ont été estimées par la station de référence Maghnia.

**Tableau 3.3.** Exemple de reconstitution des données manquantes (Station H. boughrara, mois d'octobre).

<b>Année</b>	<b>Avant reconstitution</b>	<b>Après reconstitution</b>
1970	0	0,0
1970	14,4	14,4
1971	7,5	7,5
1972	29,5	29,5
1973	0	0,0
1974	25,9	25,9
1975	0	0,0
1976	41,7	41,7
1977	24,1	24,1
1978	14,2	14,2
1979	77,2	77,2
1980	10,3	10,3
1981	0	0,0
1982	15,4	15,4
1984	0,7	0,7
1985	0,4	0,4
1986	51,4	51,4
1987	21,8	21,8
1988	7	7,0
1989	1,5	1,5
1990	4,8	4,8
1991	30,9	30,9
1992	8,3	8,3
1993	4,7	4,7
1994	8,9	8,9
1995	24,9	24,9
1996	14,2	14,2
1997	21,6	21,6
1998	0	0,0
1999	18,7	18,7
2000	71,4	71,4
2001	27	27,0
2002	10,3	10,3
2003	31,6	31,6
2004	26,3	26,3
2005	7,9	7,9
2006	21,3	21,3
2007	36,4	36,4
2008	135,7	135,7
2009	1,5	1,5
2010	75,6	75,6
2011	54,3	54,3
2012	45	45,0
2013	0	0,0
2014	Lac	6,7
2015	30,9	30,9



Donc, la valeur du mois d'octobre de l'année 2014 était manquante et a été remplacée par la valeur 6,7.

### 3.3 Etude de la stationnarité

#### 3.3.1 Généralités

##### 3.3.1.1 Définition de la stationnarité et non stationnarité

Une hypothèse courante dans de nombreuses techniques de séries chronologiques est que les données sont stationnaires. Une série de données est stationnaire si elle procède d'un phénomène dont les caractéristiques sont indépendantes du temps.

À l'inverse, une série de données est non stationnaire si les caractéristiques statistiques du phénomène changent au cours de la période de mesure (Ondo, 2002).

La littérature hydrologique se concentre sur deux grandes formes de non-stationnarité : les tendances et les ruptures.

- **Une tendance** : C'est un changement progressif des propriétés d'une variable aléatoire. On peut également noter qu'une série peut présenter des fluctuations importantes dans le temps sans qu'il y ait vraiment de direction privilégiée. Ces variations reflètent la variabilité intrinsèque des séries hydrologiques et climatiques.

- **Une rupture** : Selon Lubès et al. (1994), une "rupture" peut être définie de manière générale comme un changement de la loi de probabilité d'une série temporelle à un moment qui est inconnu. Cette rupture indique un changement de la pluviométrie ou du régime hydrologique.

Il y a plusieurs méthodes de détection des ruptures des séries chronologiques (test de Pettitt, statistique de Buishand, procédure bayésienne de Lee et Heghinian, segmentation d'Hubert) (Soro et al., 2011). Les méthodes de détection de rupture les plus utilisées dans les séries chronologiques sont présentées. Ces méthodes sont principalement utilisées pour identifier et modéliser les changements de paramètres statistiques et stochastiques des séries temporelles. Nous commencerons par présenter la méthode Pettitt. Ensuite, nous présenterons la statistique de Buishand (Pettitt, 1979 ; Chadid, 2003).

##### 3.3.1.2 Présentation des différents tests

###### 3.3.1.2.1 Test de Pettitt

La méthode Pettitt (Pettitt, 1979) est une méthode de test statistique non paramétrique basée sur le rang. L'hypothèse nulle du test est que, lorsque l'on divise arbitrairement l'échantillon en deux segments, il n'y a pas de changement dans la valeur moyenne de chaque segment. Mathématiquement, lorsqu'une séquence de variables aléatoires est divisée en deux segments représentés par  $x_1, x_2, \dots, x_{t_0}$  et  $x_{t_0+1}, x_{t_0+2}, \dots, x_T$ , si chaque segment a une fonction de distribution

commune, ex.,  $F_1(x)$ ,  $F_2(x)$  et  $F_1(x)=F_2(x)$ , le point de changement est alors identifié à  $t_0$ . Pour obtenir l'identification du point de changement, un indice statistique  $U_{t, T}$  est défini comme suit (équation III.2):

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_j - x_i), 1 \leq t < T \quad \text{III.2}$$

Où

$$\text{Sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{Si } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{Si } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{Si } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

Lorsque la série suit une distribution continue, la statistique test  $U_{t,T}$  peut également être obtenue par la relation récursive suivante :

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + V_{t,T} \quad \text{III.3}$$

Pour  $t = 2, \dots, T$ , où

$$V_{t,T} = \sum_{j=1}^T \text{sgn}(x_j - x_t) \quad \text{III.4}$$

Et  $U_{1,T} = V_{1,T}$ .

### 3.3.1.2.2 Test de Buishand

La statistique de Buishand est dérivée d'une formulation générale donnée par Gardner (1969). Elle repose sur l'hypothèse de normalité de la série, la somme partielle ajustée ( $S_k$ ), c'est-à-dire l'écart cumulé par rapport à la moyenne pour la  $k^{\text{ième}}$  observation d'une série  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k, \dots, X_n$  avec la moyenne ( $\bar{x}$ ) peut être calculée à l'aide de l'équation III.6 :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad \text{III.6}$$

Une série peut être homogène sans point de changement si  $S_k \cong 0$ , car dans les séries aléatoires, l'écart par rapport à la moyenne sera distribué des deux côtés de la moyenne de la série. L'importance du décalage peut être évaluée en calculant la plage ajustée des rééchelonnements ( $R$ ) à l'aide de l'équation III.7 (Chadid, 2003) :

$$R = \frac{\text{Max}(S_k) - \text{Min}(S_k)}{\bar{x}} \quad \text{III.7}$$

### 3.3.1.3 Résultats et analyse

Ces tests ont été choisis pour ses utilisations dans de nombreuses études de détection de la stationnarité, pour ses robustesses et ses puissances.

Ces tests ont été appliqués à l'échelle annuelle qui va nous permettre de définir la stationnarité de la pluviométrie annuelle des séries longues. Les constatations d'existence d'une rupture ou non des stations pluviométriques ont été effectuées par le logiciel XLSTAT-PRO pour

un niveau de signification de 5%. La représentation graphique des deux sont présentées sur les Figures 3.7 et 3.8.

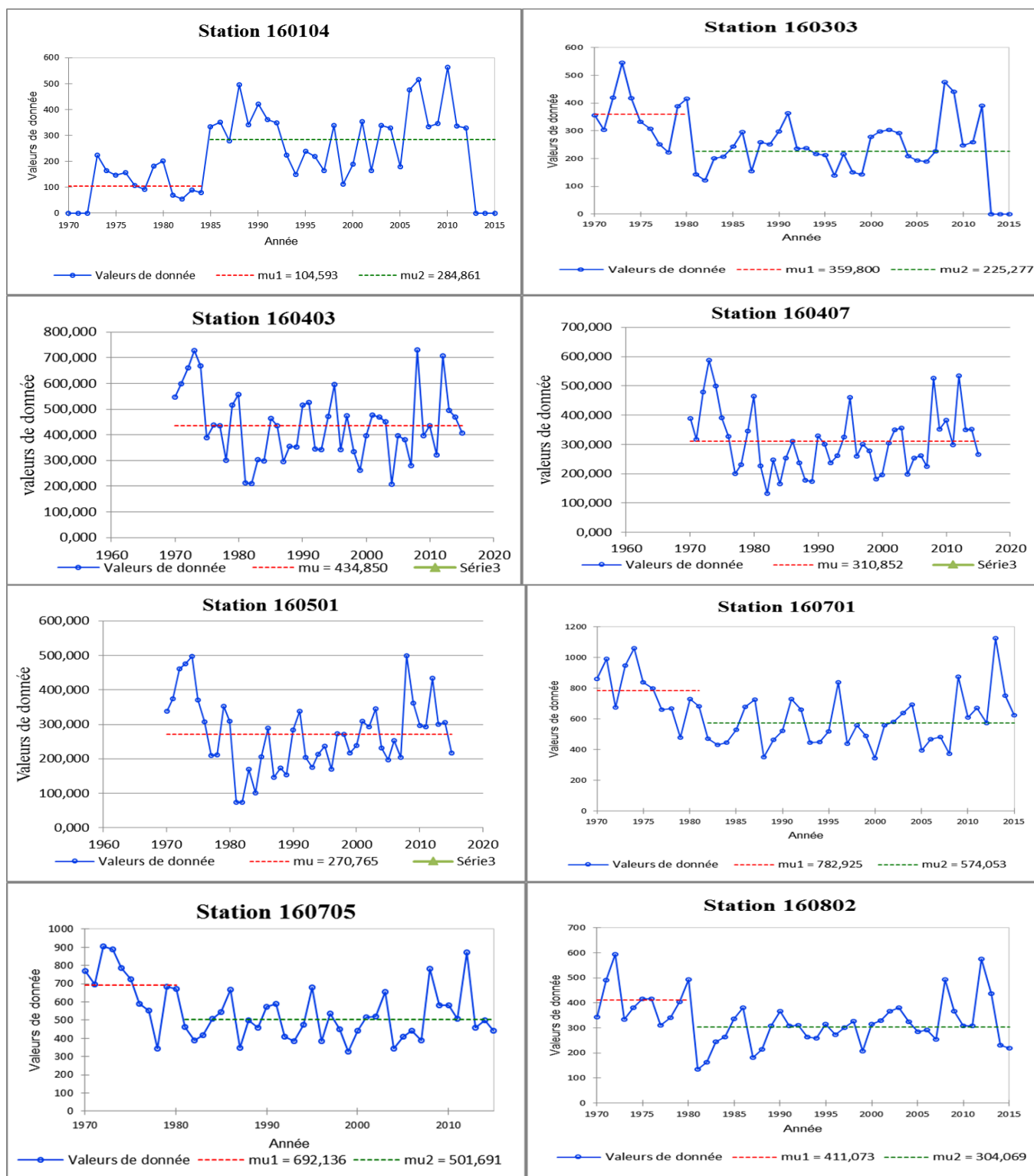
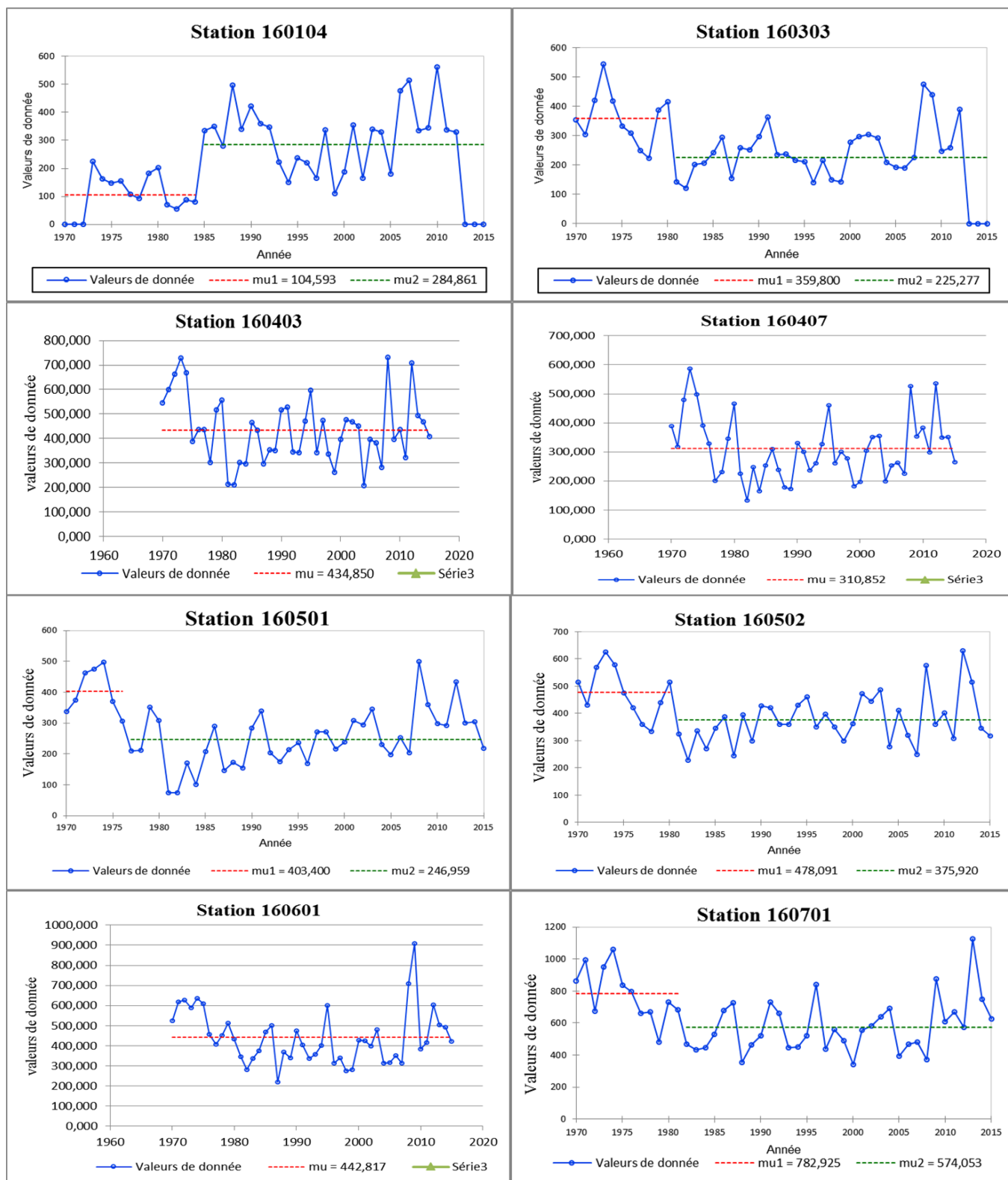


Figure 3.7. Etude d'homogénéité par le test statistique de pettitt



**Figure 3.8.** Étude d'homogénéité par le test statistique de Buishand

Le test de Pettitt marque une rupture dans 47,05% des stations pluviométrique, l'année de rupture entre 1980 et 2000 a été détectée. Pour les stations 160104, 160613 la rupture a marqué en 1984 et 1985 ; les stations 160303, 160601, 160705, 160802 en 1980 et 1981 ; la station 160701

en 1981 et 1982 ; la station 160613 en 1984 et 1985 et la station 160518 en 1999 et 2000. Tandis que les autres stations les données sont homogènes.

Le test de Buishand indique que 52,94% des stations ont une rupture, ce test est parfois plus puissant que certains tests de détection de rupture (Balah, 2016). Les résultats permettent de constater que les séries analysées présentent une rupture comprise entre 1976-1985.

Les stations (160303, 160502, 160705 et 160802) ont marqué une rupture entre 1980 et 1981 ; les stations (160613 et 160701) entre 1981 et 1982 ; la station 160104 entre 1984 et 1985 ; la station 160501 entre 1976 et 1977 et la station 160518 entre 1978 et 1979. Alors que pour le reste des stations pluviométrique les données sont homogènes.

Finalement les résultats des deux tests (Pettitt et Buishand) montrent une rupture (c'est-à-dire, ici, une diminution de la pluviométrie annuelle) détecté majoritairement entre 1974 et 1980. Ces résultats confirment l'apparition d'un déficit pluviométrique à partir du milieu des années 70 (met en évidence par le test de Pettitt) et la poursuite de celui-ci durant les décennies 1980-1990 et 1990-2000.

Ces résultats correspondent aux conclusions du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat de 2001, 2007, ainsi que les conclusions du rapport régional des Nations unies sur le changement en Afrique du Nord.

Il est également conforme avec ceux trouvés, sur des séries moins longues, par Meddi et Hubert (2003) ; Meddi (2009) et Ghenim (2010).

## *Chapitre IV*

### *Etude de l'évolution de la pluviométrie (tendances)*

## 4.1 Introduction

Les questions du changement et de la variabilité climatiques intéressent les scientifiques depuis un certain temps en raison de leurs conséquences immédiates et durables sur l'environnement. Les conclusions des analyses du changement climatique réalisées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2001 et 2007) ont démontré un changement dans le bilan énergétique du système « Terre-Océan-Atmosphère-Biosphère ». Aux basses latitudes, ce déséquilibre est marqué par une péjoration ou altération climatique.

En effet, l'espace climatique connaît une variabilité pluviométrique depuis plusieurs décennies. Cela a attiré la communauté universitaire (Doukpolo, 2007 ; Servat et al., 1997) ; elle se caractérise par des anomalies et des crises plus ou moins aléatoires. Cette variabilité est également marquée par des périodes successives ou alternatives d'excédents et de déficits en eau.

Ces effets peuvent être durables sur le cycle hydrologique, notamment lorsqu'ils se traduisent par de périodes de sécheresse ou d'excès d'eau (Doukpolo, 2007).

Il est donc primordial de connaître la tendance du changement (que ce soit en augmentation ou en diminution) pour toute gestion et planification des ressources en eau afin de soutenir les possibilités d'échange d'eau et d'aliments dans un contexte de développement durable d'une société. (Elouissi et al., 2016)

Cette étude est une contribution à la connaissance de l'organisation des précipitations Elle a pour objectif de mettre en évidence la variabilité spatio-temporelle de la pluie dans cette région.

Dans un premier temps nous allons détecter les tendances de la pluviométrie au niveau mensuelle, saisonnier et annuel. En second lieu nous allons étudier la géographie précise des changements, tels que la frontière de l'augmentation ou de la diminution des précipitations, qui s'avère une information très importante. L'élaboration des cartes aiderait à donner un aperçu spatial de ce changement.

Pour ce faire, trois méthodes statistiques sont utilisées,  $r$  de Pearson, Le tau de Kendall et l'Analyse innovante de la tendance de la pluviométrie

## 4.2 Etude de la tendance (coefficient de corrélation de Bravais-Pearson)

### 4.2.1 Introduction

L'application de la méthode de régression linéaire se base sur la normalité des distributions. Cela est vérifié dans le chapitre 3 dans lequel nous avons montré les courbes d'ajustement à la loi racine normale.

La corrélation est une statistique qui marque l'existence ou l'absence d'une relation entre deux échantillons de valeurs prélevées sur le même ensemble de sujets. Le coefficient de corrélation est

utilisé pour quantifier la corrélation : par le signe (positif et négatif), et par la force. Le degré de corrélation est mesuré sur une échelle de 0 à 1 (en valeur absolue). Zéro signifie une absence totale de corrélation entre les deux mesures, tandis que 1 signifie une corrélation parfaite, ce qui signifie que la connaissance de la valeur d'une mesure nous permet de connaître exactement la valeur de l'autre. (Helsel and Hirsch, 2002).

#### 4.2.2 Méthodologie (Le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson)

Ce coefficient est utilisé pour vérifier la présence ou l'absence d'une relation linéaire entre deux éléments quantitatifs continus. Pour déterminer ce coefficient, il est nécessaire de calculer au préalable la covariance. La covariance est la moyenne du produit des écarts par rapport à la moyenne. Elle se calcule par l'équation (IV.1)

$$\text{COV}(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})$$

Ou IV.1

$$\text{COV}(X, Y) = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \cdot Y_i \right) - (\bar{X} \cdot \bar{Y})$$

Le coefficient de corrélation linéaire de deux caractères X et Y est égal à la covariance de X et Y divisée par le produit des écarts-types de X et Y (équation IV.2)

$$r(X, Y) = \frac{\text{COV}(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad \text{IV.2}$$

**Remarque :** lorsque deux caractères sont standardisés, leur coefficient de corrélation est égal à leur covariance puisque leurs écarts-types sont égaux à 1.

##### 4.2.2.1 Limites du coefficient de Pearson

En principe, le coefficient de Pearson est seulement utilisable pour mesurer la relation entre deux variables X et Y ayant une distribution de type gaussien sans valeurs exceptionnelles. Dans le cas où ces conditions ne sont pas vérifiées (ce qui est souvent le cas...), l'utilisation de ce coefficient peut conduire à des conclusions erronées sur la présence ou l'absence d'une relation.

Il faut également noter que l'absence d'une relation linéaire ne signifie pas l'absence de toute relation entre les deux caractères étudiés (Grasland, 2000).

#### 4.2.3 Résultats et discussion

##### 4.2.3.1 Etude de la tendance mensuelle

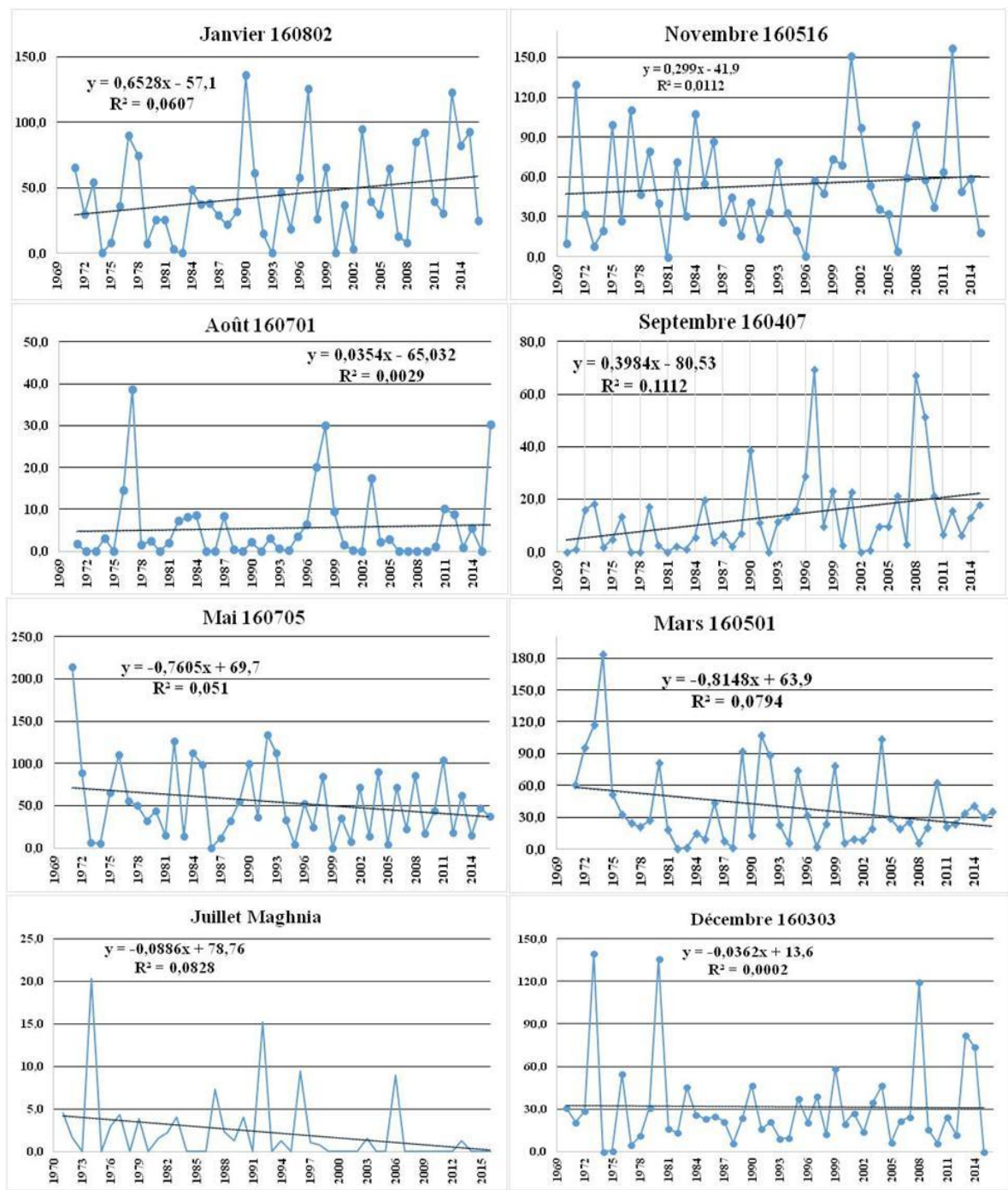
L'étude de tendance mensuelle nécessite tout d'abord de trier les données par mois pour chaque station. Et donc 204 (12\*17) tableaux ont été formés c'est-à-dire 12 mois pour 17 stations, représentés dans le tableau 4.1 :



**Tableau 4.1** : Pluviométrie mensuelle des stations retenues du mois de septembre.

	<b>code</b>	<b>160104</b>	<b>160302</b>	<b>...</b>	<b>160802</b>	<b>160518</b>	<b>160607</b>
	<b>Longitude</b>	<b>-1.68755</b>	<b>-1.77651</b>	<b>...</b>	<b>-1.44729</b>	<b>-1.48082</b>	<b>-1.04052</b>
	<b>Latitude</b>	<b>34.4766</b>	<b>34.7837</b>		<b>35.1441</b>	<b>35.05</b>	<b>34.9023</b>
<b>Années</b>	<b>Mois</b>						
1970	<b>Septembre</b>	2,0	1,5		0,0	0,1	4,4
1971	<b>Septembre</b>	9,7	2,1		7,2	6,8	10,1
1972	<b>Septembre</b>	50,8	15,2		107,5	100,0	32,6
2012	<b>Septembre</b>	9,0	15,5		7,1	18,7	20,1
2013	<b>Septembre</b>	17,7	3,5		32,8	4,9	19,2
2014	<b>Septembre</b>	14,5	25,5		27,0	24,0	9,0
2015	<b>Septembre</b>	6,0	15,0		3,5	4,1	24,4

Nous avons appliqué la régression linéaire sur les 204 tableaux pour 204 courbes. Vu le nombre importants des courbes nous présentons seulement quelques stations pour différents mois (Figure 4.1).



**Figure 4.1.** exemple des courbes de la régression linéaire appliquée sur la pluviométrie mensuelle

C'est évident, que c'est difficile d'analyser une pluviométrie, vu qu'elle représente une variable aléatoire, mais on peut toujours trouver une tendance générale dans la série et pour caractériser une relation linéaire (positive ou négative). Il s'agit d'une mesure symétrique. Plus il est proche de 1 (en valeur absolue), plus la relation est forte.

La valeur du coefficient de corrélation permet d'évaluer la force de la relation (forte, faible ou absente). Alors que le coefficient de détermination ( $r^2$ ), peut être interprété comme la proportion de la variance de Y (X) expliquée linéairement par X (Y).

Ainsi, une valeur de  $r = 0,9$  traduit une liaison forte, tandis que son carré ( $r^2=0,81$ ) informe que 81% de la variance de Y s'explique par X (et inversement)

Nous avons appliqué un test de Student sur les coefficients de corrélation ( $r$ ) pour vérifier la significativité de ces derniers.

Les symboles +, -, 0 et "AUCUNE" sont utilisés pour indiquer respectivement une tendance croissance, décroissance, nulle ou une absence de tendance. Le tableau 4.2 montre les tendances pour chaque mois pour chaque station.

**Tableau 4.2.** Symbole de la tendance mensuelle pour chaque station (r de Pearson).

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
160104	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	+	Aucune
160302	Aucune	-	-	-	Aucune	-	-	Aucune	+	Aucune	Aucune	0
160303	Aucune	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune
160401	Aucune	-	-	Aucune	-	0	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
160403	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune
160407	+	-	-	-	Aucune	Aucune	0	+	+	Aucune	+	0
160501	+	-	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune
160502	Aucune	-	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	+	Aucune	Aucune
160516	Aucune	-	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune
160601	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	0	Aucune
160610	+	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	0	Aucune	aucune	Aucune	aucune	Aucune
160613	+	Aucune	-	Aucune	Aucune	-	-	Aucune	aucune	Aucune	+	Aucune
160701	Aucune	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	-	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune
160705	Aucune	Aucune	-	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	aucune	Aucune	Aucune	Aucune
160802	+	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	aucune	Aucune	+	Aucune
160518	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	aucune	Aucune	+	Aucune
160607	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	-	-	0	+	Aucune	Aucune	Aucune

L'interprétation des résultats du tableau 4.2 a mis en évidence que les mois de février, mars, avril, mai, juin, juillet présentent une dominance de la tendance décroissante, avec 41%, 88%, 52%, 11%, 17%, 23%. La tendance positive est perceptible au niveau des mois de janvier (35%), aout (18%), septembre (88%), octobre (29%) et novembre (29%).

Les fréquences du tableau 4.2 sont représentées sur la Figure 4.2.

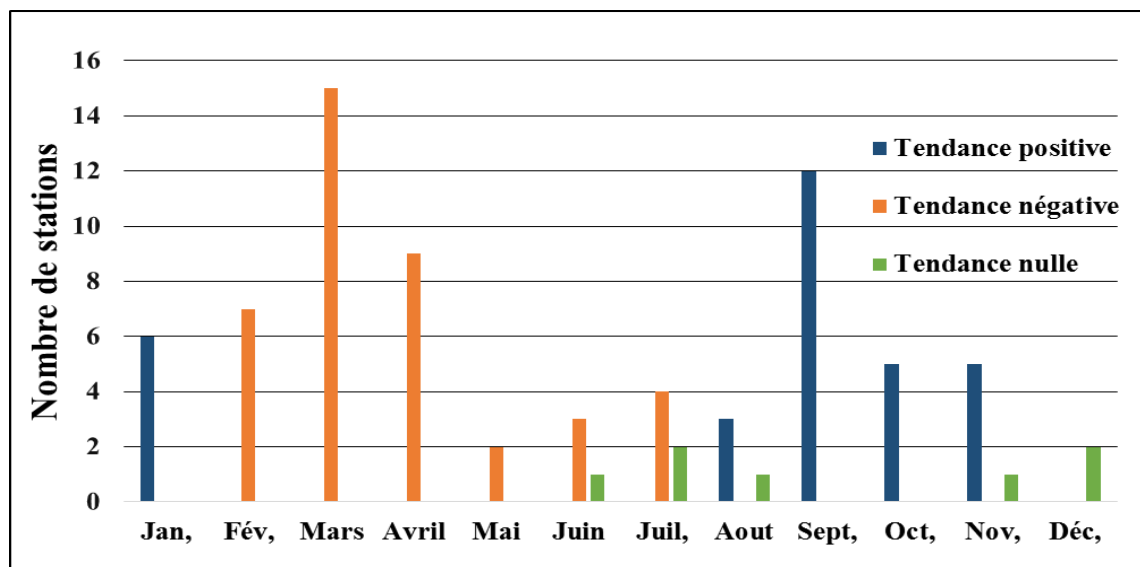


Figure 4.2. Fréquence des stations selon le type de tendance mensuelle (r de Pearson)

On peut confirmer d'après la figure 4.2 que les mois les plus affectés sont février, mars, avril, mai, juin, juillet. Le mois de mars à la tendance négative la plus importante. Le même résultat est mentionné par Khaldi (2005).

Pour de plus amples informations, les cas de tendances (hausse, baisse, nulle et absence) sont indiqués dans les cartes ci-dessous (Figure 4.3 à Figure 4.14), les symboles suivants sont utilisés :

- △ Pour indiquer une tendance croissante.
- ▽ Pour indiquer une tendance décroissante.
- Pour indiquer une absence de tendance.
- ☆ Pour indiquer une tendance nulle.

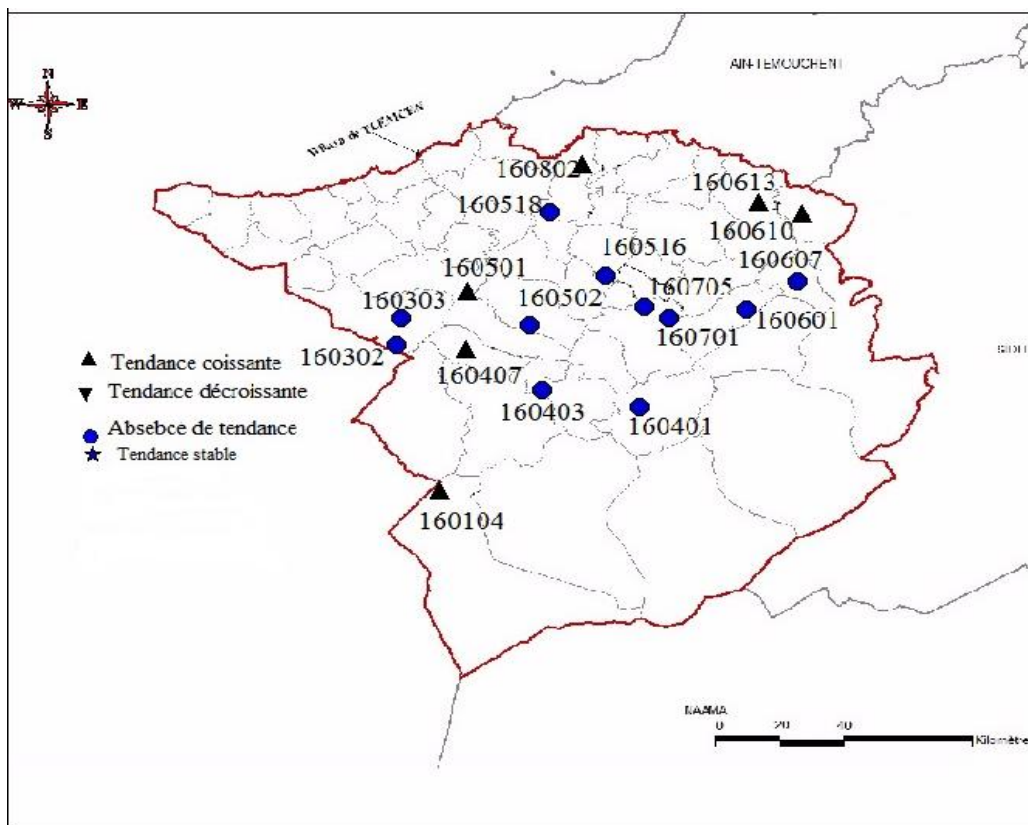


Figure 4.3. Carte des tendances du mois de janvier (r de Pearson).

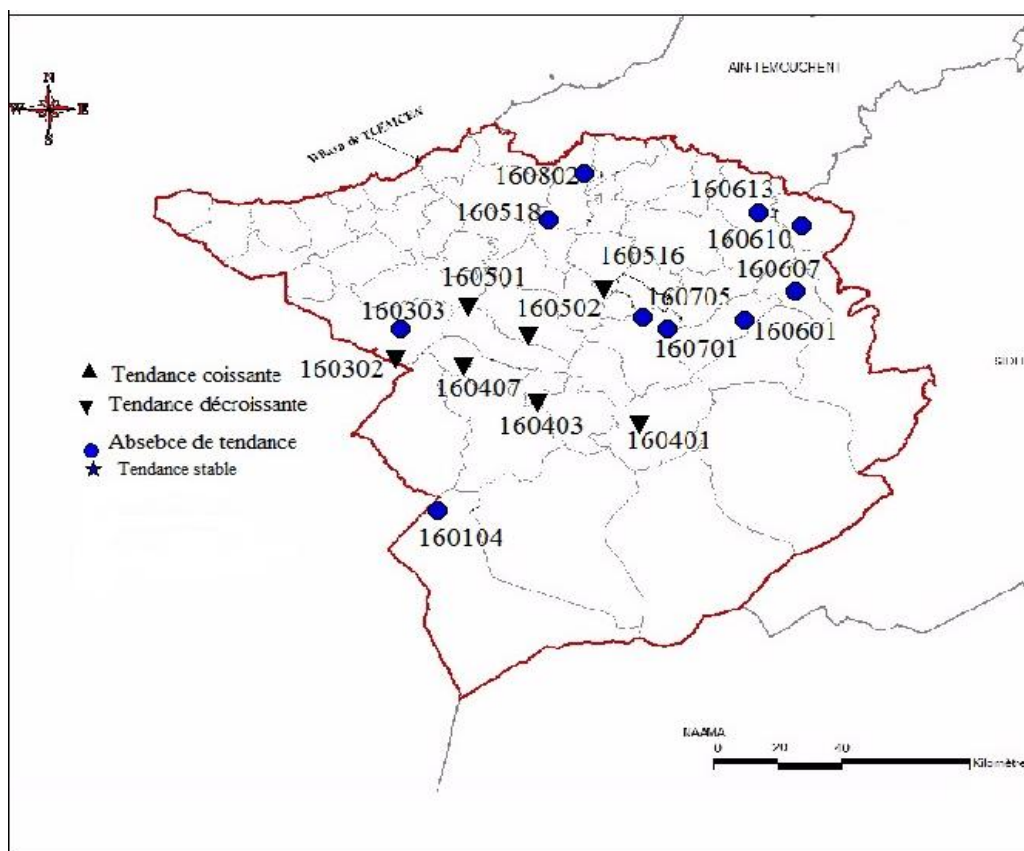


Figure 4.4. Carte des tendances du mois de février (r de Pearson).

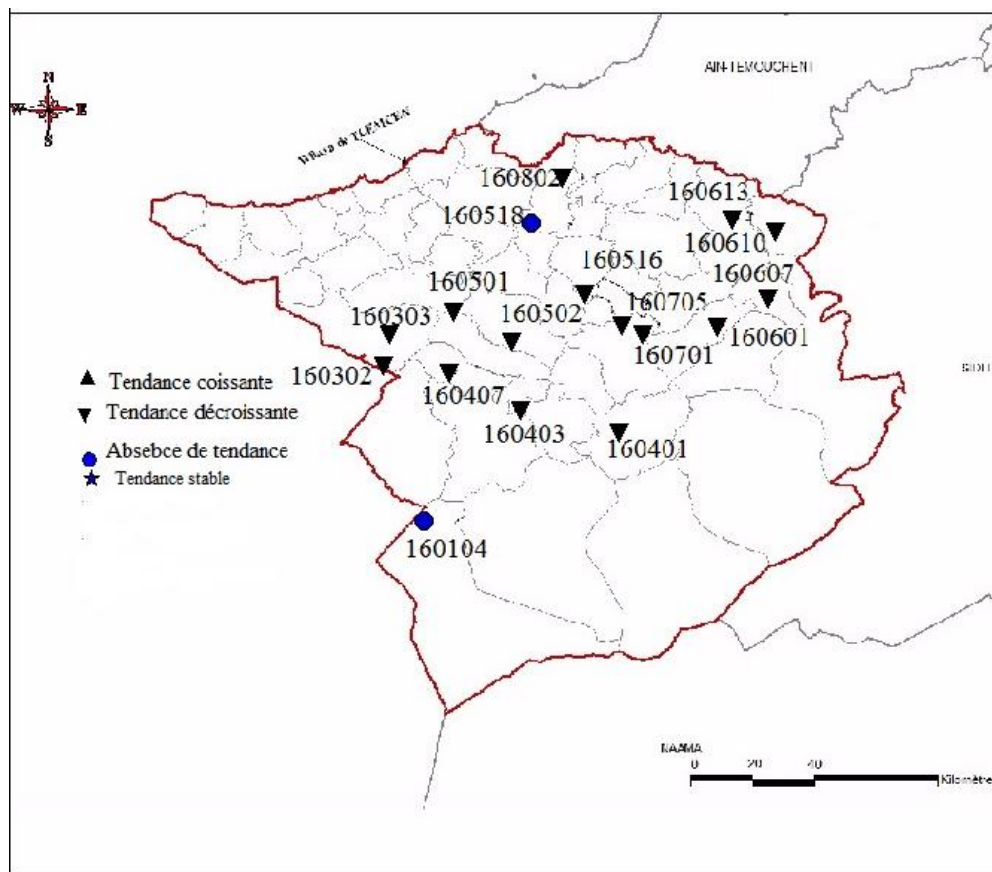


Figure 4.5. Carte des tendances du mois de mars (r de Pearson).

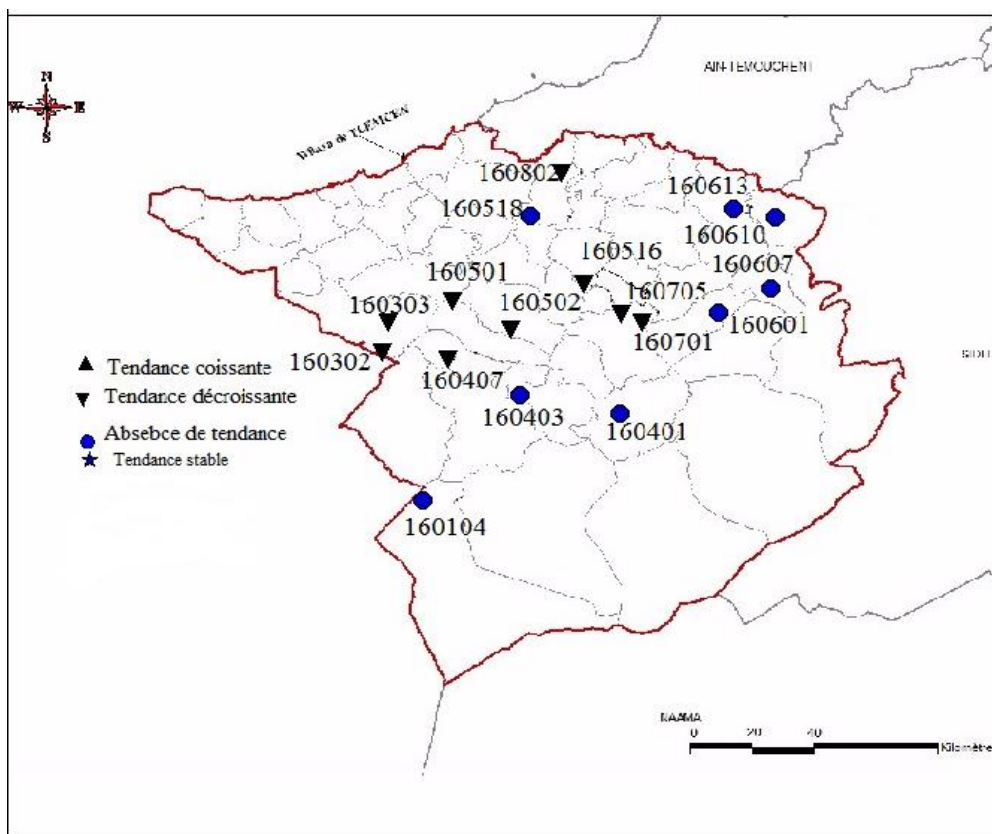


Figure 4.6. Carte des tendances du mois d'avril (r de Pearson).

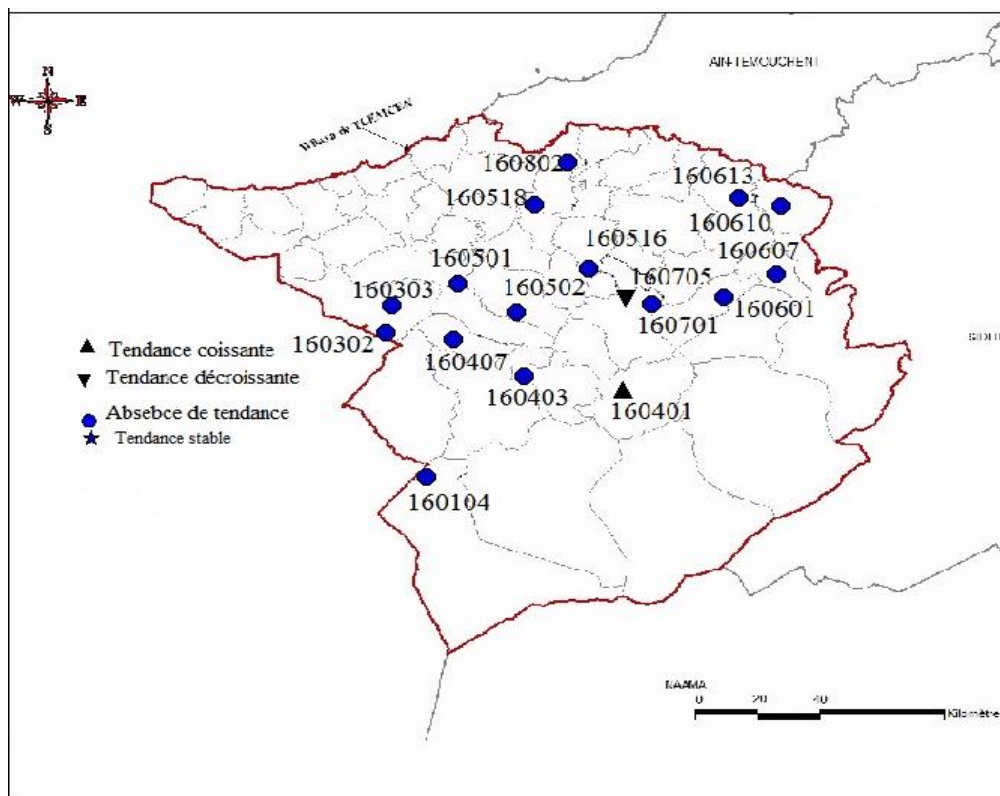


Figure 4.7. Carte des tendances du mois de mai (r de Pearson).

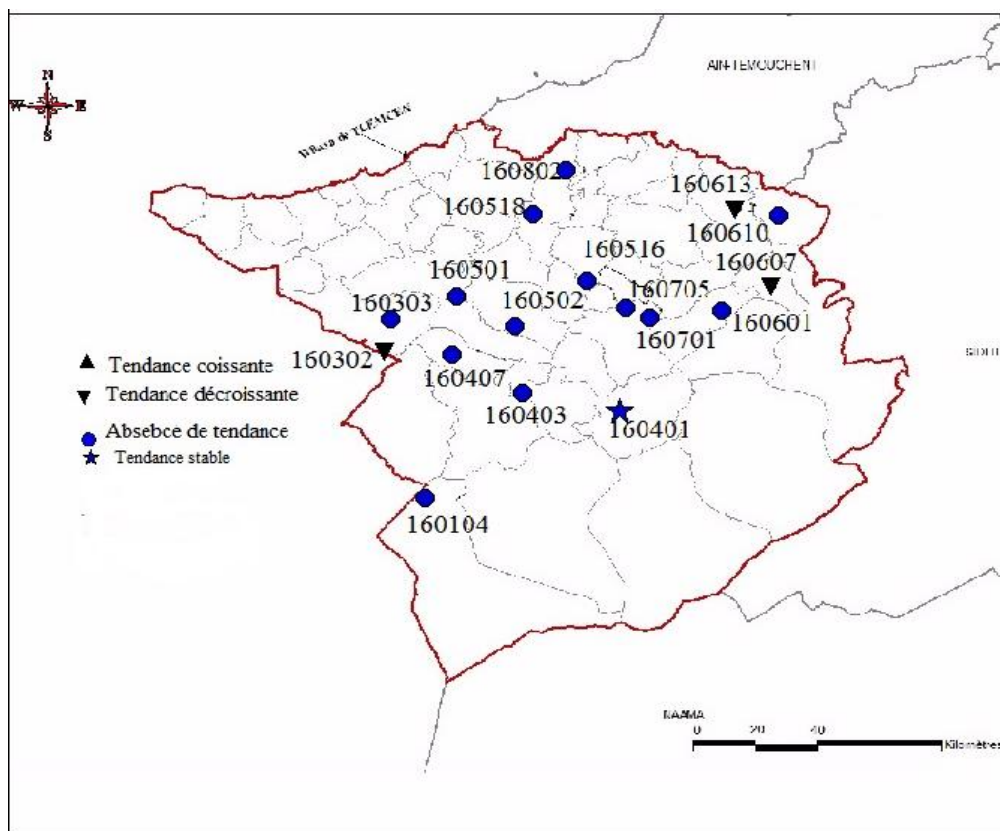


Figure 4.8. Carte des tendances du mois de juin (r de Pearson).

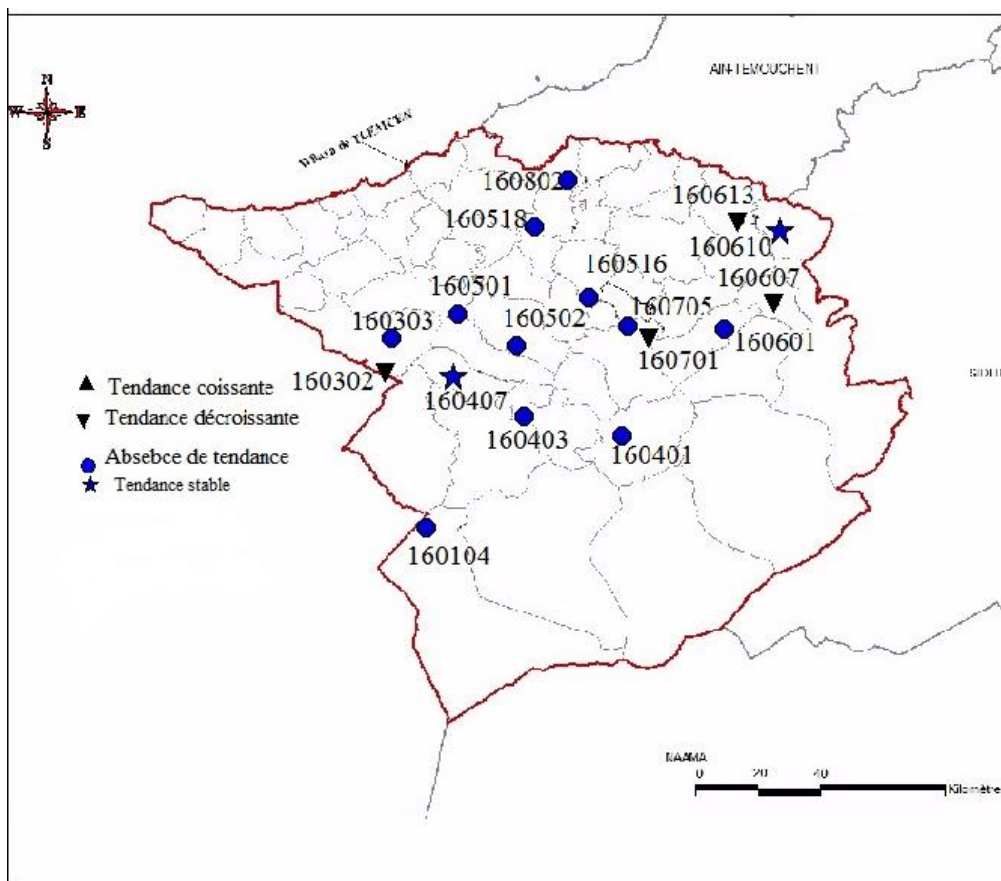


Figure 4.9. Carte des tendances du mois de juillet (r de Pearson).

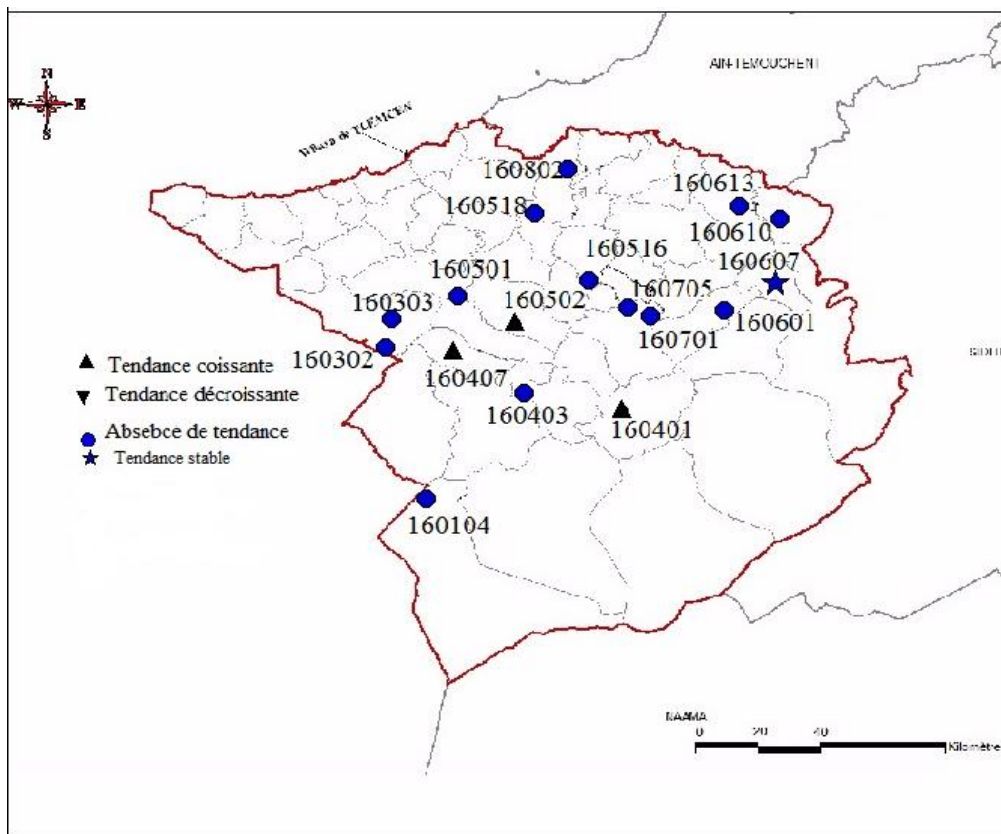


Figure 4.10. Carte des tendances du mois d'aout (r de Pearson).



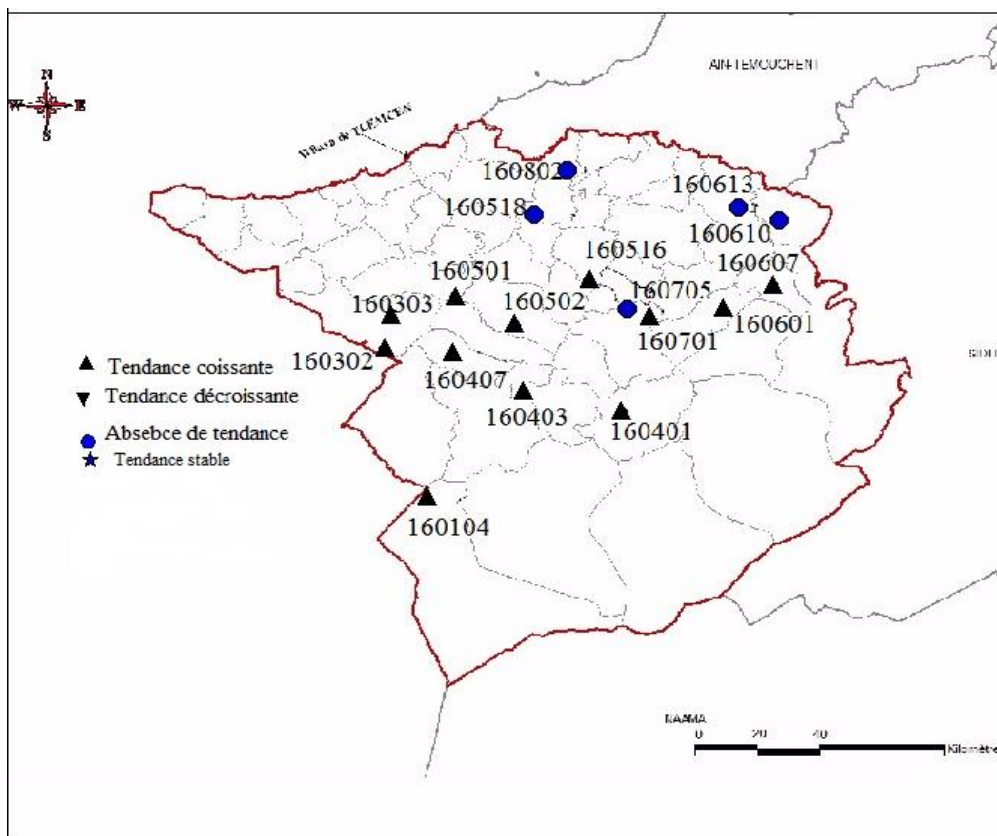


Figure 4.11. Carte des tendances du mois de septembre (r de Pearson).

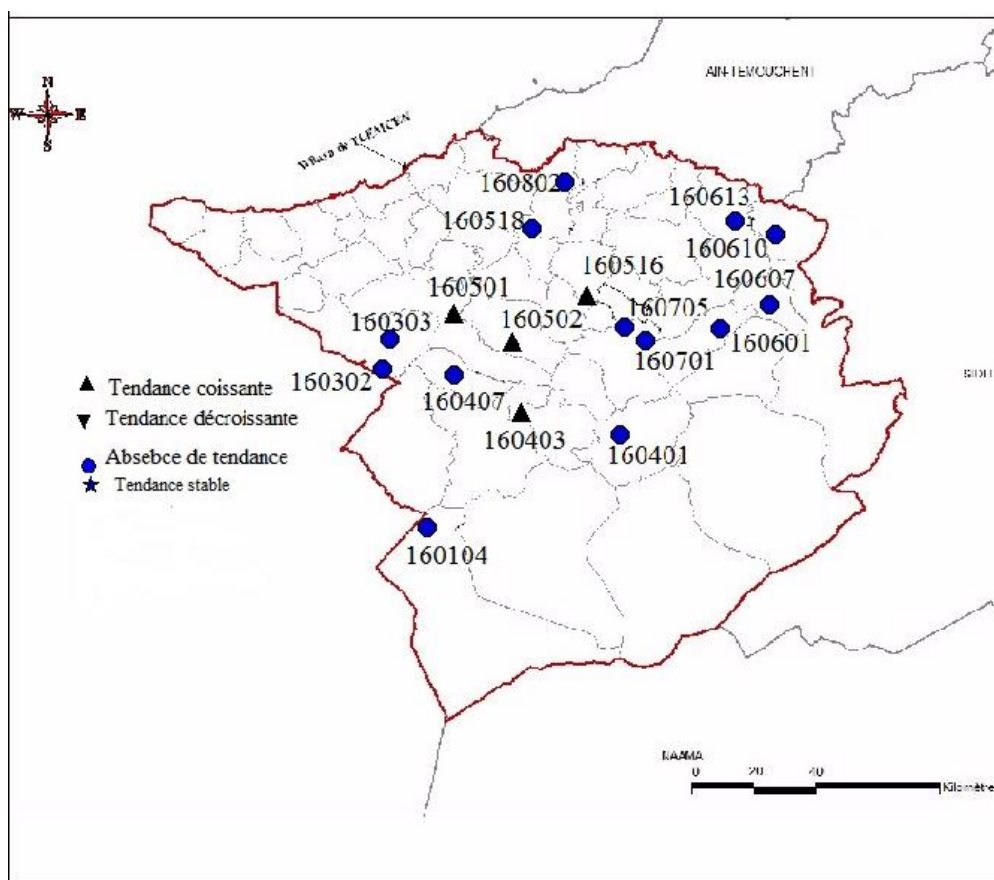


Figure 4.12. Carte des tendances du mois d'octobre (r de Pearson).

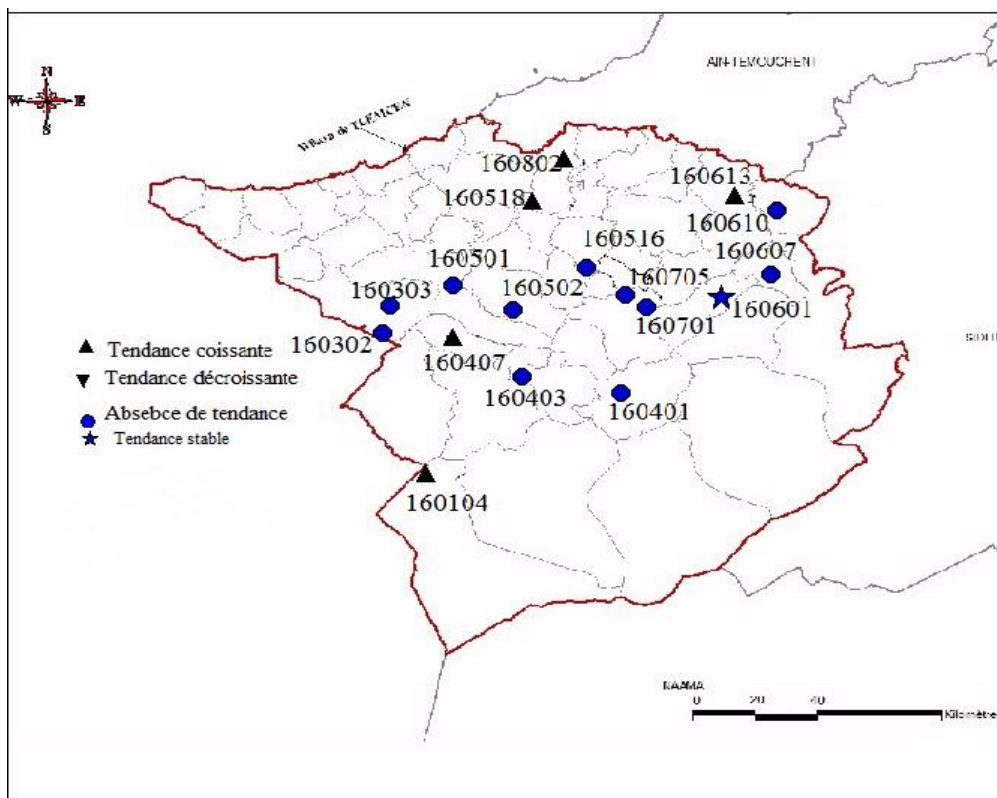


Figure 4.13. Carte des tendances du mois de novembre (r de Pearson).

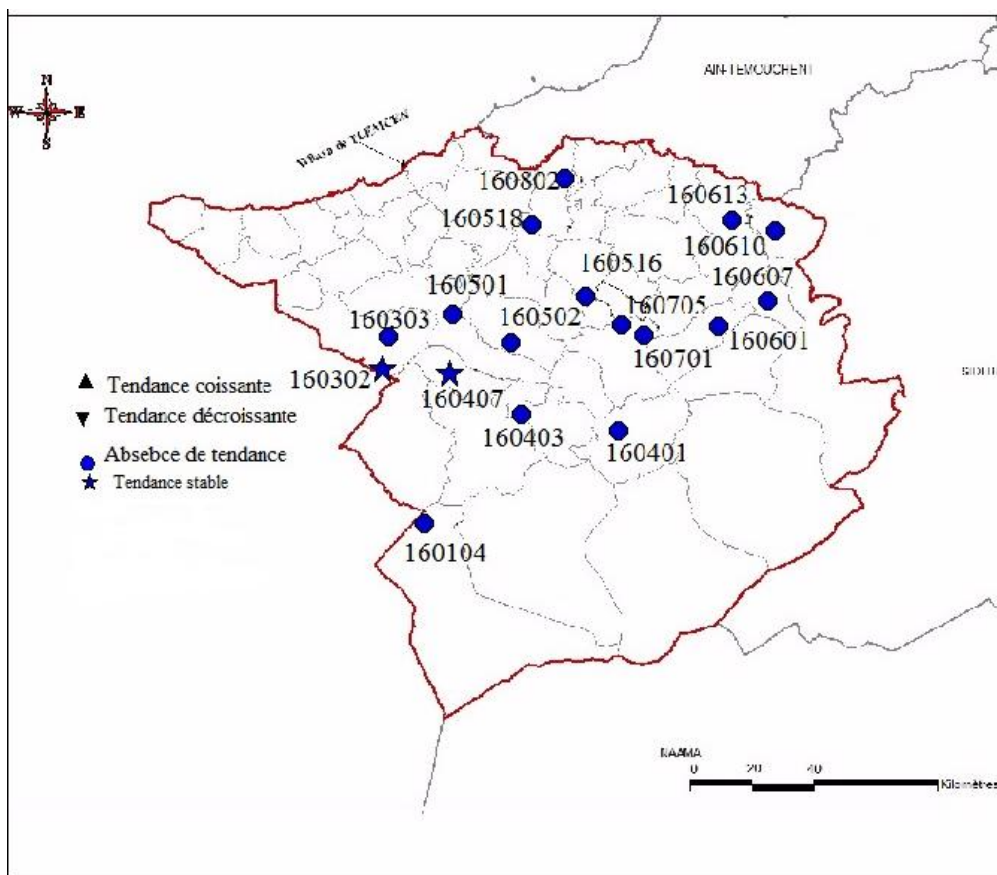


Figure 4.14. Carte des tendances du mois de décembre (r de Pearson).

### Interprétation

La méthode de  $r$  Pearson a été appliquée sur 17 stations pluviométriques, afin de détecter les tendances de la pluviométrie au niveau mensuel, les résultats du tableau (4.2) et de la Figure (4.2) ont montré une tendance à la baisse sur les mois février, mars, avril, mai, juin et juillet. Les cas de tendances à la hausse et à la baisse sont indiqués par les symboles  $\Delta$  et  $\nabla$  respectivement sur douze cartes de tendance. La tendance à la hausse a été marquée dans les mois janvier (35%), Aout (18%), septembre (71%), octobre (24%) et novembre (24%), tandis que le mois de mars a montré une tendance à la baisse dans presque toutes les stations de la carte (88%). Des résultats similaires ont été constatés par Elouissi(2016) dans le bassin versant la Macta. Les mois février, avril, juin, juillet ont aussi une tendance à la baisse dans 41%,52%, 18%, 25% des stations respectivement. Cette diminution importante dans les précipitations mensuelles dans le nord-ouest de l'Algérie peut être liée par l'oscillation méditerranéenne (OM) et l'oscillation de l'Atlantique Nord (OAN) et son influence sur cette dernière (Khaldi, 2005 ; Taibi et al., 2014).Le mois de décembre montre une absence de tendance dans presque toutes les stations. Cela explique la grande dispersion de la pluviométrie mensuelle du mois de décembre où on ne peut pas percevoir une tendance.

#### 4.2.3.2 Etude de la pluviométrie saisonnière

L'étude de la variation saisonnière des précipitations est encore plus intéressante que l'impact hydrologique de la variabilité mensuelle du climat dans notre région. Elle dépend fortement de sa distribution spatiale et temporelle.

La présente étude a pour but de rechercher les tendances des cumuls saisonniers de précipitations. Comme nous avons des données mensuelles, les mois de chaque saison sont indiqués dans le tableau.4.3.

**Tableau 4.3.** Répartition des mois au sein des saisons

Saison	Mois
Automne	Octobre – Novembre – Décembre
Hiver	Janvier – Février – Mars
Printemps	Avril – Mai – Juin
Été	Juillet – Aout - Septembre

Pour chaque station, nous avons calculé le cumul de la pluviométrie pour une saison et une année donnée. Soixante-huit ( $68 = 4 \cdot 17$ ) tableaux ont été formés. Chaque tableau contient en ligne les valeurs de la pluviométrie saisonnière pour une année donnée (Tableau 4.4 à Tableau 4.7).

**Tableau 4.4.** Données de la pluviométrie saisonnière (Automne) (1970-2015)

<b>Code</b>	<b>160104</b>	<b>160302</b>	<b>...</b>	<b>160802</b>	<b>160518</b>	<b>160607</b>
<b>Longitude</b>	<b>-1.68755</b>	<b>-1.77651</b>	<b>...</b>	<b>-1.44729</b>	<b>-1.48082</b>	<b>-1.04052</b>
<b>Latitude</b>	<b>34.4766</b>	<b>34.7837</b>		<b>35.1441</b>	<b>35.05</b>	<b>34.9023</b>
<b>Années</b>						
1970	51,3	57,5		72,5	63,7	48,0
1971	121,5	109,4		181,7	156,6	150,3
1972	82,2	96,6		138,5	115,3	92,5
2012	142,6	183,6		251,9	228,2	182,1
2013	110,7	119,5		201,6	140,6	196,1
2014	133,7	130,5		190,5	146,7	165,2
2015	46,4	26		51,6	41,1	65,3

**Tableau 4.5.** Données de la pluviométrie saisonnière (hiver) (1970-2015)

<b>Code</b>	<b>160104</b>	<b>160302</b>	<b>...</b>	<b>160802</b>	<b>160518</b>	<b>160607</b>
<b>Longitude</b>	<b>-1.68755</b>	<b>-1.77651</b>	<b>...</b>	<b>-1.44729</b>	<b>-1.48082</b>	<b>-1.04052</b>
<b>Latitude</b>	<b>34.4766</b>	<b>34.7837</b>		<b>35.1441</b>	<b>35.05</b>	<b>34.9023</b>
<b>Années</b>						
1970	134,0	203,0		136,8	99,8	207,2
1971	84,0	81,4		94,4	80,1	82,0
1972	50,7	72,6		96,8	83,3	60,5
2012	82,2	56,3		128,7	53,7	106,9
2013	31,7	43,5		42,0	31,9	59,0
2014	13,1	42,2		16,2	26,2	61,7
2015	53,2	72,5		50,9	68,6	74,4

**Tableau 4.6.** Données de la pluviométrie saisonnière (Printemps) (1970-2015)

<b>Code</b>	<b>160104</b>	<b>160302</b>	<b>..</b>	<b>160802</b>	<b>160518</b>	<b>160607</b>
<b>Longitude</b>	<b>-1.68755</b>	<b>-1.77651</b>	<b>..</b>	<b>-1.44729</b>	<b>-1.48082</b>	<b>-1.04052</b>
<b>Latitude</b>	<b>34.4766</b>	<b>34.7837</b>		<b>35.1441</b>	<b>35.05</b>	<b>34.9023</b>
<b>Années</b>						
1970	143,1	106,2		147,2	124,5	153,5
1971	153,1	110,5		205,6	177,8	172,8
1972	235,0	266,9		249,4	198,3	285,8
2012	85,7	154,2		184,3	162,4	226,7
2013	150,5	135,4		161,5	170,1	169,7
2014	118,6	96,2		180,9	153,7	59,5
2015	117,6	83,3		113,3	122,5	168,7

**Tableau 4.7.** Données de la pluviométrie saisonnière (Eté) (1970-2015)

<b>Code</b>	<b>160104</b>	<b>160302</b>	<b>...</b>	<b>160802</b>	<b>160518</b>	<b>160607</b>
<b>Longitude</b>	<b>-1.68755</b>	<b>-1.77651</b>	<b>...</b>	<b>-1.44729</b>	<b>-1.48082</b>	<b>-1.04052</b>
<b>Latitude</b>	<b>34.4766</b>	<b>34.7837</b>		<b>35.1441</b>	<b>35.05</b>	<b>34.9023</b>
<b>Années</b>						
1970	12,0	7,8		0,0	0,1	19,1
1971	14,7	5,8		8,9	8,5	18,6
1972	57,2	15,2		109,9	102,4	43,7
2012	25,3	16,8		9,3	30,0	31,9
2013	29,2	5,5		32,8	19,3	28,2
2014	18,2	25,5		29,5	31,9	19,4
2015	7,8	15,0		3,5	4,1	27,9

Des courbes de précipitations saisonnières ont été représentées au-dessous. Des lignes de tendance avec des équations de régression linéaire ont été ajoutées. On peut voir les stations avec des droites de tendance ascendantes et descendantes (Figure 4.15 à Figure 4.18).

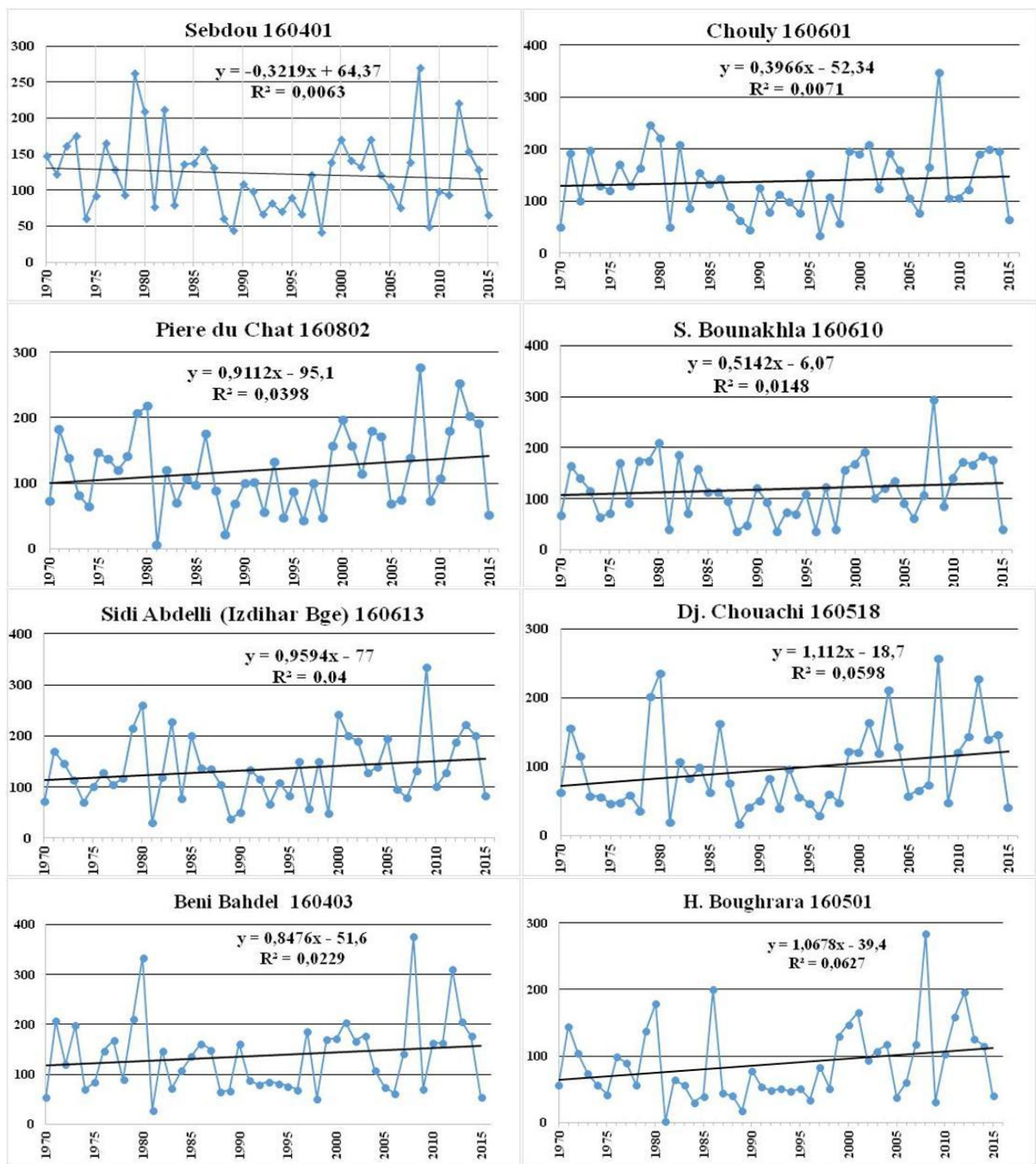


Figure 4.15. Courbes de la pluviométrie saisonnière (Automne) (avec droites de tendances)

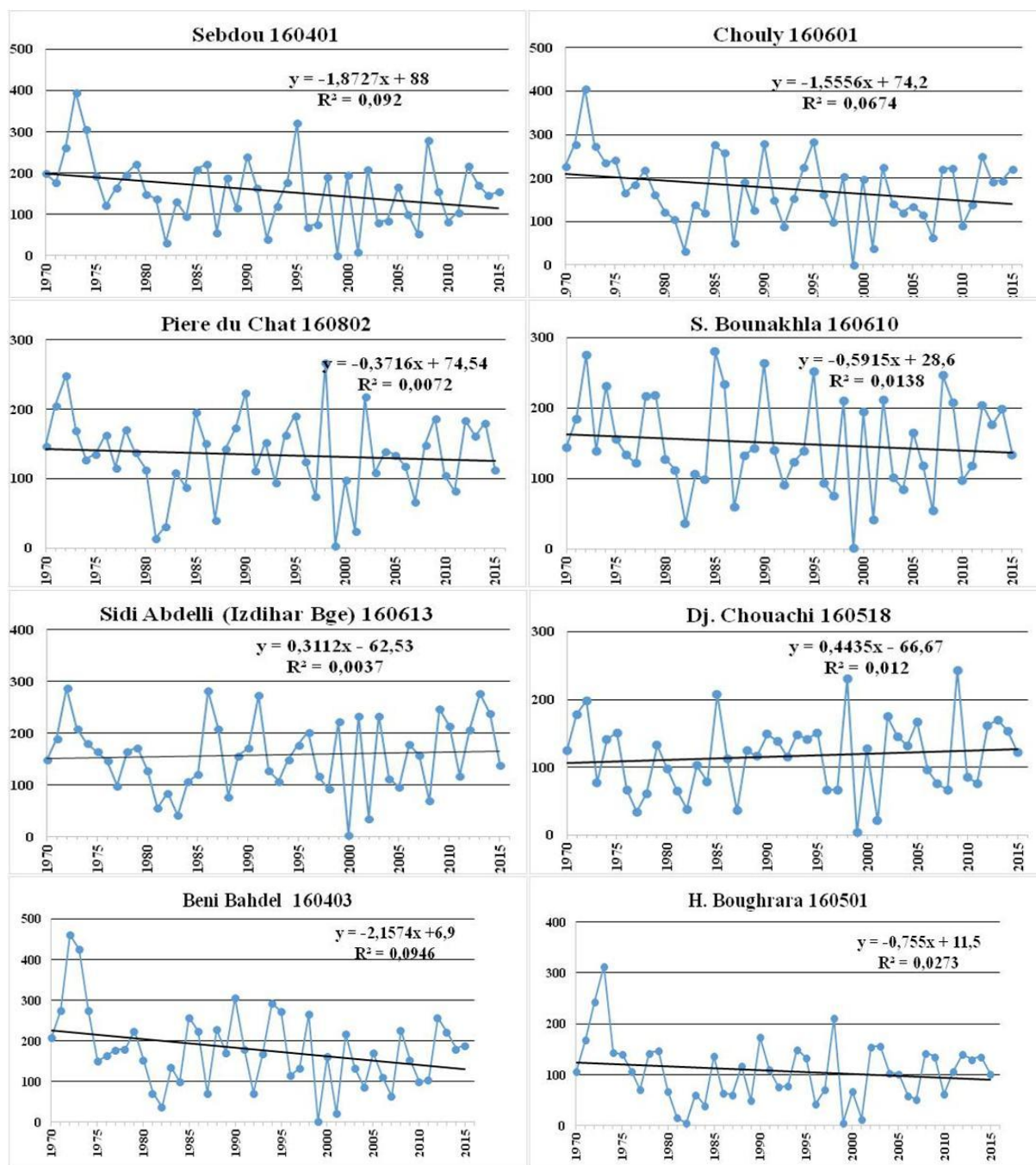
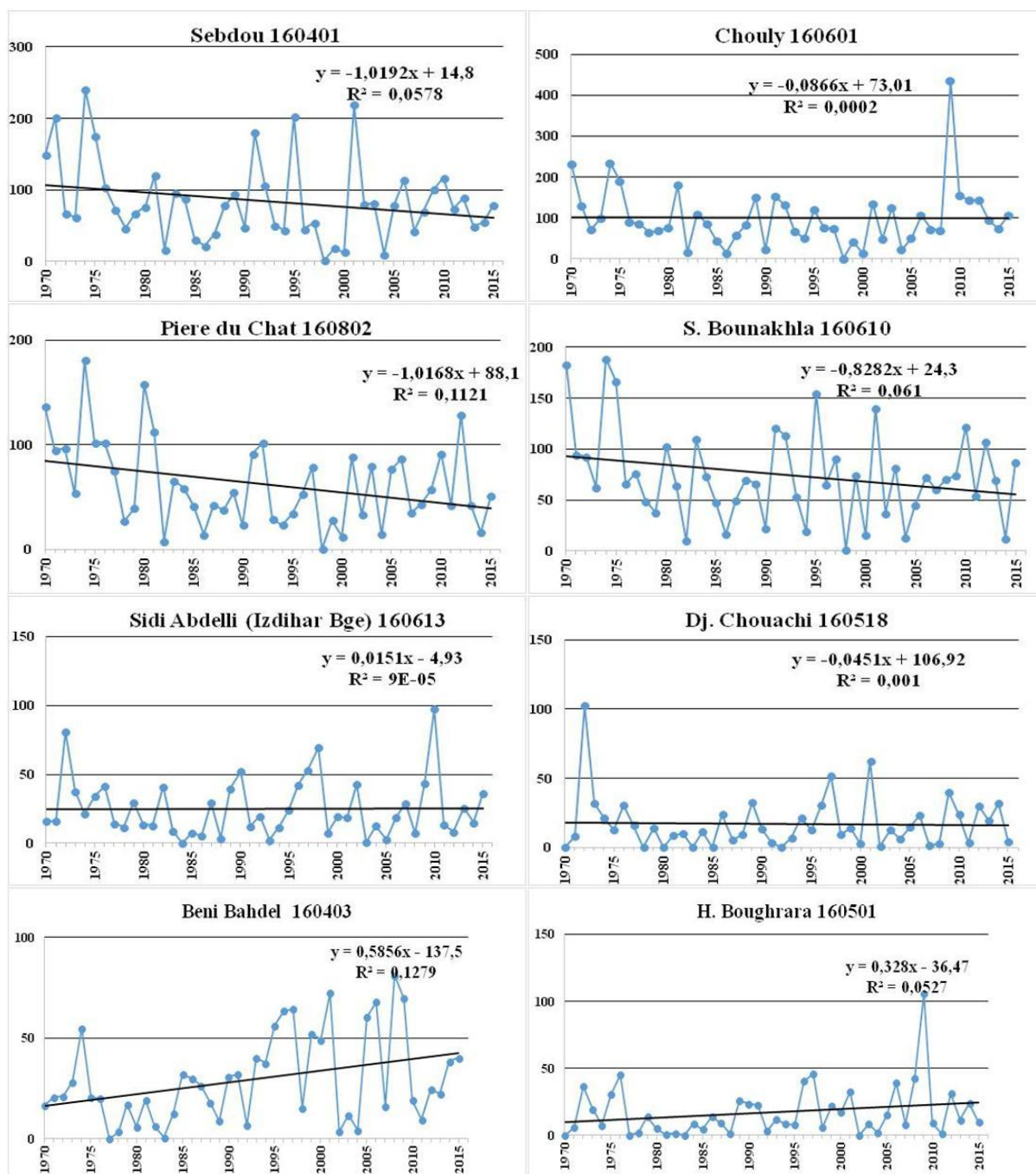


Figure 4.16. Courbes de la pluviométrie saisonnière (Hiver) (avec droites de tendances)



**Figure 4.17.** Courbes de la pluviométrie saisonnière (Printemps) (avec droites de tendances)



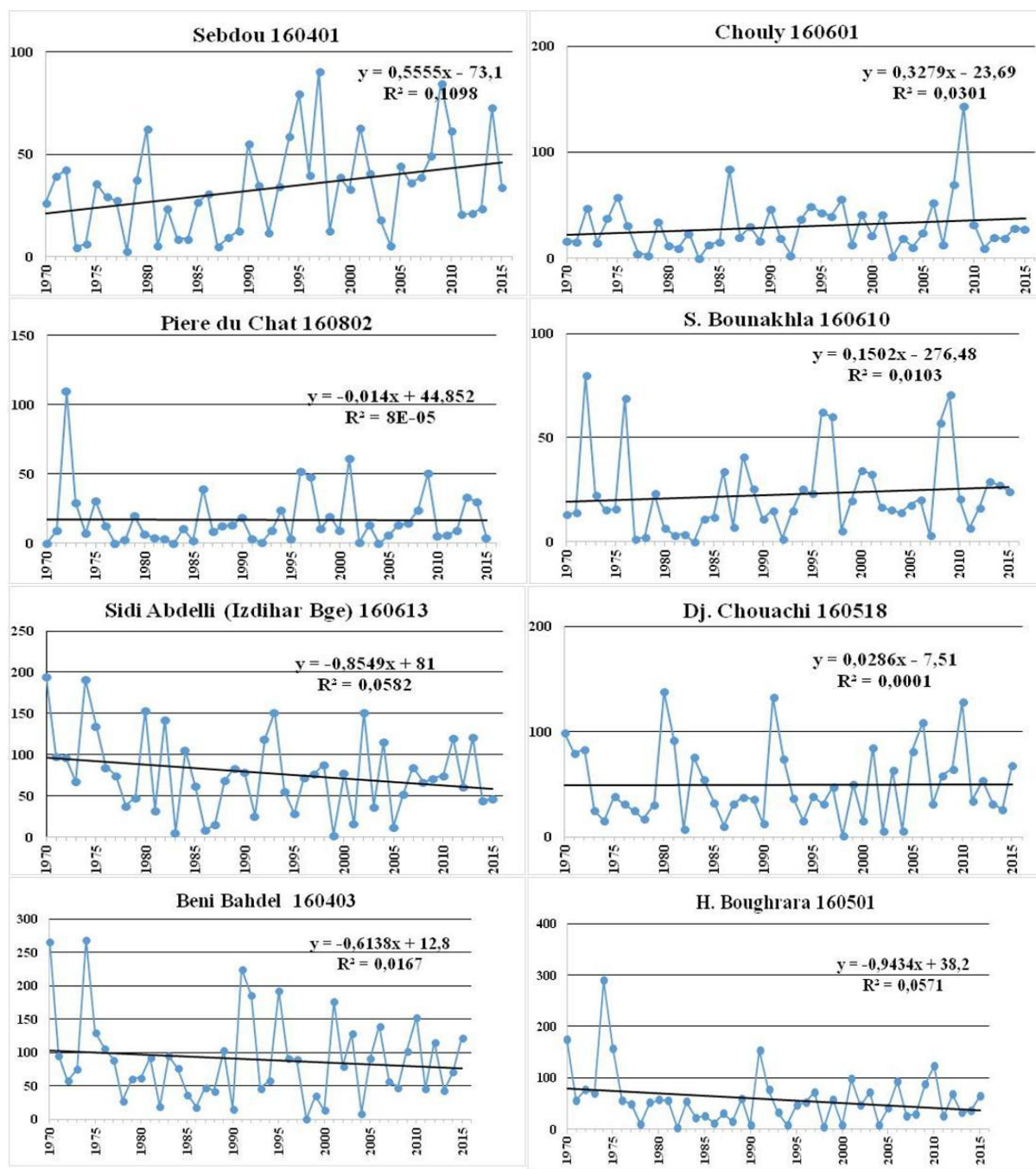


Figure 4.18. Courbes de la pluviométrie saisonnière (Eté) (avec droites de tendances)

Les courbes de la pluviométrie saisonnière avec droites de tendances et le coefficient de corrélation nous aide beaucoup à décider si la tendance est croissante ou décroissante. Une tendance est considérée comme croissante (décroissante) si la valeur de la pente est positive (négative). Les résultats sont représentés sur le tableau 4.8. Le diagramme (Figure 4.19) reliant nombre des stations pour une saison donnée et une tendance donnée, permet d'observer les stations ayant la même tendance

Tableau 4.8. Symbole de la tendance saisonnière pour chaque station (r de Pearson)

	<b>hiver</b>	<b>printemps</b>	<b>été</b>	<b>automne</b>
<b>160104</b>	+	aucune	+	+
<b>160302</b>	Aucune	-	aucune	aucune
<b>160303</b>	-	-	+	aucune
<b>160401</b>	-	-	+	aucune
<b>160403</b>	-	aucune	+	aucune
<b>160407</b>	Aucune	-	+	+
<b>160501</b>	Aucune	-	+	+
<b>160502</b>	Aucune	-	+	aucune
<b>160516</b>	-	-	aucune	aucune
<b>160601</b>	-	aucune	aucune	aucune
<b>160610</b>	Aucune	-	aucune	aucune
<b>160613</b>	Aucune	-	0	aucune
<b>160701</b>	-	-	aucune	aucune
<b>160705</b>	-	-	aucune	aucune
<b>160802</b>	Aucune	-	0	aucune
<b>160518</b>	Aucune	aucune	aucune	+
<b>160607</b>	Aucune	-	aucune	+

D'après le tableau 4.8, il est très clair qu'un grand nombre des stations représente une tendance négative des saisons hiver et printemps, par contre la tendance positive est remarqué sur les saisons été et automne. On va dénombrer par la suite le nombre de station qui ont une tendance positive (négative) pour une saison donnée et une tendance donnée (Figure 4.19).

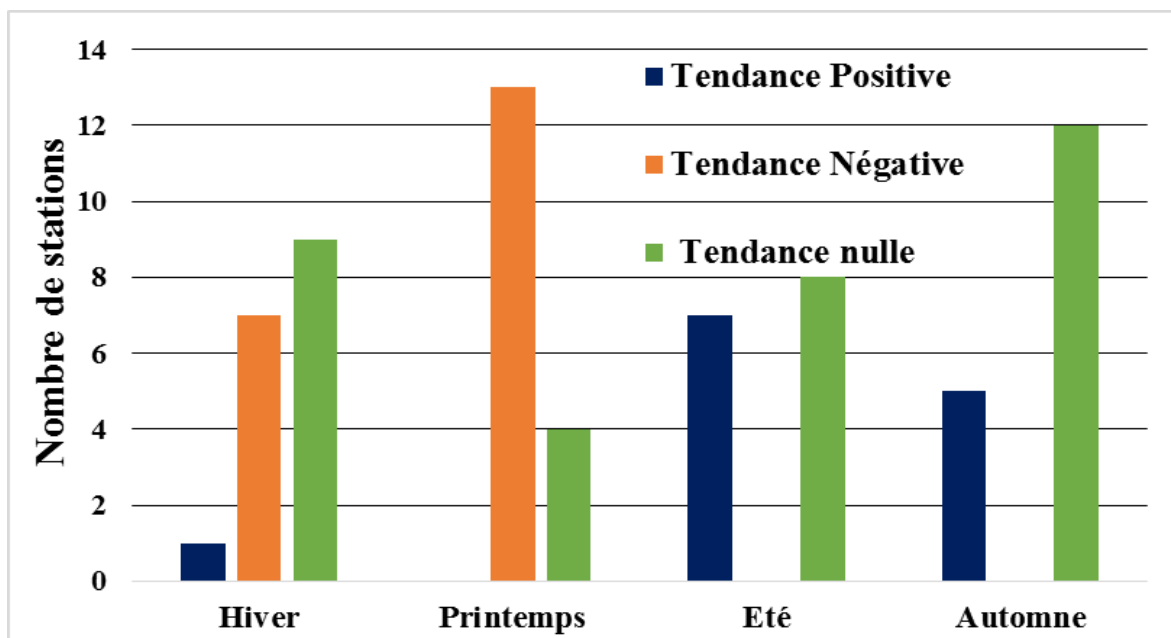


Figure 4.19. Nombre de station pour chaque type de tendance saisonnière (r de Pearson).

On observe de la Figure 4.19 que la tendance négative est dominante au niveau des saisons printemps (76%), hiver (41%) par contre la tendance positive est marquée au niveau de la saison d'été (41%) et la saison automne (29%).

La saison d'automne a montré aussi une tendance nulle sur la majorité des stations observée (environ 71%). Cela peut être expliqué par la grande dispersion des données durant les années étudiées.

Pour mieux comprendre la répartition spatiale des tendances saisonnière des cartes de tendance on était réalisée pour chaque saison et représentée sur la Figure 4.20 à Figure 4.23.

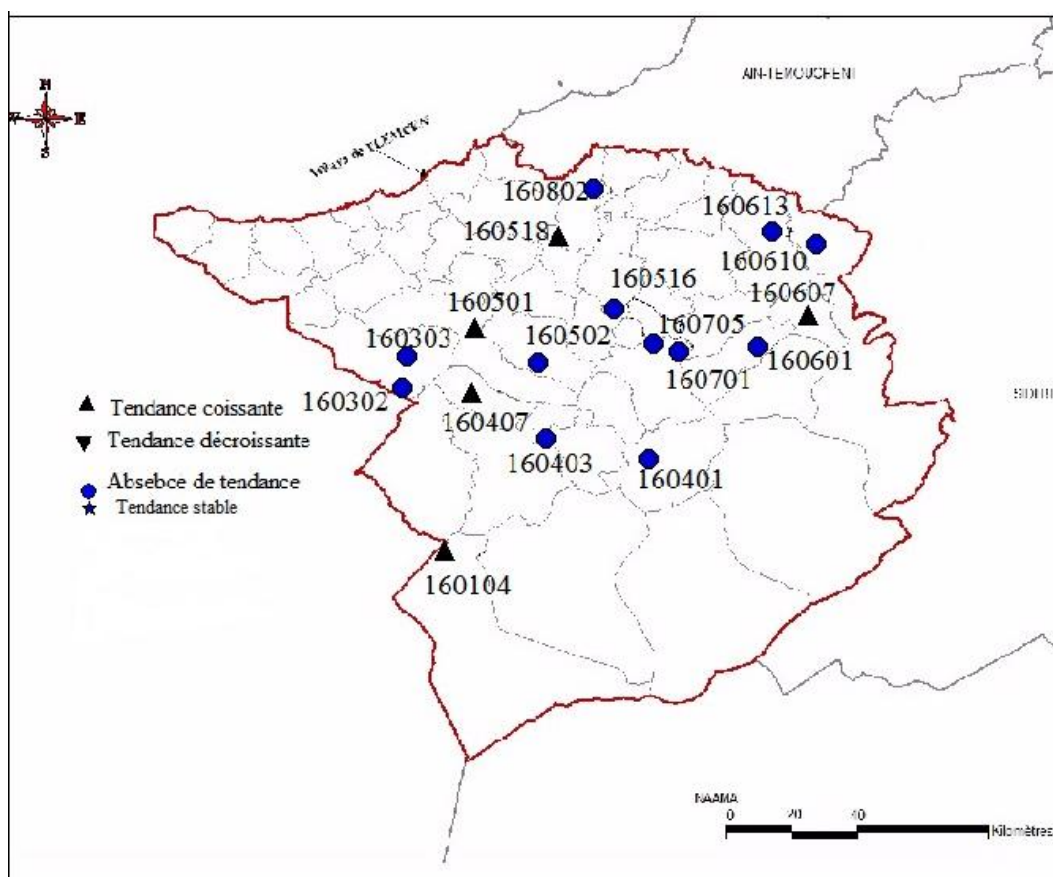


Figure 4.20. Carte de la tendance de la saison de l'Automne (r de Pearson)

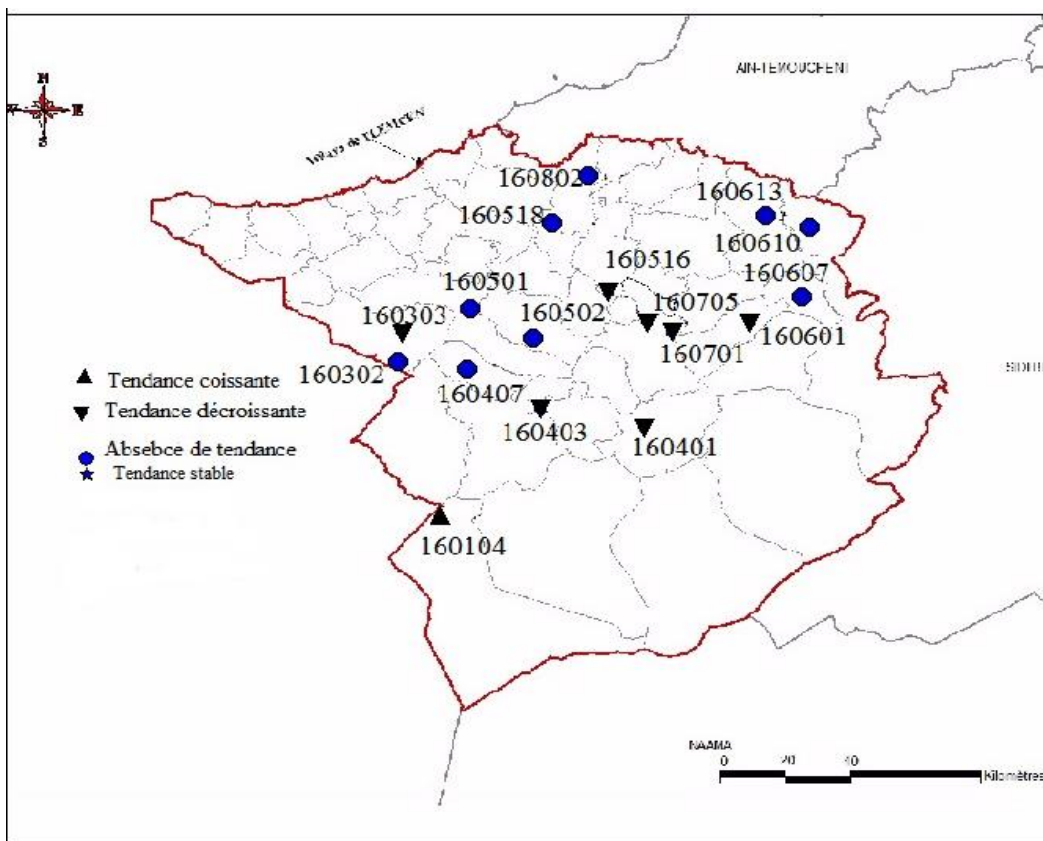


Figure 4.21. Carte de la tendance de la saison de l'Hivers (r de Pearson).

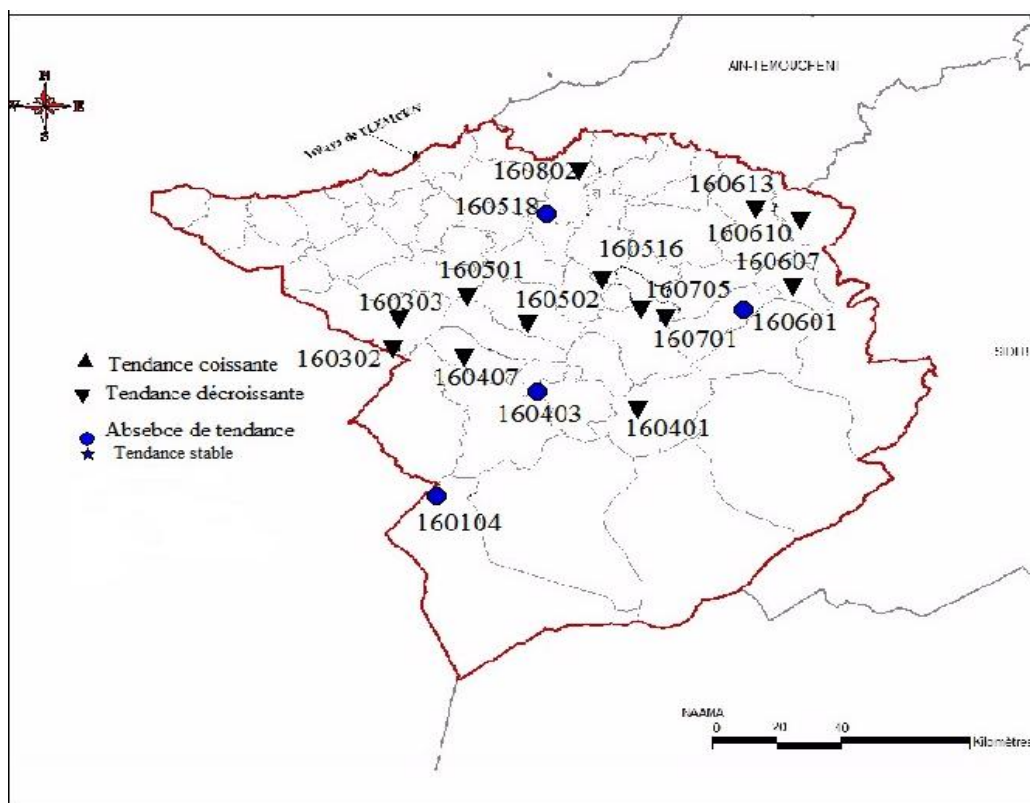


Figure 4.22. Carte de la tendance de la saison du Printemps (r de Pearson).

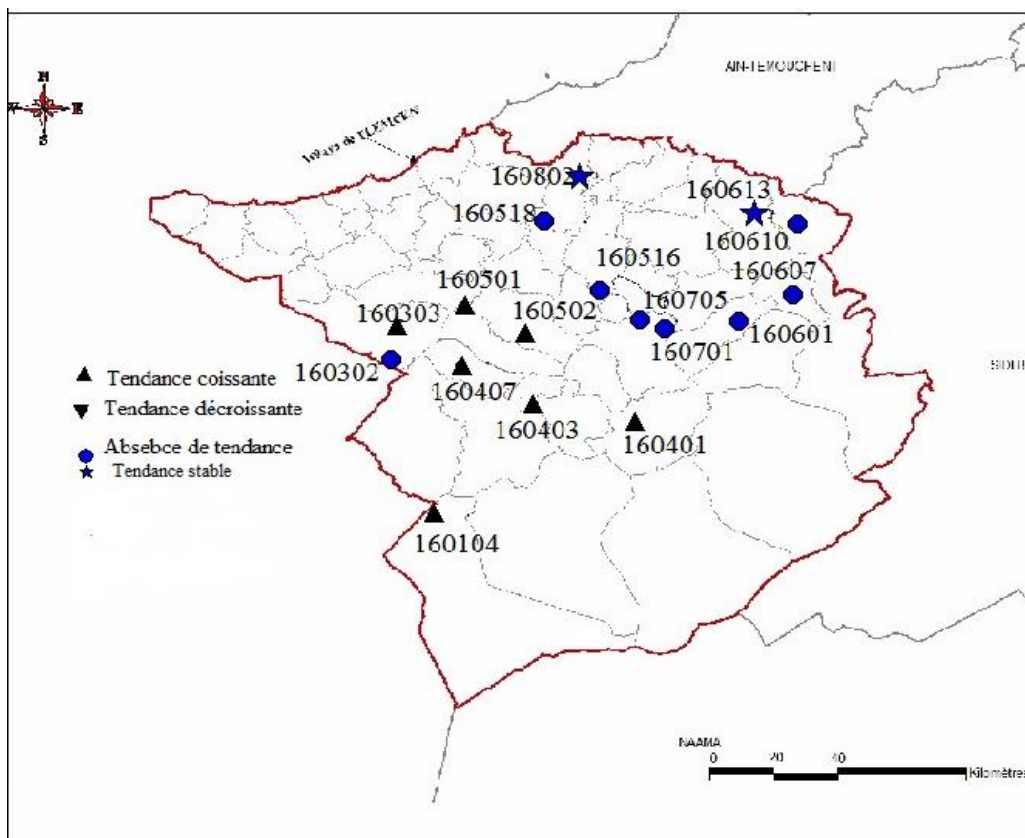


Figure 4.23. Carte de la tendance de la saison de l'Eté (r de Pearson).

### Interprétation

La majorité des stations de la saison automne (Figure 4.20) n'ont aucune tendance, sauf les stations 160518, 160607, 160501, 160407 160104 qui représentent une tendance à la hausse, Cela était déjà justifié par la grande dispersion des données durant les années analysées. La saison d'hiver (Figure 4.21) montre un caractère de décroissance de la majorité des stations étudiées, seule la station 160104 à une tendance croissante, le même comportement était remarqué avec la saison de printemps (Figure 4.22) dans la plupart des stations du bassin versant. En fin, la saison de l'été, vient de faire l'exception, en décrivant une direction positive de la pluviométrie de sept stations (160104, 160401, 160403, 160407, 160502, 160501, 160303), Évidemment, cette augmentation est marquée par une très faible pluviométrie en cette saison, et donc toute augmentation se traduit par une pente plus élevée.

Le changement climatique à un impact très important sur les précipitations dans notre région surtout sur les saisons hiver et printemps, vu que l'hiver est la saison la plus humide dans toutes les régions du bassin. Par conséquent, qu'on on parle de la réduction des précipitations, la pente sera plus forte. Ghenimet al. (2014) ont trouvé un déficit pluviométrique durant la saison humide (hiver et printemps), par l'application de la procédure de segmentation aux séries annuelles, dans le

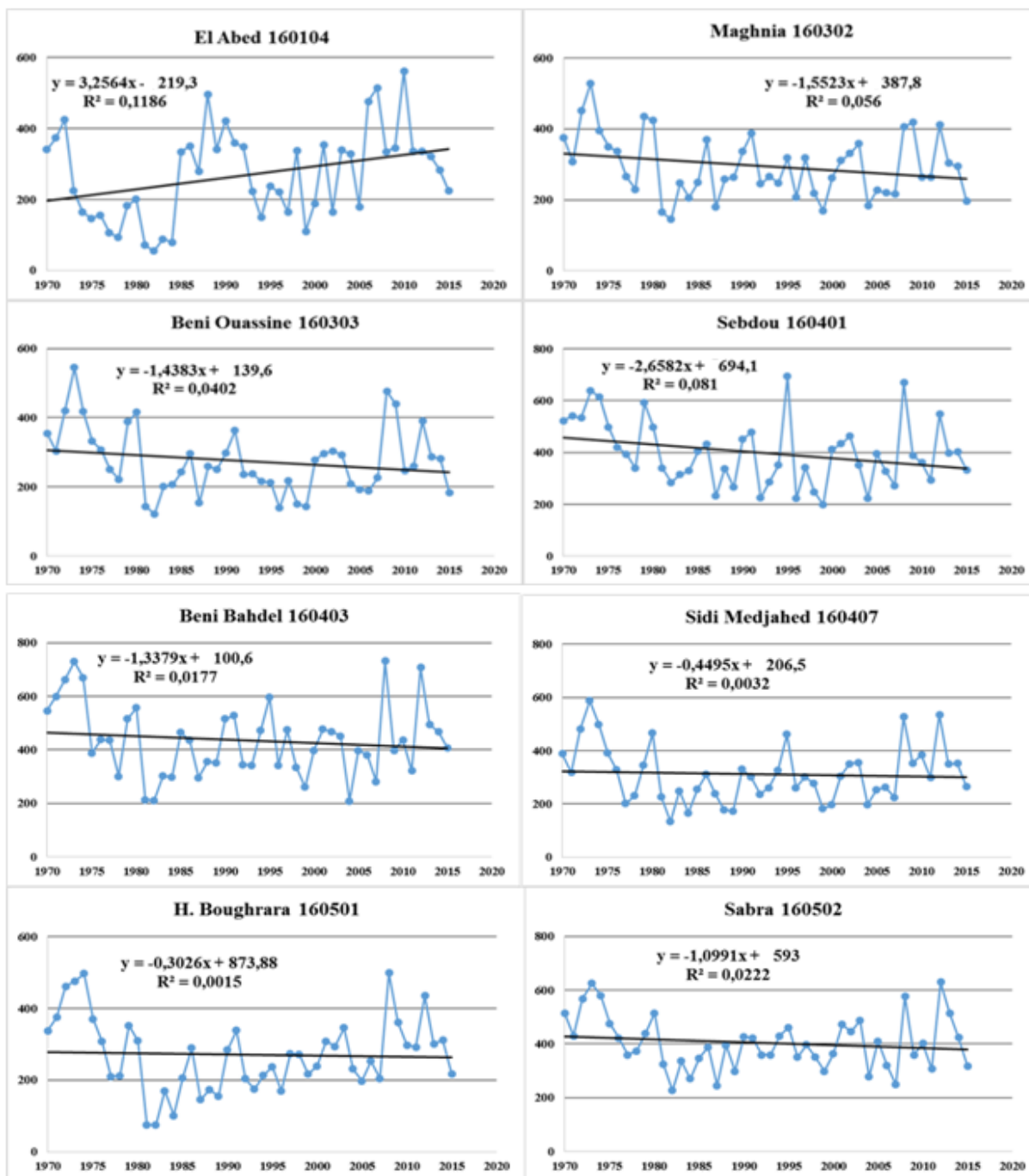
bassin versant la Tafna. Ghenim et al. (2013) ont confirmé qu'il y a un déficit est de 59,3 % pour la saison humide sur le bassin versant Meffrouche, Elouissi (2016) a trouvé les mêmes résultats en utilisant le test statistique r Pearson dans le bassin versant la Macta. Cette diminution de la saison humide est aussi liée par L'oscillation méditerranéenne (OM) et l'oscillation de l'Atlantique Nord (OAN) dans les régions ouest parce qu'elles sont plus proches de l'Atlantique, notamment en ce qui concerne les précipitations en période humide en hiver. Plusieurs études ont montré que les indices OM et OAN influencent la variabilité saisonnière des précipitations dans le bassin méditerranéen, en particulier en hiver (Lopez-Bustins, 2007 ; Salameh, 2008 ; Lopez et al., 2010 ; Meddi, 2009 ; Taibi et al., 2014).

#### 4.2.3.3 Etude de la pluviométrie annuelle

L'une des principales caractéristiques des précipitations dans notre région est leur grande variabilité annuelle. En fait, le total annuel peut varier considérablement d'une année à l'autre. Nous examinons donc de plus près la variabilité annuelle des précipitations dans notre région. Nous étudions à présent la variabilité entre les mois et les saisons. On se demande si la baisse pluviométrique mise en évidence précédemment est due à une saison donnée, ou si elle a touché l'ensemble des mois.

Le principe consiste à cumuler les valeurs des hauteurs des précipitations mensuelles durant la période de notre étude (1970-2015), pour former des séries de pluviométrie annuelle. Le concept d'année hydrologique a été pris en considération. Chaque année cumul les pluies de septembre à aout.

Les courbes des précipitations annuelles sont illustrées ci-dessous. Avec les lignes de tendance et les équations de régression linéaire. On peut distinguer des stations avec des lignes de tendance ascendantes et descendantes (Figure 4.24).



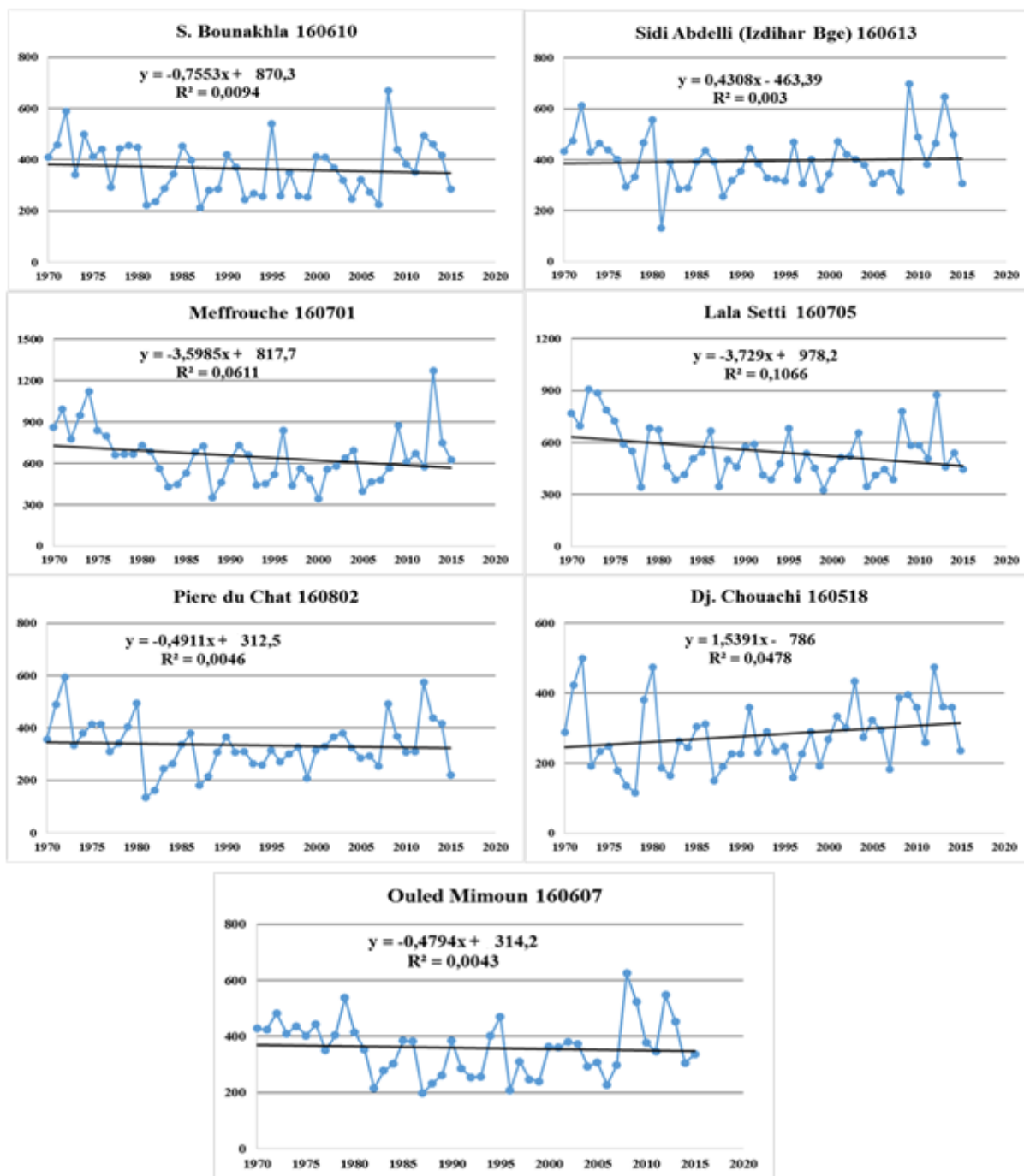


Figure 4.24. Pluviométrie annuelle des stations étudiées

Pour mieux comprendre les résultats de la Figure 4.24, nous avons construit un diagramme qui relie le nombre de station avec les tendances positives et négatives (Figure 4.25).



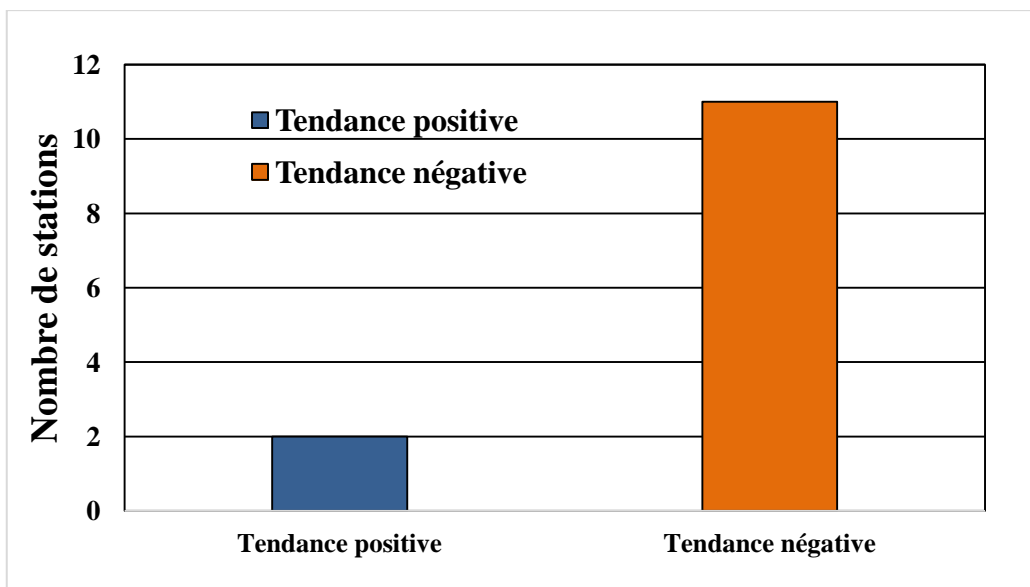


Figure 4.25. Nombre de stations pour chaque type de la tendance annuelle (r de Pearson)

A partir de la Figure 4.25 il très claire que la tendance négative est la plus dominante avec 64.70 % des stations. Sauf deux stations ont été remarquées par une tendance positive. Pour une meilleure interprétation l'analyse spatiale est représentée dans la Figure 4.26

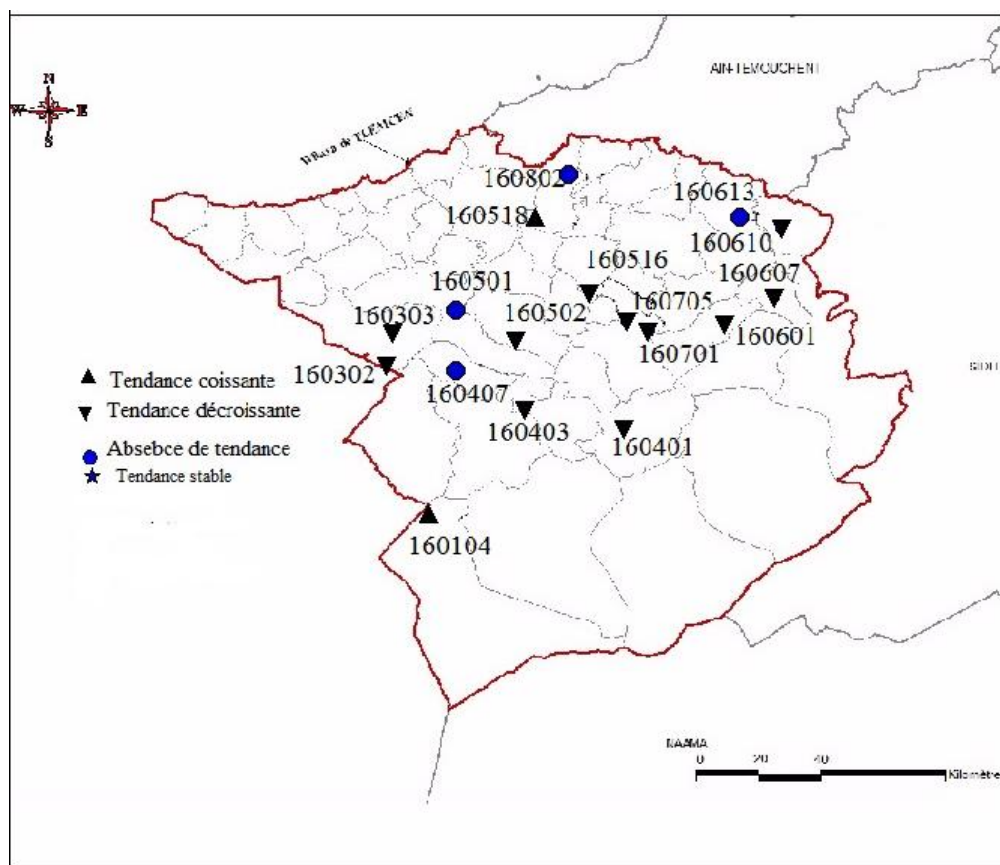


Figure 4.26. Carte de la tendance de la pluviométrie annuelle (r de Pearson).

## Interprétations

L'analyse de la tendance annuelle dans le bassin versant la Tafna pour les 17 stations étudiée est nécessaire et importante dans notre étude. La majorité des stations (11 stations) ont une tendance à la baisse et cela touche toutes les régions. Seulement 2 stations ont une tendance à la hausse (160104, 160518), et finalement les stations 160802, 160613, 160501, 160407 ne montre pas une tendance claire.

Plusieurs études ont confirmé l'existence d'un déficit pluviométrique, Meddi et al. (2010) constatent une tendance à la baisse pour deux stations que nous avons étudiées dans le cadre de cette étude. Ce sont la station de Lalla-Setti et celle de Beni-Bahdel.

Les auteurs qui ont étudié les précipitations en Algérie ont tous souligné que la répartition des précipitations est affectée par plusieurs facteurs tels que le changement climatique, l'altitude, les conditions topographiques, de la longitude et enfin celle de l'éloignement à la mer.

Aussi, Bouanani (2004) indique que la répartition des précipitations en Algérie est soumise aux conditions suivantes :

- la hauteur des précipitations augmente avec l'altitude.
- Elle augmente de l'Ouest à l'Est.
- Elle diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la du littoral.

## 4.3 Etude de la tendance par le test de Kendall

### 4.3.1 Introduction

Ce test est le résultat du développement du test de tendance non paramétrique proposé pour la première fois par Mann (1945). Ce test a été étudié plus profondément par Kendall (1975) et amélioré par Hirsch et al (1982, 1984) qui a permis de prendre en compte une saisonnalité.

### 4.3.2 Méthodologie

Le test non paramétrique de Mann-Kendall est couramment utilisé pour détecter des tendances monotones dans des séries de données environnementales, climatiques ou hydrologiques. L'hypothèse nulle,  $H_0$ , est que les données proviennent d'une population avec des réalisations indépendantes et sont distribuées de manière identique. L'hypothèse alternative,  $H_A$ , est que les données suivent une tendance monotone. La statistique du test de Mann-Kendall est calculée en fonction de :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad \text{IV.3}$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ -1 & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

La statistique  $S$  est étroitement liée au  $\tau$  de Kendall, tel qu'il est présenté :

$$\tau = \frac{S}{D}$$

Où

$$D = \left[ \frac{1}{2} n (n - 1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p t_j (t_j - 1) \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{1}{2} n (n - 1) \right]^{1/2}$$

Lorsque la taille de l'échantillon est assez grande, l'approximation de la statistique  $S$  à la loi normale est utilisée grâce à la transformation suivante (Blain, 2013).

$$Z = \begin{cases} \frac{(S - 1)}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{(S + 1)}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

En présence des valeurs identiques dans la série :

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad \text{IV.4}$$

Où  $p$  est le nombre de groupes liés dans l'ensemble de données et  $t_j$  est le nombre d'égalité en cas des ex-æquo.

### 4.3.3 Résultats et discussion

Après l'illustration de la théorie de ce test, nous allons examiner le comportement en utilisant les données dont nous disposons.

Nous allons appliquer le test à l'échelle mensuelle et saisonnière ainsi qu'à l'échelle annuelle.

#### 4.3.3.1 Etude de la tendance mensuelle

Le test de Kendall a été appliqué aux données de précipitations pour chaque saison et chaque mois. Pour cela nous avons calculé les valeurs de Kendall  $\tau$  et  $Z$  (la normalisation de  $\tau$ ). Nous avons vérifié si l'hypothèse  $H_0$  peut être rejetée (si la valeur de la statistique du test appartient à la région critique). Dans ces cas, la présence de tendances positives et négatives selon le signe de  $Z$  devient évidente. Les résultats de l'application du test de Mann Kendall sont résumés sur les tableaux et l'histogramme ci-dessous :

**Tableau 4.9.** Résultats du test statistique de Mann Kendall appliqué au niveau mensuel à la station 160601

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Tau de Kendall</b>	0,059	0,006	-0,194	-0,19	-0,081	-0,01	0,029	0,003	0,069	0,140	0,053	-0,02
<b>S</b>	61,00	6,000	-200	-200	-84	-14	29	3,000	67	144	55	-25
<b>Var(S)</b>	11150	11149	1115	11152	11154	11154	11061	10051	10657	11137	11153	11153
<b>p-value</b>	0,570	0,962	0,06	0,030	0,432	0,902	0,790	0,984	0,523	0,175	0,609	0,820
<b>Alpha</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

La statistique du test représenté sur le tableau 4.9 pour la station 160601 montre que ces derniers représentent des tendances significatives à la baisse au niveau du seuil de 10% pour les mois de mars.

**Tableau 4.10.** Tendance mensuelle pour chaque station (test de Kendall)

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>160104</b>	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	+	Aucune
<b>160302</b>	Aucune	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160303</b>	Aucune	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160401</b>	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160403</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	+	Aucune	Aucune
<b>160407</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	+	Aucune	Aucune
<b>160501</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune
<b>160502</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160516</b>	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160601</b>	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160610</b>	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160613</b>	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	-	-	-	Aucune	Aucune	+	Aucune
<b>160701</b>	Aucune	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160705</b>	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160802</b>	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160518</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune
<b>160607</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune

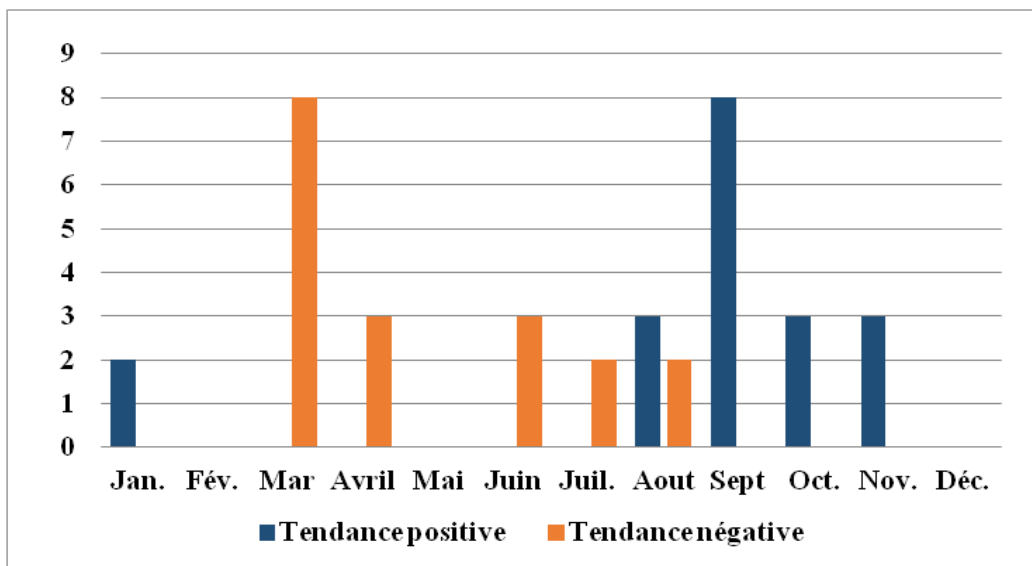


Figure 4.27. Nombre de stations par type de tendance ( $\tau$  de Kendall)

A partir du Tableau 4.9 et de la Figure 4.27 on peut constater que les mois de mars, avril, juin, juillet et aout présentent une tendance à la baisse avec 47.05%, 17.64%, 17.64%, 11.76%, 11.76% respectivement. Tandis que les mois de janvier, aout, septembre, octobre, novembre, indiquent une tendance à la hausse avec 11.76%, 17.64%, 47.05%, 17.64%, 17.64% respectivement.

Les mois de février, mai, décembre ne montrent aucune tendance sur l'ensemble des stations étudiées. Comme toutes les valeurs du Z appartiennent à la zone d'acceptation et donc il n'est pas possible de rejeter l'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de tendance.

Des cartes ont été créées pour mieux visualiser l'emplacement des stations et détecter les tendances spatiales (Figure 4.28 a Figure 4.39).

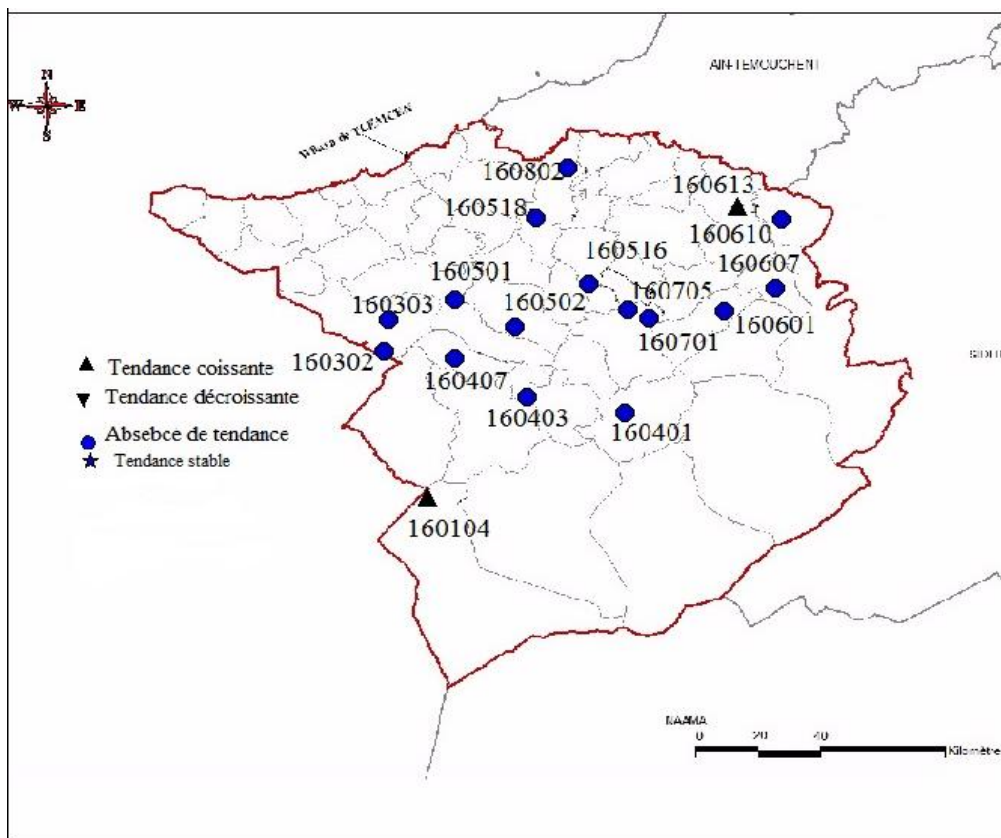


Figure 4.28. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de janvier)

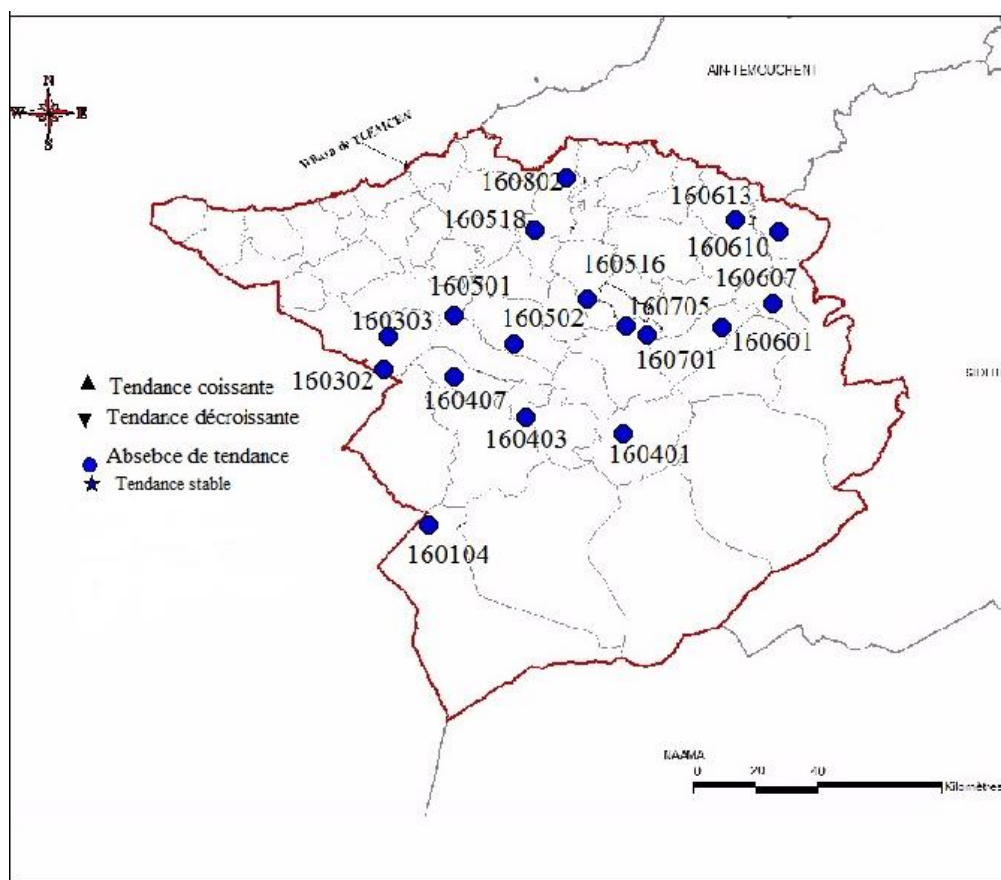


Figure 4.29. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de février)

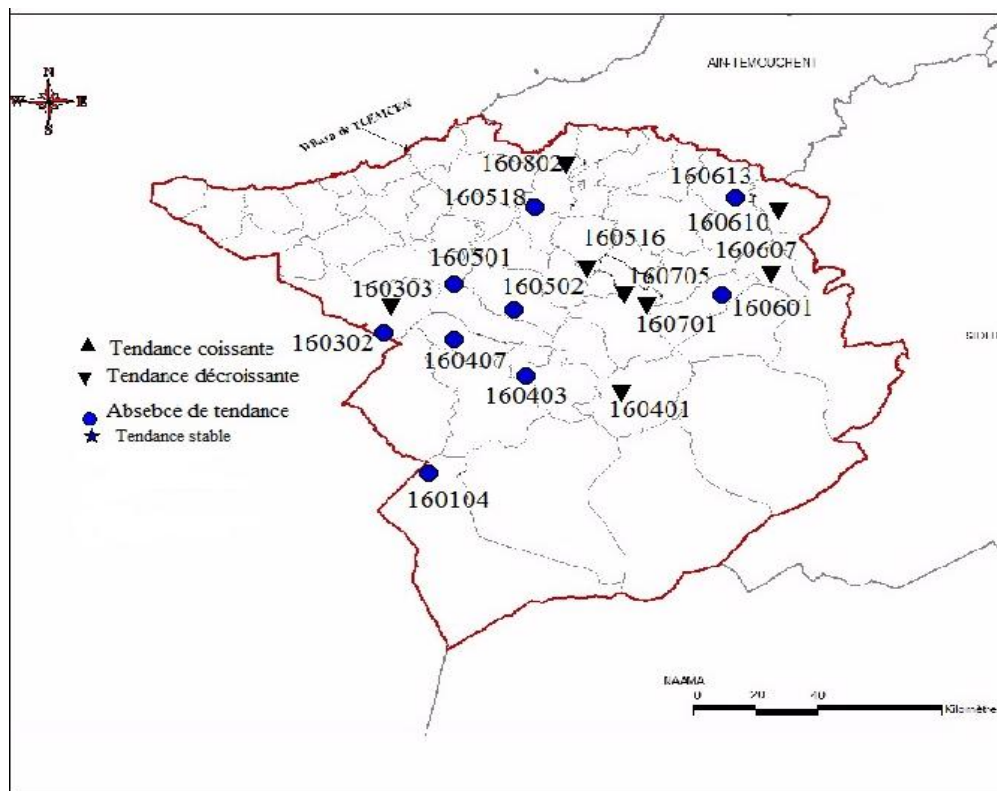


Figure 4.30. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de mars).

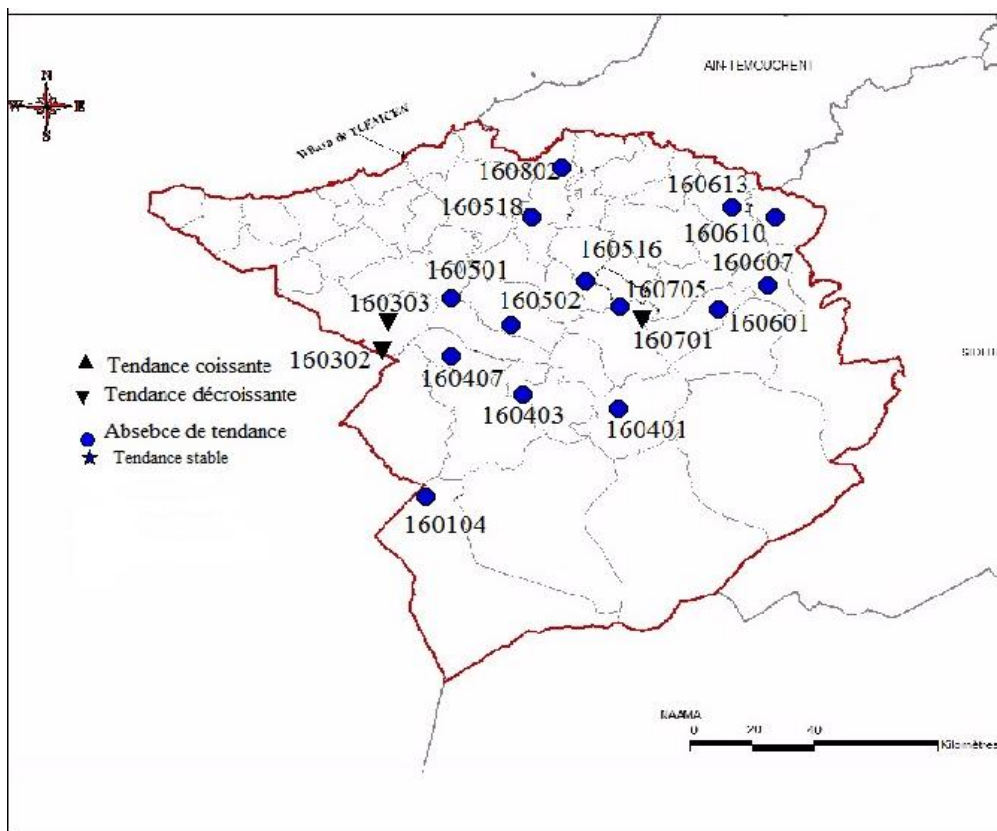


Figure 4.31. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois d'avril)

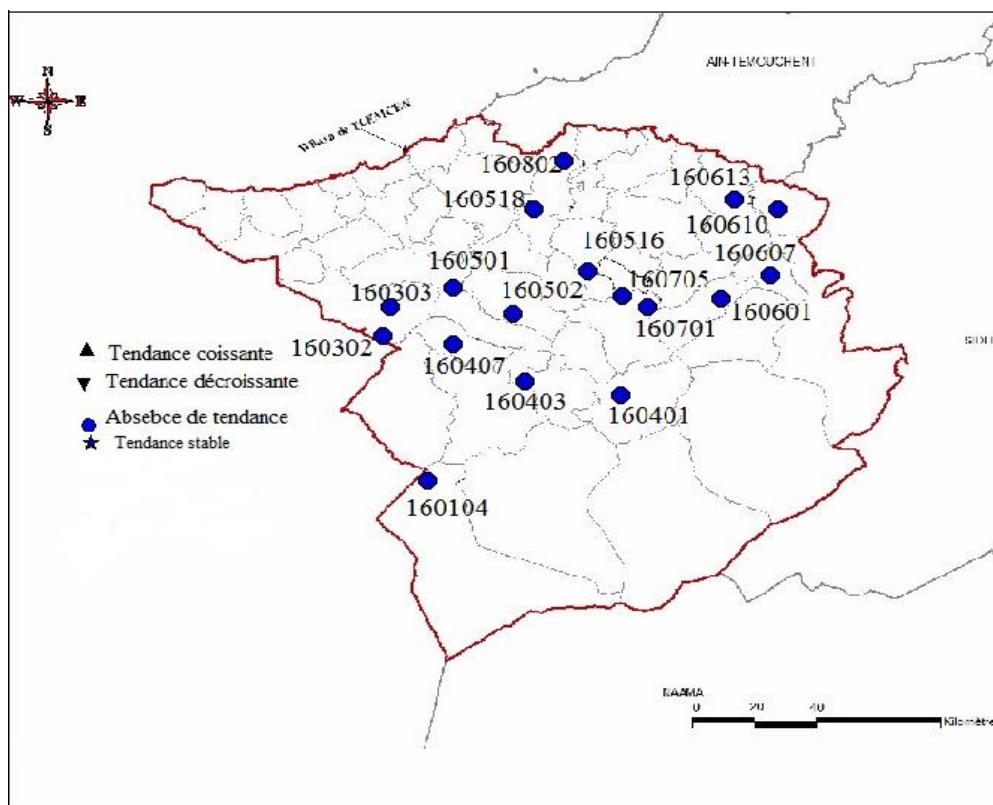


Figure 4.32. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de mai).

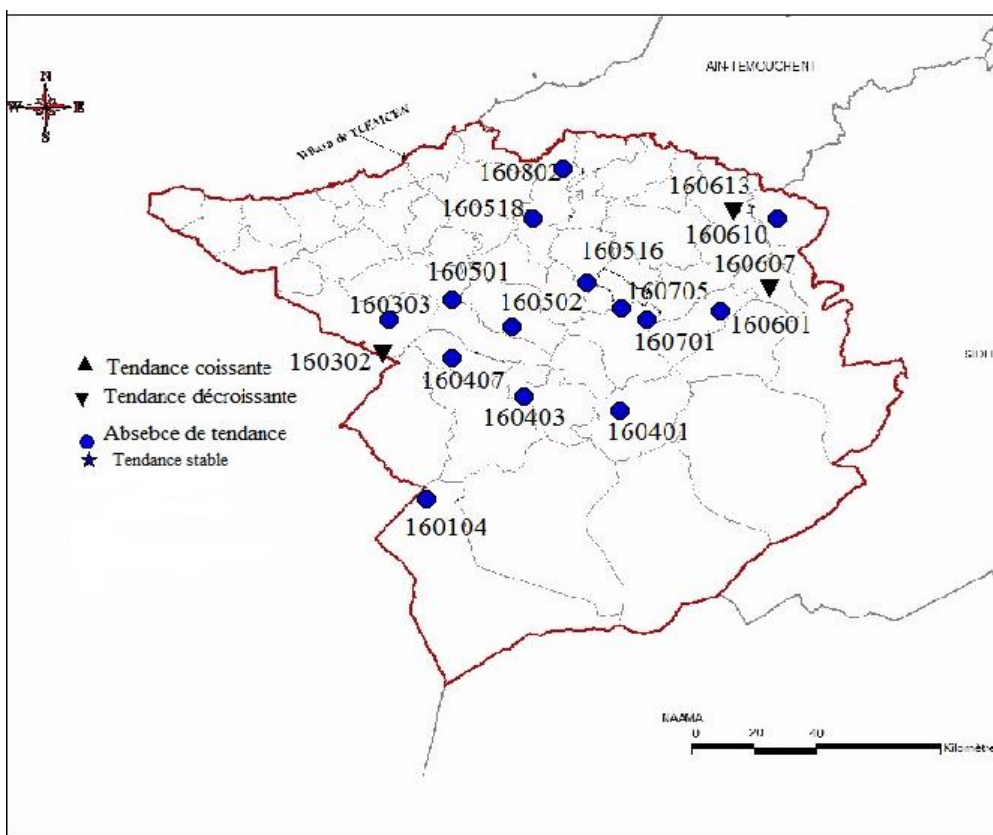


Figure 4.33. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de juin)



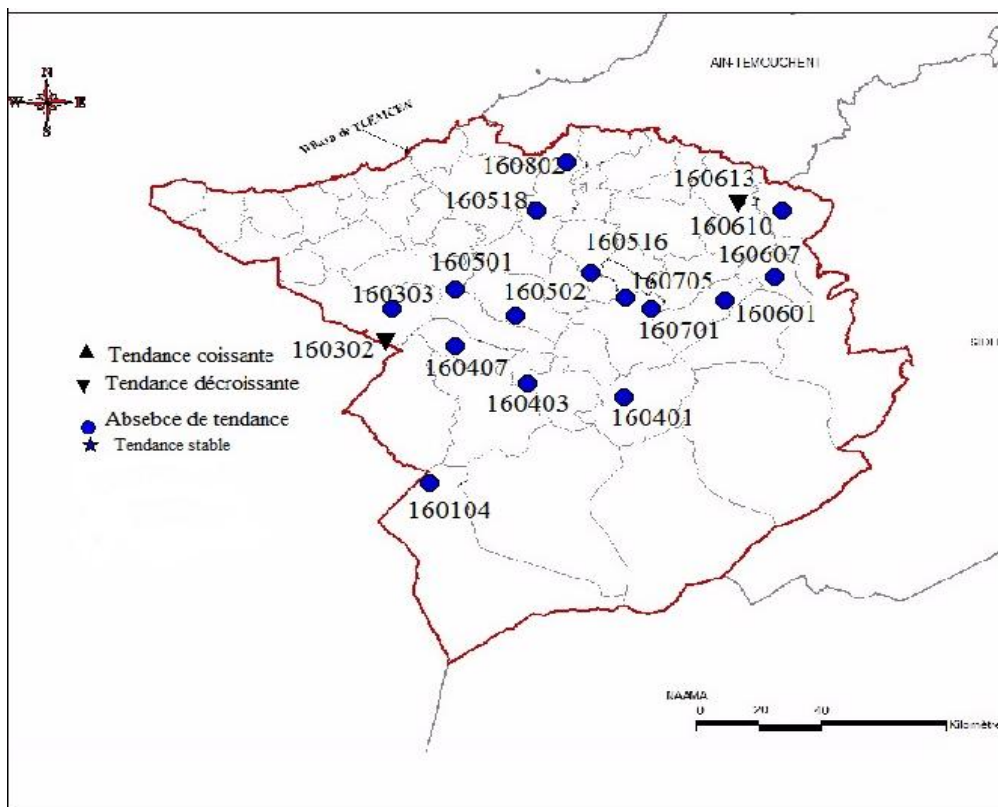


Figure 4.34. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de juillet).

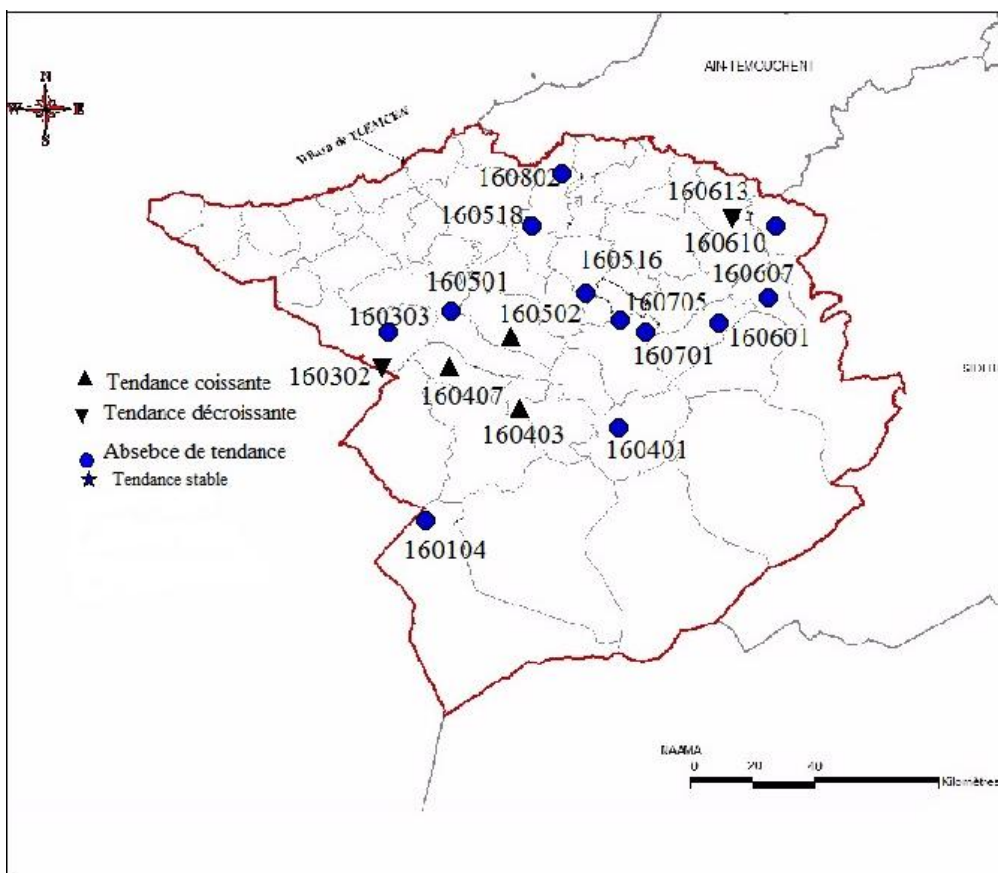


Figure 4.35. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois d'Août)

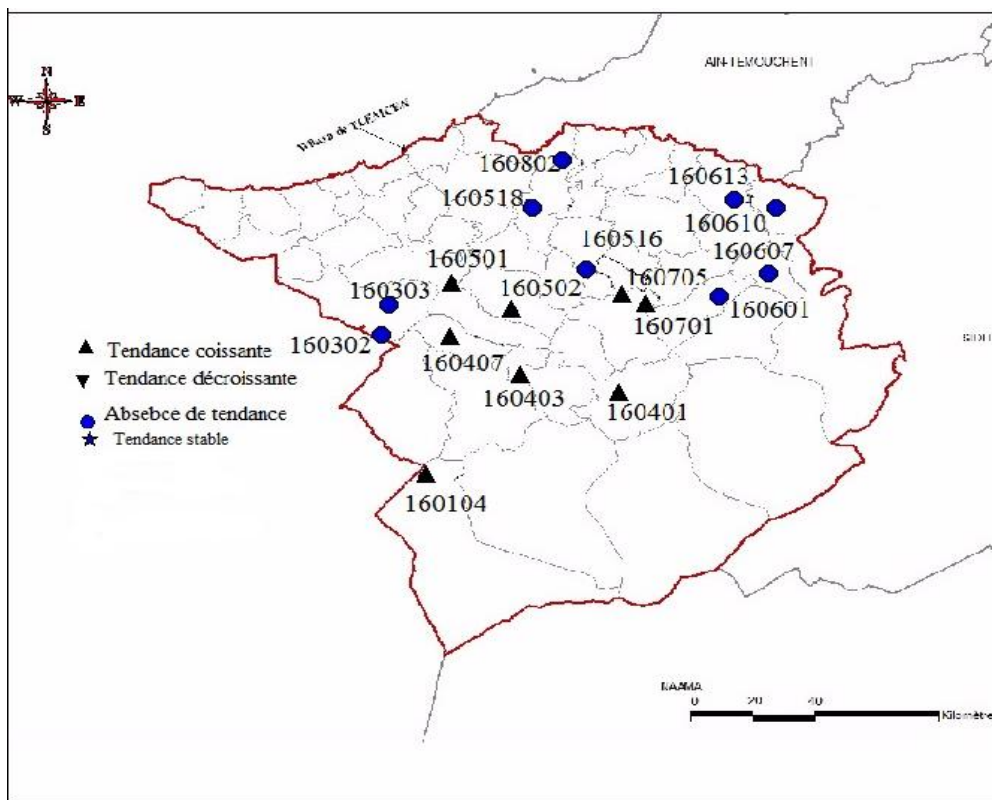


Figure 4.36. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de septembre).

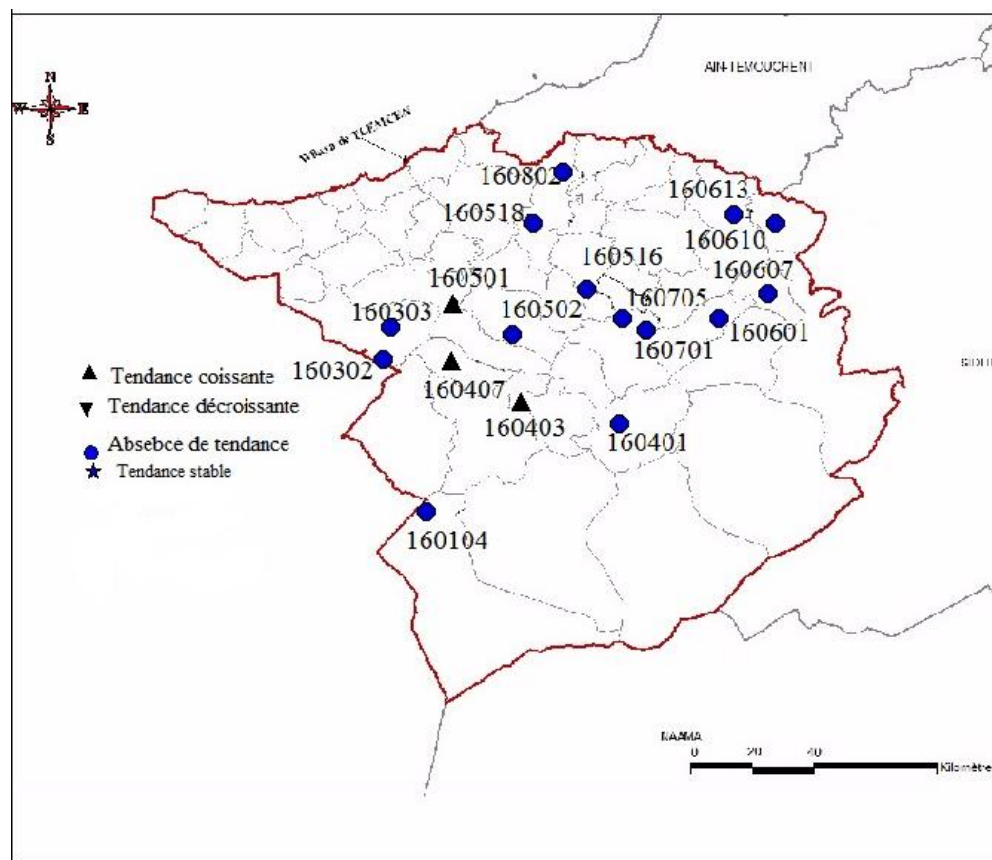


Figure 4.37. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois d'octobre)

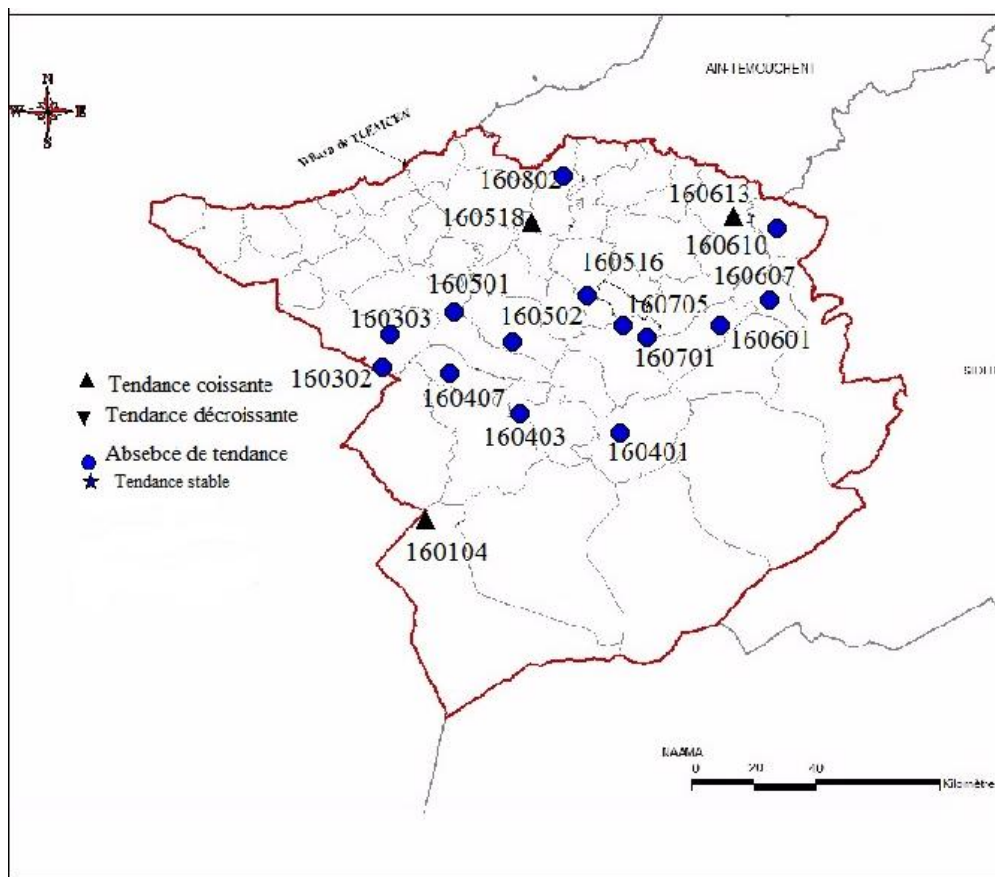


Figure 4.38. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de novembre).

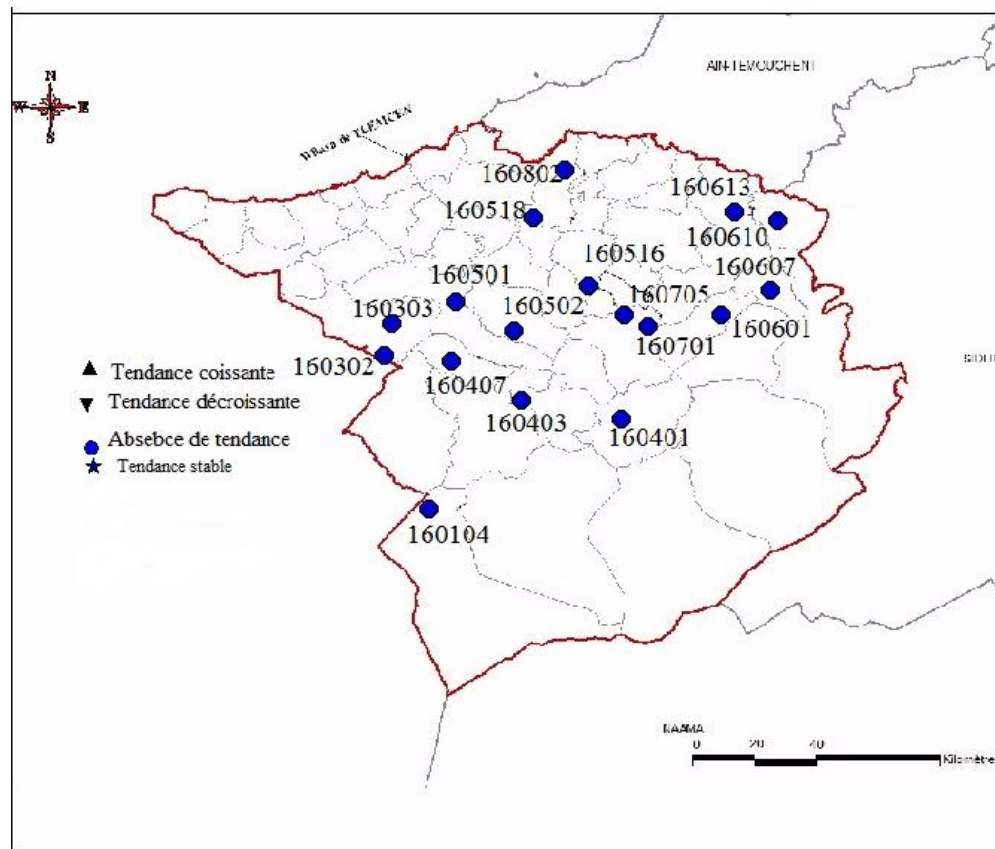


Figure 4.39. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (mois de décembre)

### Interprétation

L'analyse mensuelle des précipitations pour les 17 stations étudiées par le test de Mann-Kendall montre que la tendance à la baisse est marquée dans les mois mars, avril, juin, juillet. Le mois de mars est le mois le plus touché d'après la Figure 4.27 et la Figure 4.24 avec huit stations localisées dans la partie centre-Est du bassin versant la Tafna. Ce déficit pluviométrique persiste et a de graves conséquences économiques et sociales en raison de la pression croissante sur les ressources en eau (eau potable, irrigation, etc.). Cela confirme les résultats obtenus par (Meddi et al., 2000; Khaldi, 2005).

Alors que les mois de janvier, septembre, octobre, novembre présentent une tendance croissante localisée généralement dans la partie ouest du bassin versant (Figure 4.33, Figure 4.34, Figure 4.35).

On peut déduire que la pluviométrie dans le bassin versant la Tafna est caractérisée par une forte irrégularité spatiotemporelle durant la période d'analyse (1970 -2015), elle est influencée par des facteurs géographiques tels que l'altitude et des facteurs géologiques (Khaldi, 2005). L'étude de la tendance saisonnière nous permet de savoir si cette irrégularité spatiotemporelle va influencer sur cette dernière.

#### 4.3.3.2 L'étude de la tendance saisonnière

L'étude de la variabilité saisonnière est essentielle pour voir si la diminution ou l'augmentation des précipitations est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons. Pour cette analyse et de la même manière on va détecter la tendance saisonnière en calculant le  $\tau$  de Kendall, et vérifier par la suite si l'hypothèse  $H_0$  peut être rejetée. Nous avons appliqué un test unilatéral avec un seuil de signification de 0.10. Les résultats sont présentés sur le Tableau 4.10 et Tableau 4.11 et la Figure 4.40.

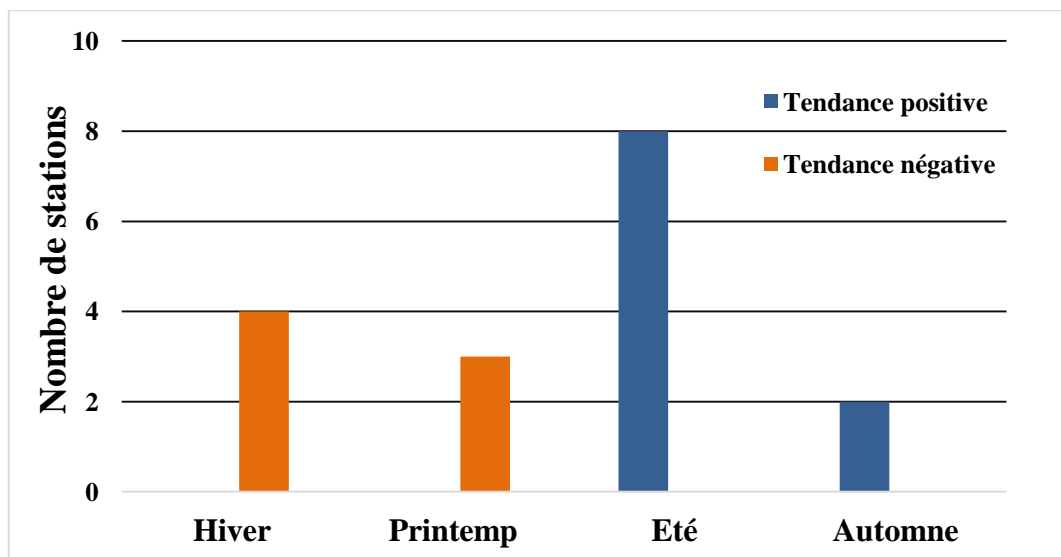
**Tableau 4.11.** Résultats du test statistique de Mann Kendall appliqué au niveau de la saison hiver

	<b>Tau de Kendall</b>	<b>S</b>	<b>Var(S)</b>	<b>p-value</b>	<b>Alpha</b>
<b>160104</b>	0,171	177	11155	0,952	0.1
<b>160302</b>	-0,130	-135	11155	0,102	0.1
<b>160303</b>	0,171	177	11155	0,952	0.1
<b>160401</b>	0,171	177	11155	0,096	0.1
<b>160403</b>	-0,142	-147	11155	0,083	0.1
<b>160407</b>	-0,130	-135	11155	0,205	0.1
<b>160501</b>	-0,142	-147	11155	0,167	0.1
<b>160502</b>	-0,198	-205	11155	0,973	0.1
<b>160516</b>	-0,086	-89	11155	0,405	0.1
<b>160601</b>	0,022	23	11155	0,83	0.1
<b>160610</b>	0,036	37	11155	0,733	0.1
<b>160613</b>	0,036	37	11155	0,733	0.1
<b>160701</b>	- 0,186	-193	11155	0,069	0.1
<b>160705</b>	- 0,186	-193	11155	0,035	0.1
<b>160802</b>	- 0,051	-53	11155	0,622	0.1
<b>160518</b>	0,215	223	11155	0,982	0.1
<b>160607</b>	-0,129	-133	11155	0,211	0.1

La statistique du test représenté sur le tableau 4.11 pour la saison hiver montre que ces derniers représentent des tendances significatives à la baisse au niveau du seuil de 10% dans quatre stations pluviométrique.

**Tableau 4.12** Tendances saisonnières pour chaque station ( $\tau$  de Kendall)

	<b>Hiver</b>	<b>printemps</b>	<b>Eté</b>	<b>Automne</b>
<b>160104</b>	Aucune	Aucune	+	+
<b>160302</b>	Aucune	-	Aucune	+
<b>160303</b>	Aucune	-	+	Aucune
<b>160401</b>	-	Aucune	+	Aucune
<b>160403</b>	-	Aucune	+	Aucune
<b>160407</b>	Aucune	Aucune	+	Aucune
<b>160501</b>	Aucune	Aucune	+	Aucune
<b>160502</b>	Aucune	Aucune	+	Aucune
<b>160516</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160601</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160610</b>	Aucune	Aucune	+	Aucune
<b>160613</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160701</b>	-	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160705</b>	-	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160802</b>	Aucune	-	Aucune	Aucune
<b>160518</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
<b>160607</b>	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune



**Figure 4.40 :** Nombre de stations de la tendance saisonnière ( $\tau$  de Kendall)

Le Tableau 4.10 et la Figure 4.40 traduisent l'évolution des tendances saisonnières pour les 17 stations, et montrent que la saison d'hiver et printemps sont en nette baisse. Donc, on peut conclure que la tendance à la baisse de la pluviométrie est principalement occasionnée par une baisse des pluies du printemps et particulièrement celles de l'hiver. On peut aussi remarquer qu'un nombre élevé de stations ayant une augmentation de la pluviométrie durant la saison de l'été (huit stations).

Afin d'interpréter ces résultats, nous avons également esquissé des cartes sur lesquelles on a porté les résultats obtenus.

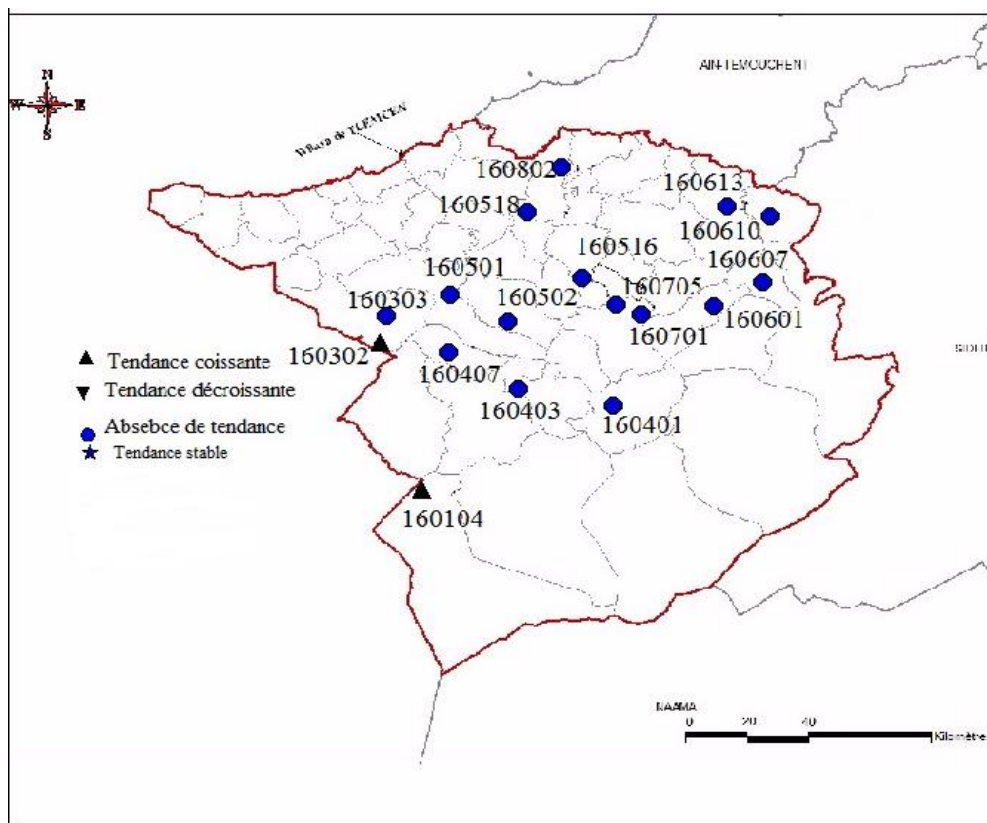


Figure 4.41. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (la saison d'automne).

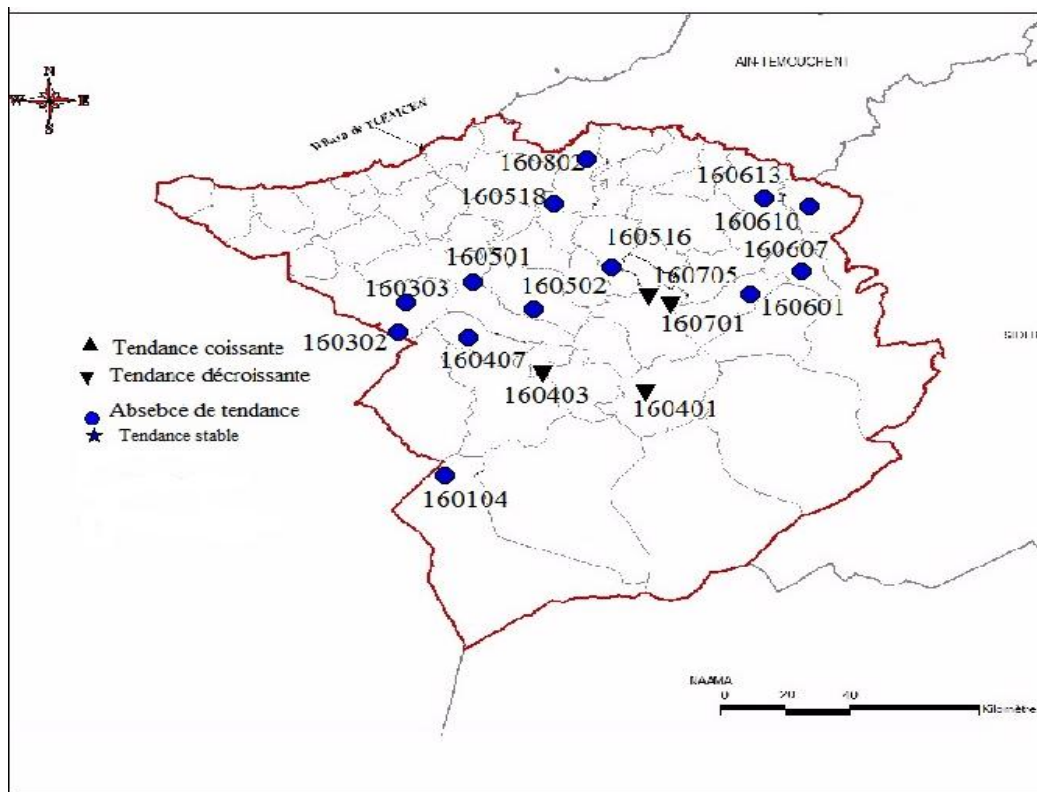


Figure 4.42. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (la saison d'hiver)

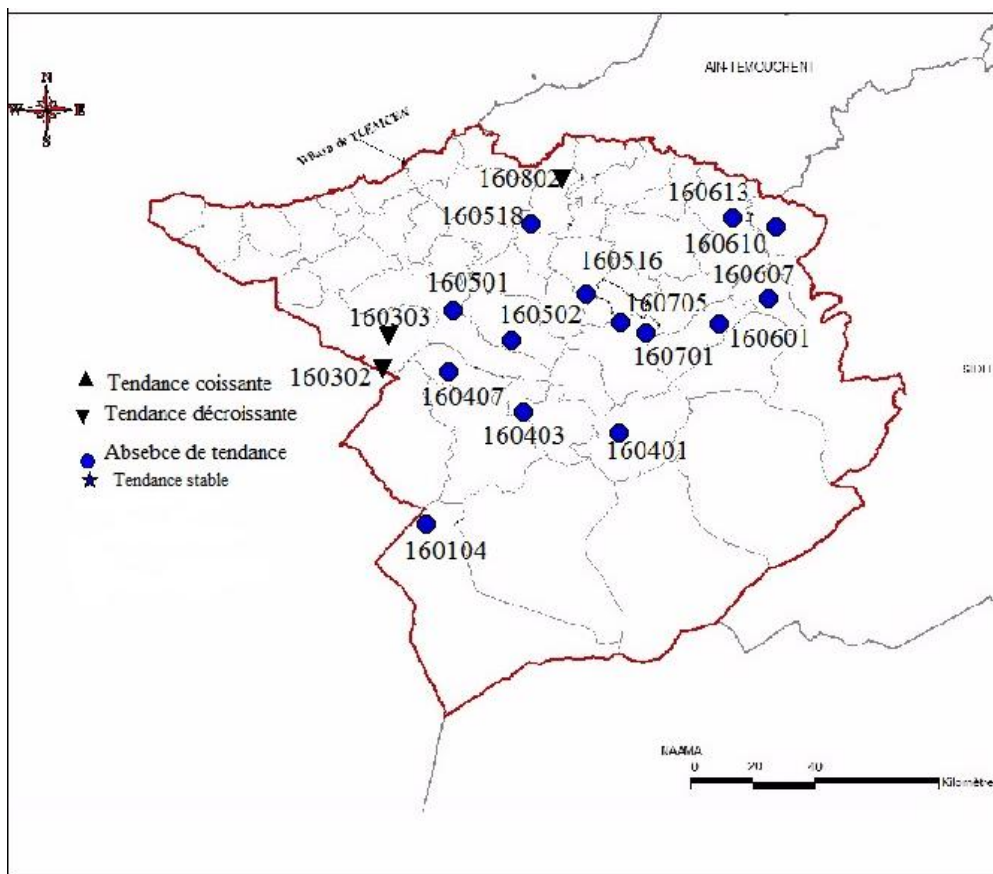


Figure 4.43. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (la saison de printemps)

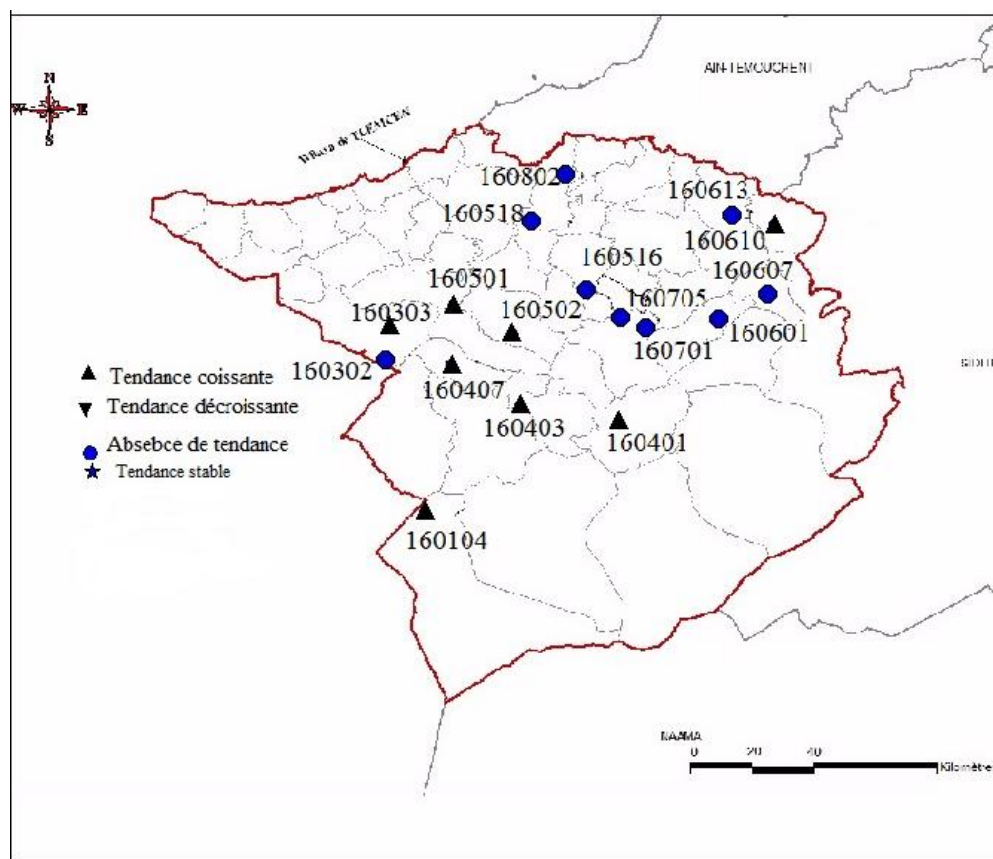


Figure 4.44. Carte de tendance selon le test de Mann-Kendall (la saison d'été).



## Interprétation

L'application de test statistique aux pluies saisonnières, nous a permis de connaître la direction des changements dans les stations étudiées. On peut conclure que la saison d'hiver et de printemps ont enregistré une tendance décroissante (4 stations soit 23.53% ; 3 stations soit 17.65% respectivement). Comme on peut le voir sur la Figure 4.41 et la Figure 4.44, La répartition spatiale montre que cette diminution des précipitations a prévalu au centre du bassin pour la saison hivernale. La saison la plus remarquable est la saison estivale avec une direction positive de la pluviométrie de huit stations (47.05%), répartie dans presque toute la région étudiée, contrairement aux tendances des saisons d'hiver et printemps. La saison d'automne est surtout représentée par l'absence de tendance sur l'ensemble des stations étudiée à l'exception des deux stations 160302, 160104 qui ont une tendance croissante.

L'analyse de la tendance saisonnière sur le test de Mann Kendall est une étape très importante pour mettre en évidence le sens de la variabilité de la pluviométrie saisonnière. La saison d'hiver et printemps ont montré une tendance à la baisse, Ce qui confirme les résultats trouvée par le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson, et l'influence du changement climatique du ces deux saisons dans le bassin versant la Tafna. Ces résultats concordent avec les travaux d'autres chercheurs sur le niveau régional, qui ont signalé un déficit pluviométrique dans la saison humide dans le bassin versant la Tafna (Ghenim et al., 2014 ; Ghenim et al., 2013 ; Meddi, 2009 ; Taibi et al., 2014 ; Khaldi, 2005)

### 4.3.3.3 Etude de la pluviométrie annuelle

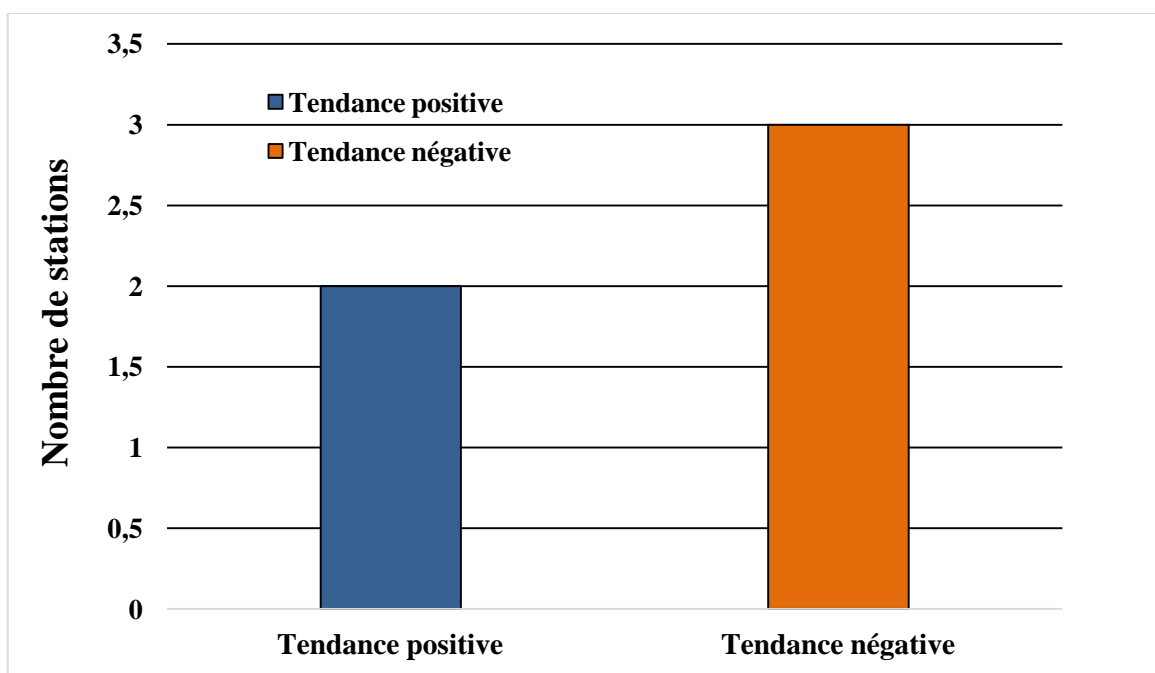
Après avoir étudié la variabilité de la pluviométrie mensuelle et saisonnière, l'étude de la variabilité annuelle des précipitations est essentielle pour les projets de développement agricole et hydrique. Elle est aussi d'une valeur considérable dans l'étude du changement climatique.

En utilisant le test de Mann-Kendall on va déterminer les tendances de la pluviométrie annuelle (test unilatéral avec un seuil de signification 0.10 est appliqué.). Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.13 et la Figure 4.45 et 4.46.

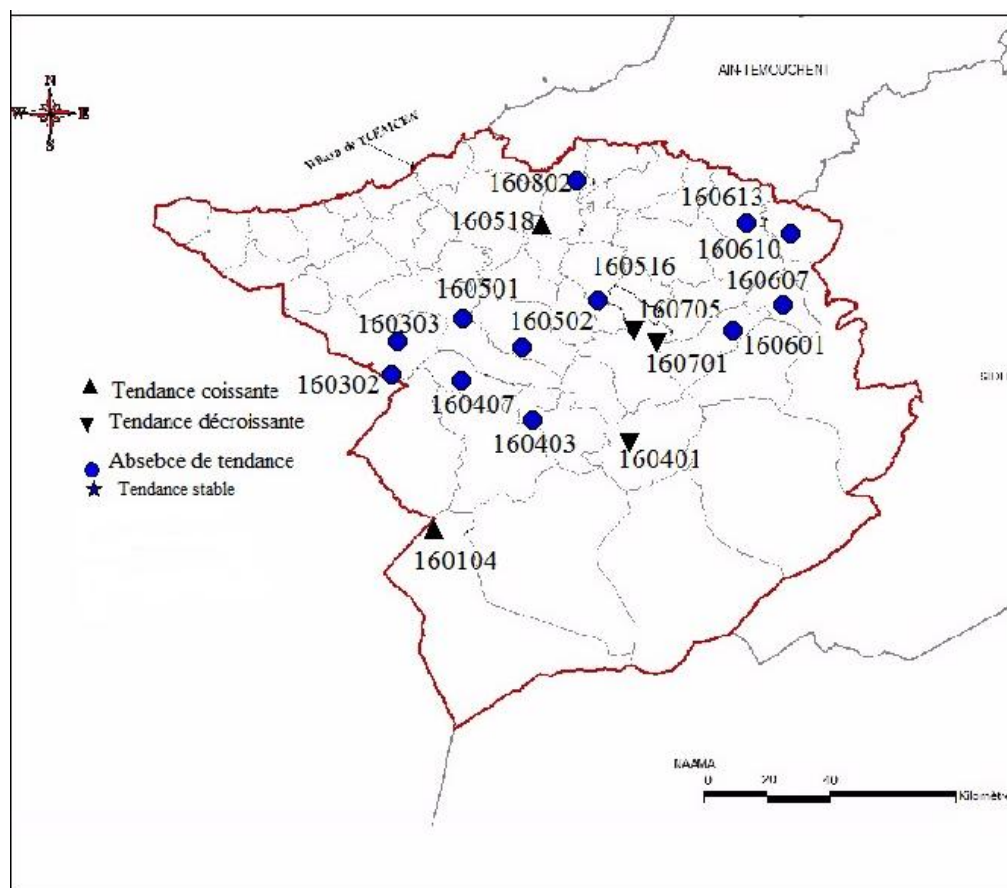
**Tableau 4.13.** Résultats du test statistique de Mann Kendall appliqué au niveau des précipitations annuel

	Tau de Kendall	S	Var(S)	p-value	Alpha
160104	0,124	128,000	11154	0,229	0.1
160302	0,094	97,000	11155	0,363	0.1
160303	-0,025	-26,000	11154	0,813	0.1
160401	0,176	182,000	11154	0,087	0.1
160403	0,073	76,000	11154	0,478	0.1
160407	0,140	145,000	11155	0,173	0.1
160501	0,070	72,000	11149	0,501	0.1
160502	0,056	58,000	11154	0,589	0.1
160516	0,057	59,000	11155	0,583	0.1
160601	-0,063	-65,000	11155	0,545	0.1
160610	0,140	145,000	11153	0,173	0.1
160613	0,165	171,000	11155	0,107	0.1
160701	0,308	319,000	11155	0,003	0.1
160705	0,181	187,000	11155	0,039	0.1
160802	0,074	77,000	11155	0,472	0.1
160518	0,146	151,000	11155	0,156	0.1
160607	0,118	122,000	11154	0,252	0.1

La statistique du test représenté sur le tableau 4.11 représente des tendances significatives à la baisse au niveau du seuil de 10% dans trois stations pluviométrique.



**Figure 4.45.** Nombre de stations pour chaque type de la tendance annuelle ( $\tau$  de Kendall)



**Figure 4.46 :** Carte des tendances annuelles ( $\tau$  de Kendall)

D'après la Figure 4.45 on peut bien remarquer qu'il y a une tendance négative dans 17.64% des stations, et une tendance positive dans 11.76% des stations. La position géographique est présentée sur la figure 4.46.

La majorité des stations sur la carte ne montre aucune tendance (70.58% des stations), sauf 3 stations indique une tendance négative localisé au centre du bassin il s'agit de (160705, 160701, 160401), tandis que deux stations montrent une tendance positive (160518, 160104). Contrairement à la méthode de  $r$  de Pearson, le test de Mann Kendall ne montre pas des résultats claire dans cette partie d'étude.

## **4.4 Etude des tendances par l'Analyse innovante de la tendance de la pluviométrie (The Innovative Trend Analysis ITA)**

### **4.4.1 Méthodologie**

La méthodologie de l'ITA a été proposée par Şen (2012). Le concept de cette méthode est basé sur le fait que si deux séries temporelles sont identiques, leurs points de dispersion se situeront presque le long de la ligne 1:1 ( $45^\circ$ ). La série chronologique hydrométéorologique est d'abord divisée en deux parties égales et disposées séparément en ordre croissant. La première moitié est placée sur l'axe X, tandis que la seconde est placée sur l'axe Y pour obtenir un

diagramme de dispersion. La ligne droite 1:1 (45°) divise le diagramme en deux sections triangulaires égales, où la zone triangulaire la plus élevée (inférieure) est destinée à l'élément de tendance croissante (décroissante). Si les points de dispersion apparaissent sur ou près de la ligne droite 1:1 (45°), cela signifie qu'il n'y a pas de tendance significative dans les enregistrements hydrométéorologiques. Sinon, si les points sont au-dessus (en dessous) de la ligne droite 1:1 (45°), il est possible de confirmer une tendance croissante (décroissante). dans la série chronologique (Dabanli et al., 2016 ; Şen 2012, 2014). Le graphique peut montrer des tendances partielles possibles pour les données de précipitations "faibles", "moyennes" et "élevées" (Öztopal et Şen, 2017) (Figure. 4.47).

Comme la dispersion des points est non paramétrique, le coefficient de corrélation sériel ne devient pas effectif dans cette étude de tendance.

En outre, les moyennes arithmétiques (m1 et m2), les écarts types (s1 et s2) des demi-séries (1970-1992 et 1993-2015) et la pente de tendance (S) sont représentés dans le modèle ITA (Figure.4.47). Cette dernière est calculée à l'aide de l'équation 1 (Elouissi et al., 2016 ; Şen, 2014):

$$S = \frac{(m2 - m1)}{\left(\frac{n}{2}\right)} \quad \text{IV.7}$$

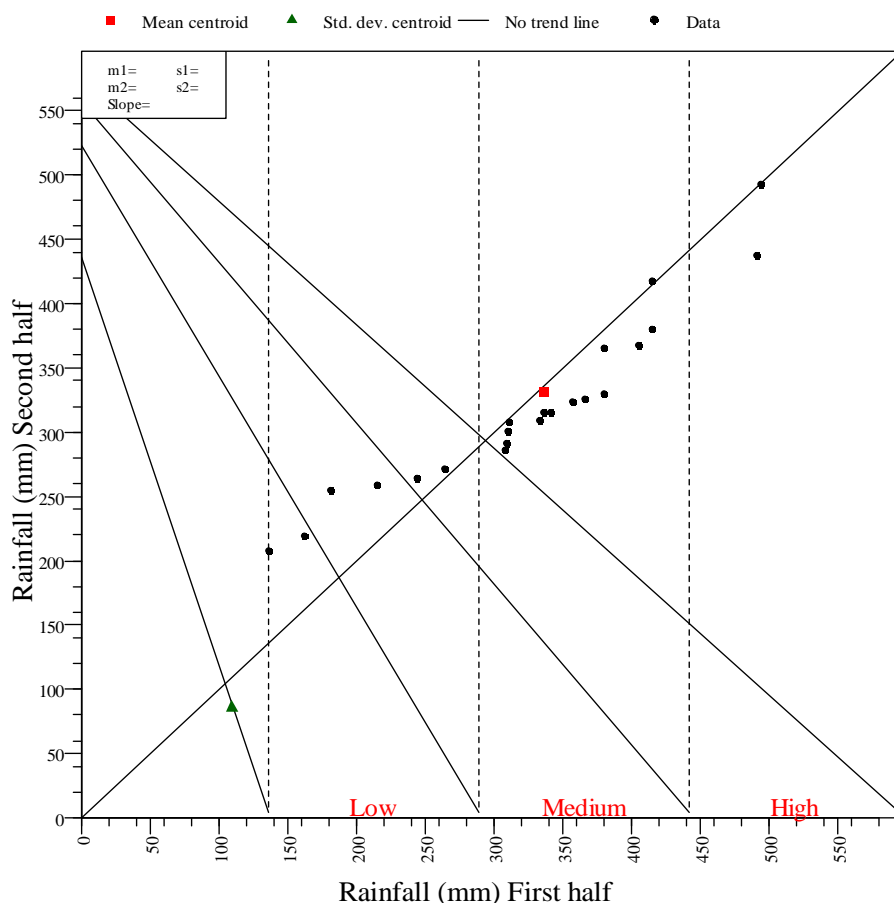


Figure 4.47. Modèle de tendance innovante.

Où  $n$  est le nombre des données.

Par ailleurs, des tableaux offrent une interprétation linguistique où une tendance est attribuée à chaque section (faible, moyenne et élevée). Trois symboles sont utilisés (+, -, 0) indiquant respectivement l'existence d'une tendance croissante, décroissante et aucune tendance. (Elouissi et al., 2016). En outre, la comparaison entre les moyennes arithmétiques (écart-type) des deux moitiés est présentée sur les tableaux sous forme de pourcentage de variation.

#### **4.4.2 Résultats et discussion**

Afin de détecter les tendances des précipitations saisonnières et annuelles, la méthode ITA a été appliquée aux 17 stations pluviométriques du bassin versant de Tafna pendant la période (1970-2015). Les résultats sont présentés dans les Figures 4.48 à 4.52.

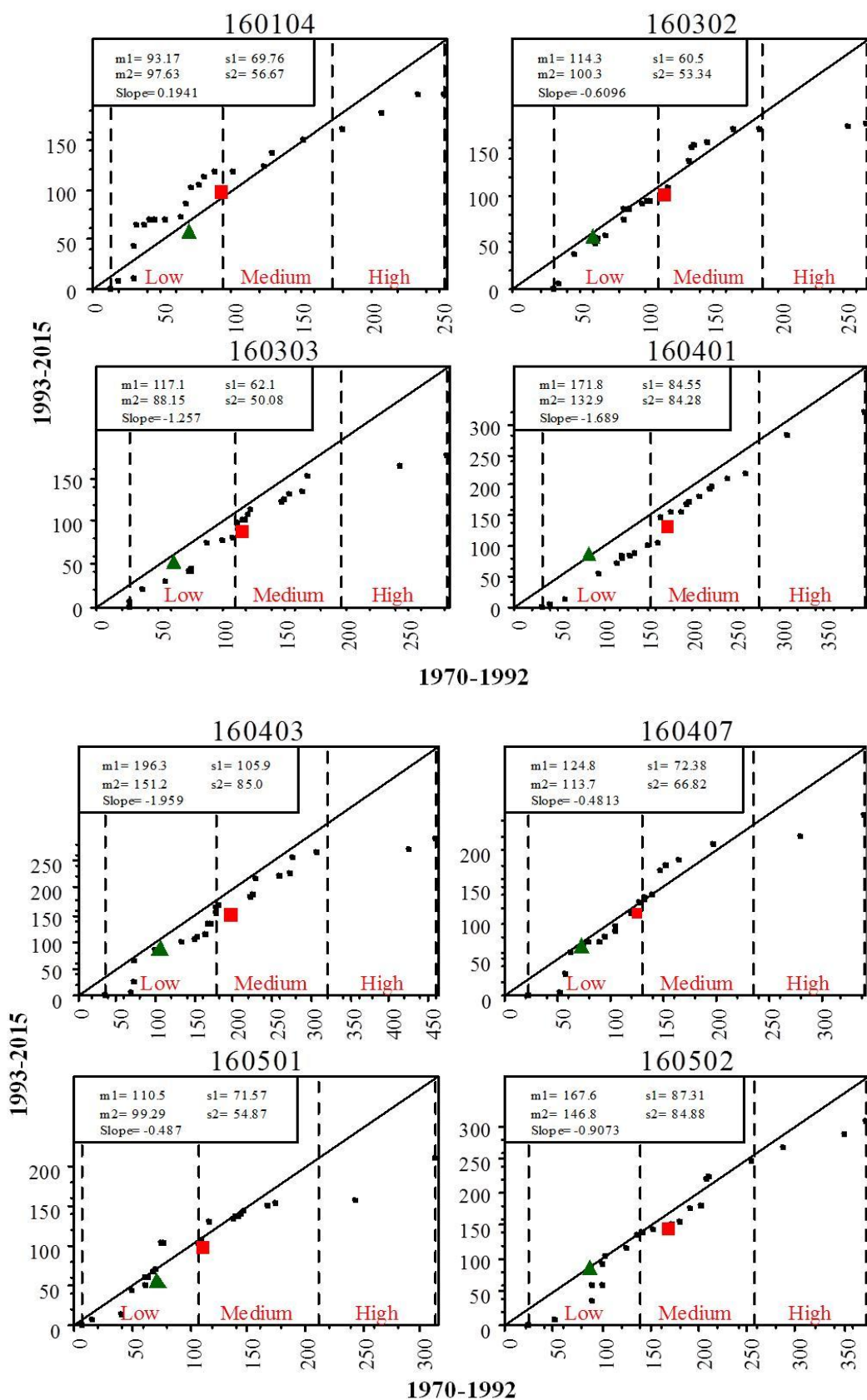


Figure 4.48. Tendence des précipitations d'hiver

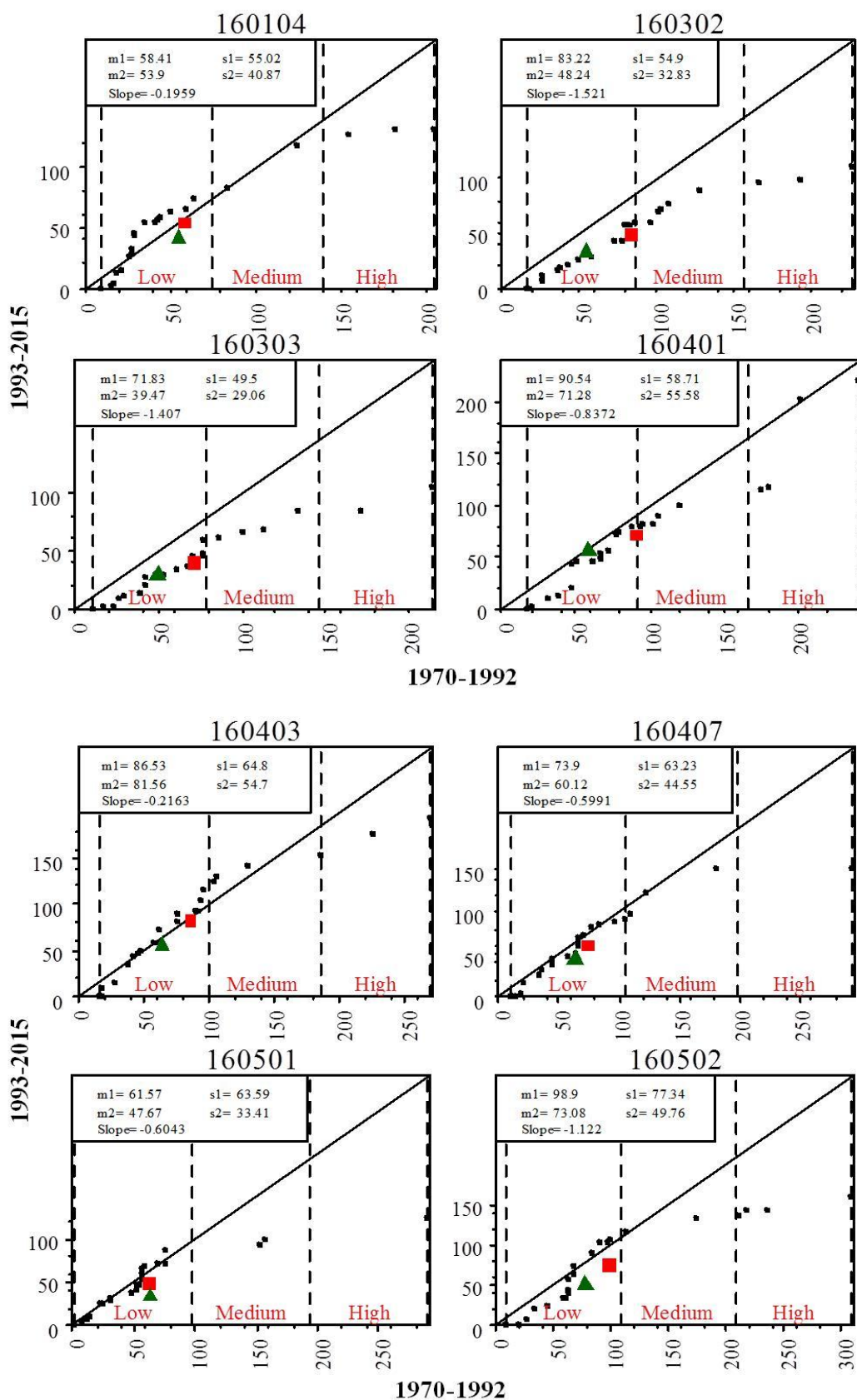


Figure 4.49. Tendence des précipitations de printemps

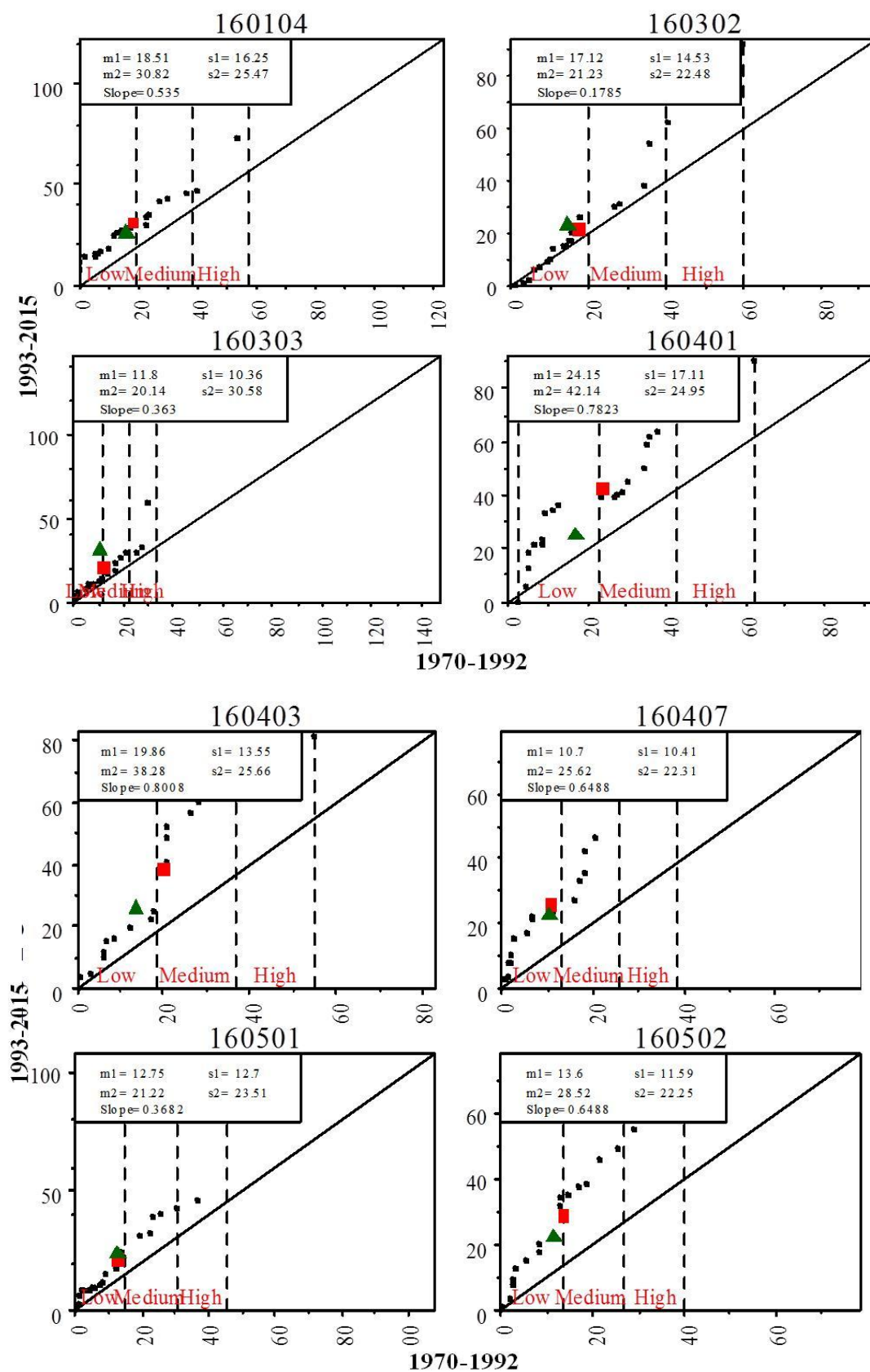


Figure 4.50. Tendence des précipitations d'été



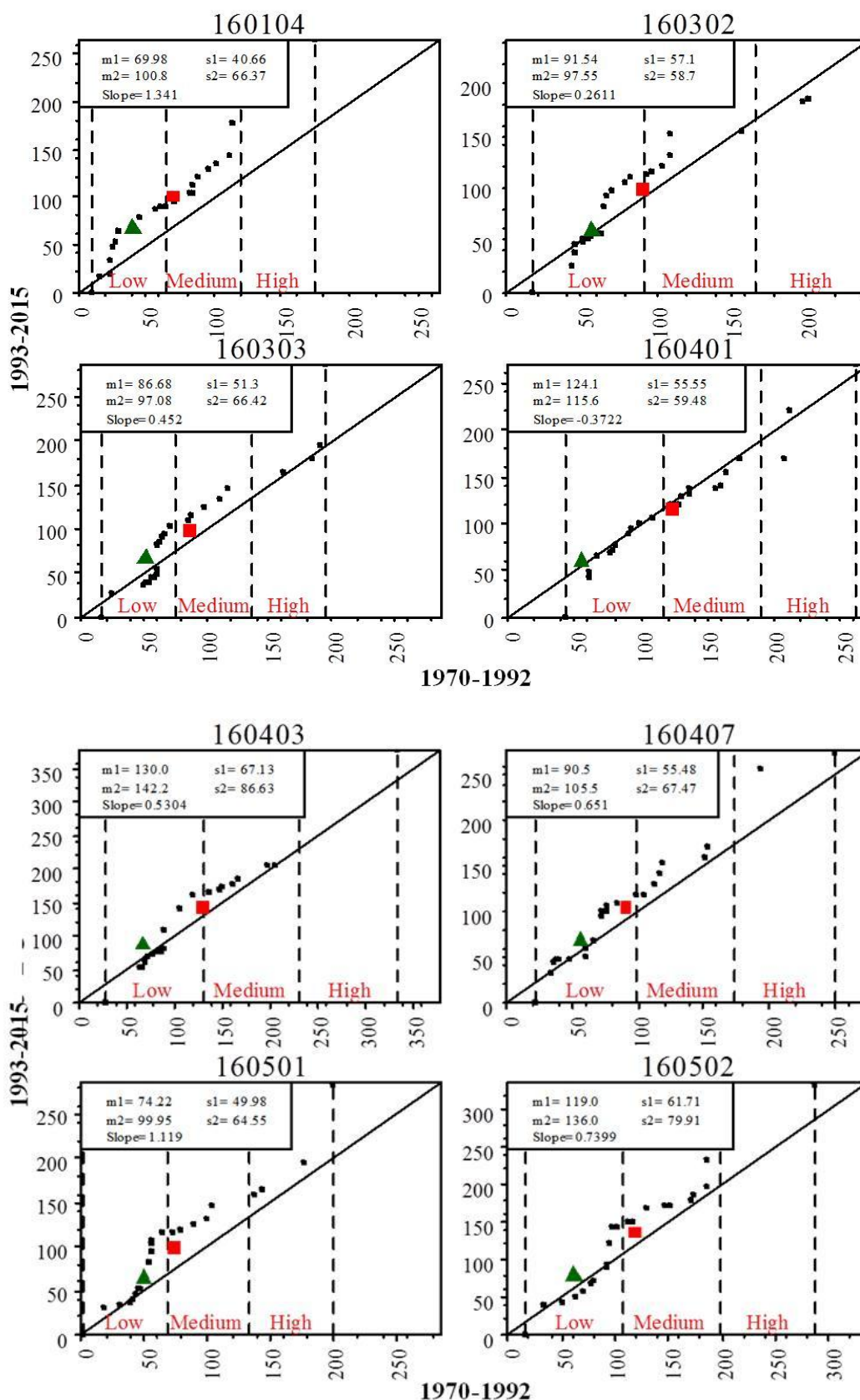


Figure 4.51. Tendence des précipitations d'automne

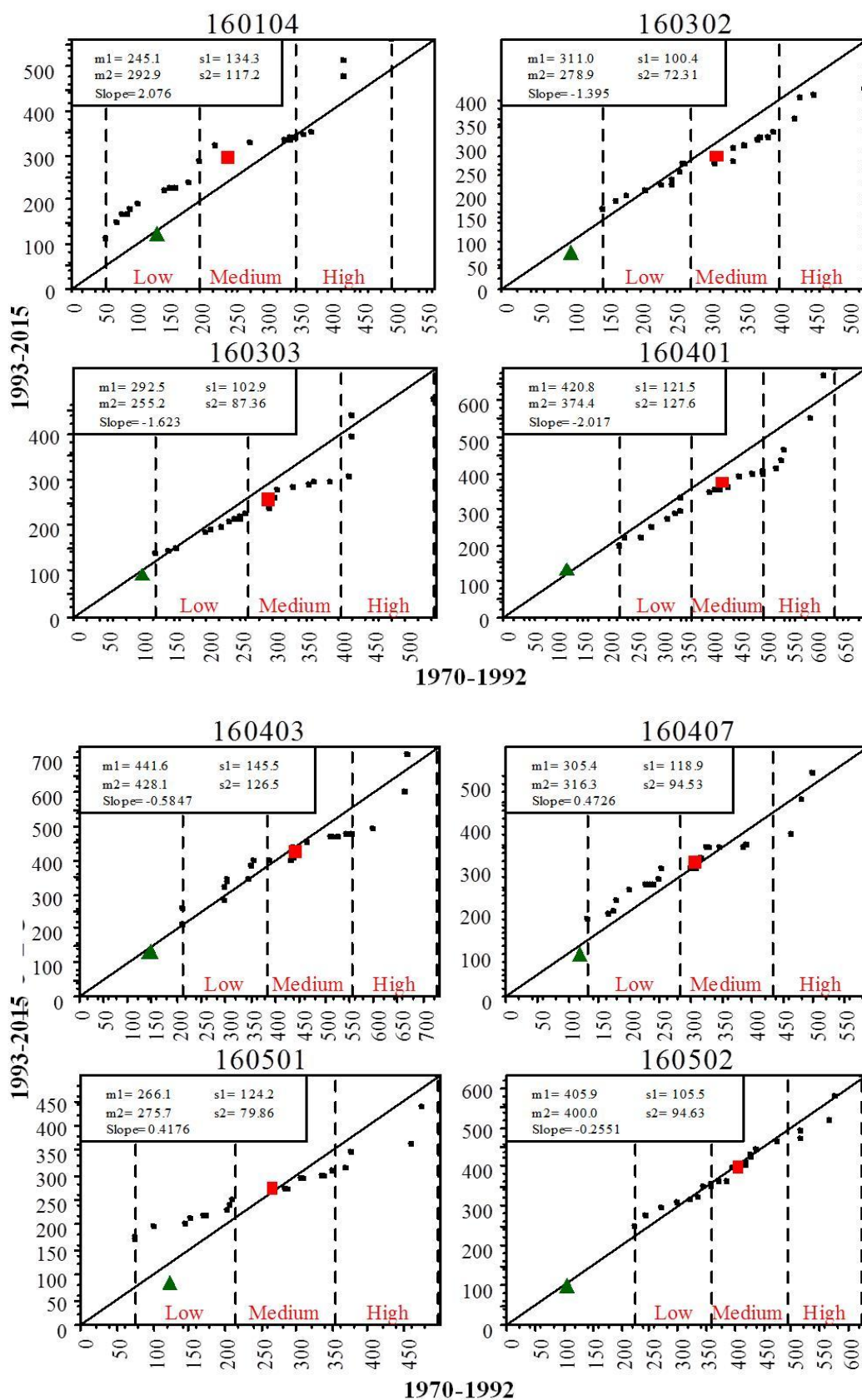


Figure 4.52. Tendence des précipitations annuelle

En examinant les Figures 4.48 à 4.52, les Tableaux 4.11 à 4.15 sont créés. Ceux-ci résument les paramètres de l'ITA (m1, s1, m2, s2 et S). En outre, ils présentent les tendances des précipitations pour chaque station (dernière colonne) et pour chaque catégorie de précipitations (faibles, moyennes et élevées).

**Tableau 4.14.** Paramètres d'analyse des tendances innovantes (la saison d'hiver)

Station	1970-1992		1993-2015		Tendance	Variabilité		Interpretation			
N°	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Pente (-)	Moyenne (%)	Ecart type (%)	Faible	Moyenne	Haute	Tendance de la stations
160104	93,2	69,8	97,6	56,7	0,194	4,72	-18,77	+	+	-	+
160302	114,3	60,5	100,3	53,3	-0,610	-12,25	-11,90	-	+	-	-
160303	117,1	62,1	88,1	50,1	-1,257	-24,77	-19,32	-	-	-	-
160401	171,8	84,5	132,9	84,3	-1,689	-22,64	-0,24	-	-	-	-
160403	196,3	105,9	151,2	85,0	-1,959	-22,98	-19,74	-	-	-	-
160407	124,8	72,4	113,7	66,8	-0,481	-8,89	-7,73	-	+	-	-
160501	110,5	71,6	99,3	54,9	-0,487	-10,14	-23,32	-	-	-	-
160502	167,6	87,3	146,8	84,9	-0,907	-12,41	-2,75	-	-	-	-
160516	175,2	81,1	141,7	78,0	-1,456	-19,12	-3,82	-	-	-	-
160518	112,1	49,5	116,7	64,6	0,201	4,10	30,51	-	+	+	+
160601	185,5	87,8	154,1	78,9	-1,365	-16,93	-10,14	-	-	-	-
160607	141,7	65,2	126,6	72,0	-0,657	-10,66	10,43	-	0	-	-
160610	157,8	68,1	136,1	73,9	-0,945	-13,75	8,52	-	+	-	-
160613	155,0	67,6	153,5	79,2	-0,068	-0,97	17,16	-	+	-	-
160701	294,2	151,2	221,6	126,7	-3,156	-24,68	-16,20	-	-	-	-
160705	232,4	125,1	183,6	100,7	-2,119	-21,00	-19,50	-	-	-	-
160802	135,9	58,4	126,1	66,5	-0,424	-7,21	13,87	-	-	-	-

**Tableau 4.15.** Paramètres d'analyse des tendances innovantes (la saison de printemps)

Station	1970-1992		1993-2015		Tendance	Variabilité		Interpretation			
N°	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Pente (-)	Moyenne (%)	Ecart Type (%)	Faible	Moyenne	Haute	Tendance de la stations
160104	58,4	55,0	53,9	40,9	-0,196	-7,71	-25,64	+	-	-	-
160302	83,2	54,9	48,2	32,8	-1,521	-42,07	-40,26	-	-	-	-
160303	71,8	49,5	39,5	29,1	-1,407	-44,99	-41,21	-	-	-	-
160401	90,5	58,7	71,3	55,6	-0,837	-21,22	-5,28	-	-	-	-
160403	86,5	64,8	81,6	54,7	-0,216	-5,66	-15,59	+	+	-	-
160407	73,9	63,2	60,1	44,6	-0,599	-18,67	-29,43	-	-	-	-
160501	61,6	63,6	47,7	33,4	-0,604	-22,56	-47,48	0	-	-	-
160502	98,9	77,3	73,1	49,8	-1,122	-26,09	-35,58	-	-	-	-
160516	99,0	79,3	75,0	50,4	-1,046	-24,24	-36,44	-	-	-	-
160518	49,0	36,9	45,8	34,0	-0,138	-6,53	-7,86	-	-	-	-
160601	97,0	56,5	94,0	87,6	-0,130	-3,09	55,04	-	-	-	-
160607	84,1	47,6	63,6	36,7	-0,894	-24,38	-22,90	-	-	-	-
160610	76,3	43,8	63,7	42,6	-0,545	-16,51	-2,74	-	-	-	-
160613	82,4	50,3	64,6	39,4	-0,773	-21,60	-21,67	-	-	-	-
160701	158,1	110,6	112,2	73,2	-1,998	-29,03	-33,82	-	-	-	-
160705	137,1	83,7	101,7	63,8	-1,536	-25,82	-23,78	-	-	-	-
160802	70,0	44,5	48,5	33,0	-0,934	-30,71	-25,84	-	-	-	-

**Tableau 4.16.** Paramètres d'analyse des tendances innovantes (la saison d'été)

Station	1970-1992		1993-2015		Tendance	Variabilité		Interpretation			
	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)		Pente (-)	Moyenne (%)	Ecart type (%)	Faible	Moyenne	Haute
160104	18,5	16,3	30,8	25,5	0,535	66,49	56,44	+	+	+	+
160302	17,1	14,5	21,2	22,5	0,179	23,98	55,17	+	+	+	+
160303	11,8	10,4	20,1	30,6	0,363	70,34	194,23	+	+	+	+
160401	24,2	17,1	42,1	25,0	0,782	73,97	46,20	+	+	+	+
160403	19,9	13,6	38,3	25,7	0,801	92,46	88,97	+	+	+	+
160407	10,7	10,4	25,6	22,3	0,649	139,25	114,42	+	+	+	+
160501	12,7	12,7	21,2	23,5	0,368	66,93	85,04	+	+	+	+
160502	13,6	11,6	28,5	22,3	0,649	109,56	92,24	+	+	+	+
160516	20,4	18,0	30,0	25,8	0,417	47,06	43,33	+	+	+	+
160518	15,8	21,5	18,3	16,8	0,108	15,82	-21,86	+	0	-	+
160601	25,1	20,2	33,7	30,0	0,376	34,26	48,51	+	+	+	+
160607	21,8	16,0	33,8	28,8	0,523	55,05	80,00	+	+	+	+
160610	18,7	20,5	26,2	19,3	0,325	40,11	-5,85	+	+	-	+
160613	23,4	19,3	26,2	23,7	0,122	11,97	22,80	+	+	+	+
160701	27,6	26,7	34,0	24,2	0,278	23,19	-9,36	+	+	-	+
160705	27,1	30,5	32,8	22,3	0,248	21,03	-26,89	+	-	-	+
160802	15,2	23,1	18,9	18,4	0,160	24,34	-20,35	+	+	-	+

**Tableau 4.17.** Paramètres d'analyse des tendances innovantes (la saison d'automne)

Station	1970-1992		1993-2015		Tendance	Variabilité		Interpretation			
	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)		Pente (-)	Moyenne (%)	Ecart type (%)	Faible	Moyenne	Haute
160104	70,0	40,7	100,8	66,4	1,341	44,00	63,14	+	+	+	+
160302	91,5	57,1	97,5	58,7	0,261	6,56	2,80	+	+	-	+
160303	86,7	51,3	97,1	66,4	0,452	12,00	29,43	+	+	0	+
160401	124,1	55,6	115,6	59,5	-0,370	-6,85	7,01	-	-	+	-
160403	130,0	67,1	142,2	86,6	0,53	9,38	29,06	0	+	+	+
160407	90,5	55,5	105,5	67,5	0,651	16,57	21,62	+	+	+	+
160501	74,2	50,0	100,0	64,5	1,119	34,77	29,00	+	+	+	+
160502	119,0	61,7	136,0	79,9	0,740	14,29	29,50	-	+	+	+
160516	119,8	56,9	138,7	68,3	0,822	15,78	20,04	-	+	+	+
160518	85,2	57,0	106,0	67,2	0,905	24,41	17,89	+	+	+	+
160601	134,2	55,0	139,4	74,8	0,224	3,87	36,00	-	+	-	+
160607	104,2	47,4	123,8	67,3	0,850	18,81	41,98	+	+	+	+
160610	112,4	52,5	121,6	65,7	0,396	8,19	25,14	+	+	+	+
160613	124,5	59,5	141,5	73,7	0,739	13,65	23,87	+	+	+	+
160701	195,5	77,5	214,8	129,6	0,839	9,87	67,23	-	+	+	+
160705	172,9	74,3	175,1	96,6	0,093	1,27	30,01	-	+	+	+
160802	111,8	53,8	126,3	72,4	0,630	12,97	34,57	-	+	+	+

**Tableau 4.18.** Paramètres innovants de l'analyse des tendances (précipitations annuelles)

Station	1970-1992		1993-2015		Tendance	Variabilité		Interpretation			
	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)		Pente (-)	Moyenne (%)	Ecart type (%)	Faible	Moyenne	Haute
160104	245,1	134,3	292,9	117,2	2,076	19,50	-12,73	+	+	+	+
160302	311,0	100,4	278,9	72,3	-1,395	-10,32	-27,99	0	-	-	-
160303	292,5	102,9	255,2	87,4	-1,623	-12,75	-15,06	-	-	-	-
160401	420,8	121,5	374,4	127,6	-2,017	-11,03	5,02	-	-	-	-
160403	441,6	145,5	428,1	126,5	-0,585	-3,06	-13,06	+	-	-	-
160407	305,4	118,9	316,3	94,5	0,473	3,57	-20,52	+	0	-	+
160501	266,1	124,2	275,7	79,9	0,418	3,61	-35,67	+	-	-	+
160502	405,9	105,5	400,0	94,6	-0,255	-1,45	-10,33	+	0	-	-
160516	423,9	114,0	398,3	92,2	-1,113	-6,04	-19,12	+	-	-	-
160518	262,0	105,0	299,3	80,6	1,624	14,24	-23,24	+	+	-	+
160601	449,0	117,1	436,6	151,1	-0,540	-2,76	29,04	+	+	-	-
160607	359,3	90,1	358,9	107,0	-0,019	-0,11	18,76	0	-	+	-
160610	371,4	100,0	359,2	110,9	-0,531	-3,28	10,90	-	-	+	-
160613	389,9	102,5	400,0	109,6	0,441	2,59	6,93	+	-	+	+
160701	693,5	186,2	601,9	197,5	-3,985	-13,21	6,07	-	-	-	-
160705	586,1	163,2	510,0	135,8	-3,310	-12,98	-16,79	-	-	-	-
160802	336,8	109,5	331,2	85,8	-0,241	-1,66	-21,64	+	-	-	-

Les fréquences des tendances pour chaque catégorie de précipitations sont présentées dans le tableau 4.16.

**Tableau 4.19.** Fréquences des tendances par catégorie de précipitations

		Aucune Tendance	Croissante	Décroissante
Hiver	Faible	0	1	16
	Moyenne	1	6	10
	Haute	0	1	16
Printemps	Faible	1	2	14
	Moyenne	0	1	16
	Haute	0	0	17
Eté	Faible	0	17	0
	Moyenne	1	15	1
	Haute	0	12	5
Automne	Faible	1	9	7
	Moyenne	0	16	1
	Haute	1	14	2
Annuel	Faible	2	9	5
	Moyenne	2	3	11
	Haute	0	4	12

#### 4.4.2.1 Tendances saisonnières

Les Tableaux 4.11 à 4.14 résument les tendances des précipitations pour chaque saison détectées par l'ITA. Les précipitations d'hiver (Tableau 4.11) sont dominées par des tendances négatives, Seules deux stations 160104 (au sud du bassin) et 160518 (au nord du bassin) présentent une tendance croissante significative (12%), Les catégories de pluies faibles et élevées sont les plus touchées par cette diminution (38% chacune), tandis que les catégories moyennes

représentent 24% (Tableau 4.16). Les précipitations de printemps (Tableau 4.12) mettent en évidence une tendance décroissante pour toutes les stations (100%), Elle touche respectivement 30 %, 34 % et 36 % des valeurs faibles, moyennes et élevées (Tableau 4.16). Les tendances des précipitations de l'hiver et du printemps sont similaires aux résultats des précipitations annuelles en raison de la concentration des précipitations au cours de ces saisons, Pour l'été toutes les stations ont montré une tendance croissante (100%) (Tableau 4.13), Les valeurs faibles et moyennes sont les plus touchées (39% et 34%) tandis que les catégories élevées présentent 27% (Tableau 4.16), Les pluies d'automne (Tableau 4.14) confirment la tendance croissante de la saison précédente (été), 94% des stations affichent cette propriété, Une seule station (160401 située au sud-est du bassin) a montré une tendance décroissante, Cette croissance est surtout visible dans les valeurs moyennes (41%), élevées (36%) et faibles (23%) (Tableau 4.16), Les résultats trouvés convergent parfaitement avec ceux de Goubanova et al., 2007, dans le bassin méditerranéen,

La Figure 4.53 présente une comparaison des tendances saisonnières des précipitations de Tafna, Elle souligne que les deux saisons (hiver et printemps) ont des tendances négatives, tandis que les autres (été et automne) montrent une tendance à la hausse, Ces résultats sont parfaitement cohérents avec les travaux de Elouissi et al., 2016, sur le bassin versant de la Macta, bassin versant sous-jacent de la Tafna.

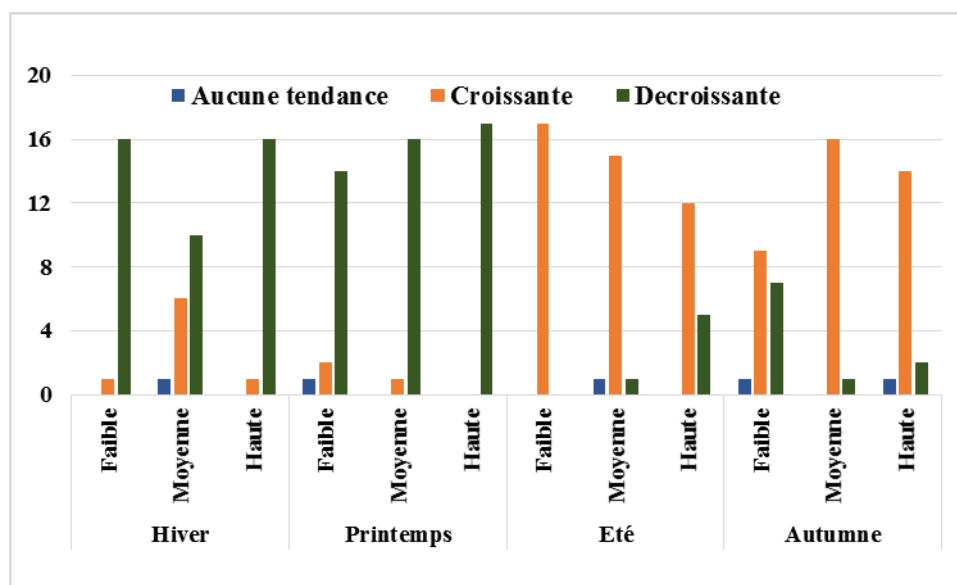


Figure 4.53. Fréquences des tendances saisonnières des précipitations

Une comparaison entre les moyennes arithmétiques des deux moitiés montre que la majorité des stations sont dans la zone décroissante en hiver et au printemps, alors que la situation est inversée en été et en automne (Figure 4.54).

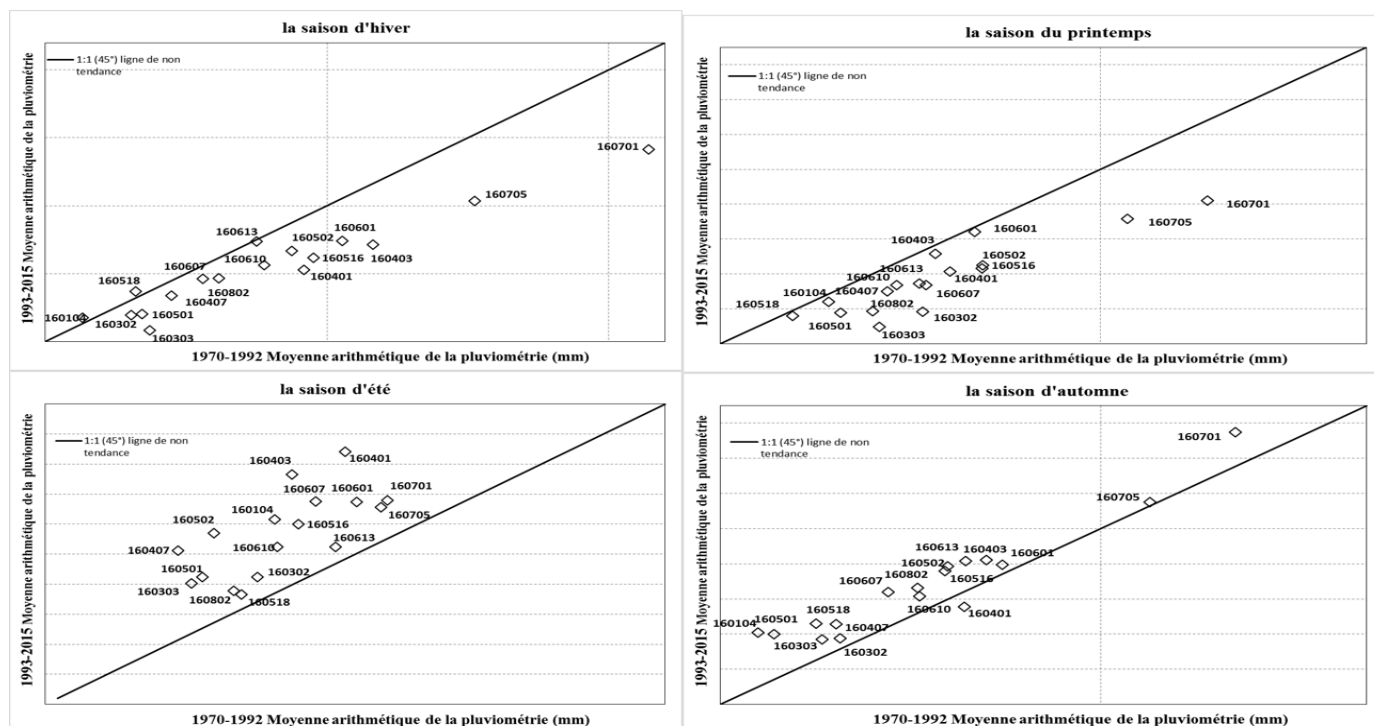


Figure 4.54. Comparaison des moyennes arithmétiques saisonnières.

En utilisant la comparaison de l'écart type, on peut noter que les valeurs diminuent en hiver et au printemps et augmentent en été et en automne (Figure 4.55). L'augmentation de l'écart-type montre le phénomène d'augmentation de la tendance des pluies extrêmes mentionné par Benzater et al., 2019, L'été a enregistré l'augmentation maximale de la moyenne arithmétique (+139,25%) (à la station 160407) et de l'écart-type (+194,23%) (à la station 160303), C'est la saison, qui présente actuellement le risque d'inondation (Li et al., 2020). En revanche, le printemps est la saison avec la plus forte diminution de la moyenne arithmétique (-44,99%) (à la station 160303) et de l'écart type (-47,48%) (à la station 160501), Cela indique que les précipitations, à cette saison, ont généralement tendance à appartenir à la catégorie des faibles précipitations (Wu et al., 2020).

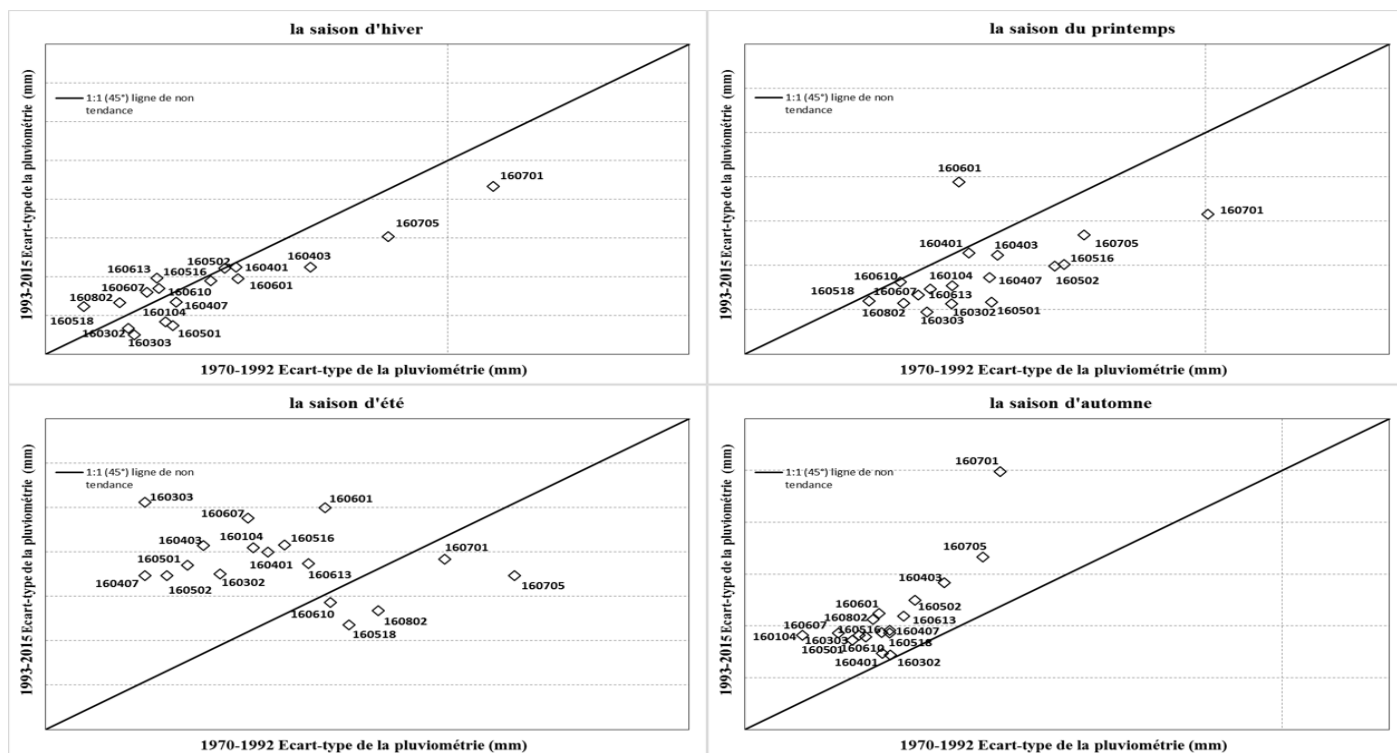


Figure 4.55. Comparaison de la variabilité saisonnière.

#### 4.4.2.2 Tendances annuelles

Les précipitations annuelles de la plupart des stations (12 stations, 71%) affichent une tendance à la baisse, tandis que 5 stations (29%) (160104, 160407, 160501, 160518, 160613) ont une tendance à la hausse (Tableau 4.15). Ce sont principalement les moyennes et fortes précipitations qui sont affectées par la baisse (39% et 43%), Les catégories faibles ne représentent que 18 % (Tableau 4.16 et Figure 4.56). Ces résultats impliquent que la tendance annuelle à la baisse dans la plupart des stations est due en grande partie aux précipitations d'hiver et de printemps. Ces résultats confirment ceux trouvés par Taibi et al., 2013 ; Meddi et al., 2013 et Ghenim et al., (2014 ; 2010),



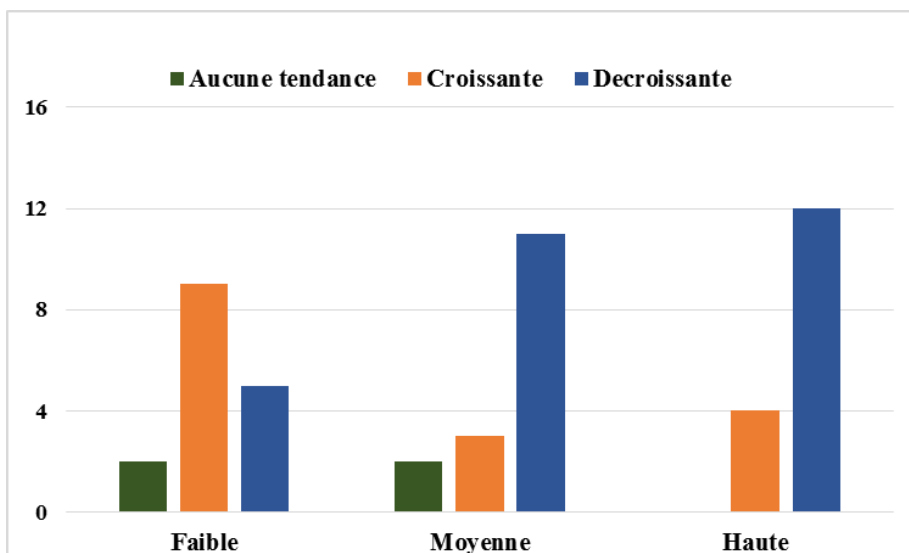


Figure 4.56. Fréquences des tendances annuelles des précipitations

En utilisant les moyennes arithmétiques, 11 stations (160303, 160302, 160802, 160610, 160401, 160516, 160612, 160403, 160601, 160705 et 160701) dans la zone du bassin versant de Tafna ont une diminution quantitative comme le montre la figure 4.57a, parce que les points de dispersion se situent sous la ligne de tendance nulle de la ligne droite 1:1, Les stations 160701 et 160705 (centre du bassin de Tafna) présentent la plus forte diminution (-13,21 % et -12,98 % du tableau 4.15), tandis qu'au sud de Tafna, la station 160104 affiche la plus forte augmentation (+19,50%), Du point de vue de la dispersion, la majorité des stations présentent une réduction de leur écart-type (Figure 4.57b), Cela montre que les précipitations annuelles sont proches de leur moyenne, la station 160501 (160601) présente la diminution (augmentation) maximale (-35,67%) (+29,04%).

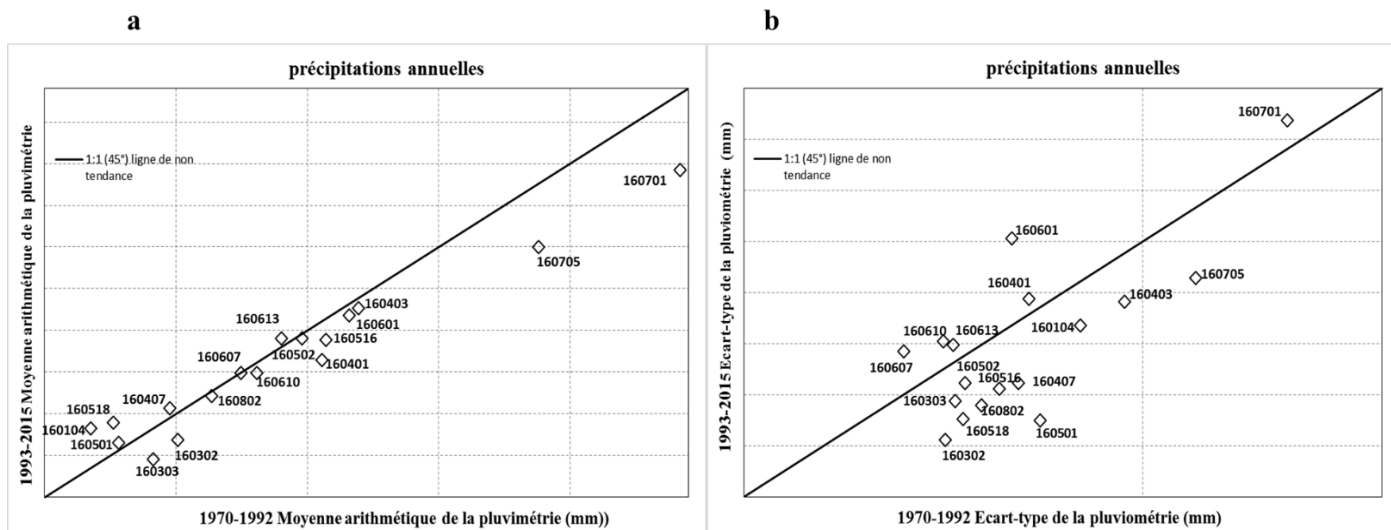


Figure 4.57. Comparaison de la variabilité annuelle.

### 4.5 Conclusion

L'analyse de tendance a été réalisée par trois méthodes. Le r de Bravais Pearson, le  $\tau$  de Kendall, et l'analyse innovantes des tendances, sur 17 stations du bassin versant la Tafna. Cette analyse nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

**A l'échelle mensuelle**, la méthode du r de Bravais Pearson a révélé une tendance à la baisse pour les mois février, mars, avril, juin, juillet. Et une tendance à la hausse pour les mois janvier, aout, septembre, octobre, novembre.

La méthode de Mann-Kendall a montré des résultats similaires avec une petite différence du nombre de stations de chaque mois.

**A l'échelle saisonnière**, les trois méthodes sont en accord que la saison d'hiver et printemps ont une tendance à la baisse, en revanche la saison d'été et d'automne indique une tendance à la hausse.

**A l'échelle annuelle**, l'analyse innovantes des tendances et le r de Bravais Pearson, est marqué par une tendance à la baisse pour 71% et 64% des stations respectivement, tandis que la majorité des stations ne montrent aucune tendance pour test de Mann Kendall, à l'exception de trois stations qui ont une tendance à la baisse.

## *Chapitre V*

### *Prévision de la pluviométrie*

## 5.1 Introduction

Le changement climatique mondial affecte les ressources en eau et plusieurs autres aspects de la vie dans de nombreux pays. La recherche sur le changement climatique dû au réchauffement climatique a acquis une grande importance au cours des dernières décennies (Krysanova et al., 2017 ; Hattermann et al., 2017).

L'ampleur des changements climatiques, y compris les variations de température et de précipitations, varie selon les régions du monde (IPCC, 2013). En conséquence, certaines régions arides devraient connaître des sécheresses tandis que d'autres pourraient être affectées par de fortes précipitations.

La plupart du temps, des modèles dynamiques ont été utilisés dans le passé pour la prévision des précipitations dans différentes parties du monde. Bien que les modèles stationnaires soient moins complexes et moins efficaces dans le temps, leur efficacité n'a pas encore été suffisamment évaluée. Des études antérieures ont utilisé des modèles dynamiques pour comparer différents scénarios d'émissions ou des modèles stationnaires sans tenir compte de l'impact du réchauffement climatique (Alotaibi et al., 2018).

Les modèles dynamiques tels que les modèles de circulation globale (MCG) et les modèles climatiques régionaux ont joué un rôle important dans la prévision des paramètres météorologiques et hydrologiques (Bucchignani et al., 2018).

Ces modèles peuvent prédire les tendances climatiques futures pour les scénarios d'émissions futures probables élaborés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Sørland et al., 2018). Toutefois, plusieurs processus régionaux se produisent à des échelles spatiales de 50 Km et moins, alors que les produits finaux des GCM sont disponibles seulement au niveau d'un ensemble des nœuds disant d'une centaine de Km les uns des autres, ce qui nécessite une réduction d'échelle au niveau régional au moyen de modèles climatiques régionaux.

Ce passage d'une grande échelle vers une plus petite s'appelle réduction d'échelle, ou «downscaling». Diverses méthodes de réduction d'échelle peuvent être utilisées pour traiter et affiner les résultats des MCG dans le but de produire des résultats mieux adaptés aux études d'impact. Le résultat affiné vise à tenir compte des limites de la résolution grossière et/ou des biais régionaux dans les résultats du MCG.

## 5.2 Méthodologie

Dans ce chapitre nous allons utiliser la méthode de réduction d'échelle statistique (Cette dernière transfère les résultats des MCG aux stations locales par le biais d'une méthodologie statistique). Elle est divisée en deux étapes :

### 5.2.1 Fonction de dépendance spatiale (Spatial Dependence Function, SDF)

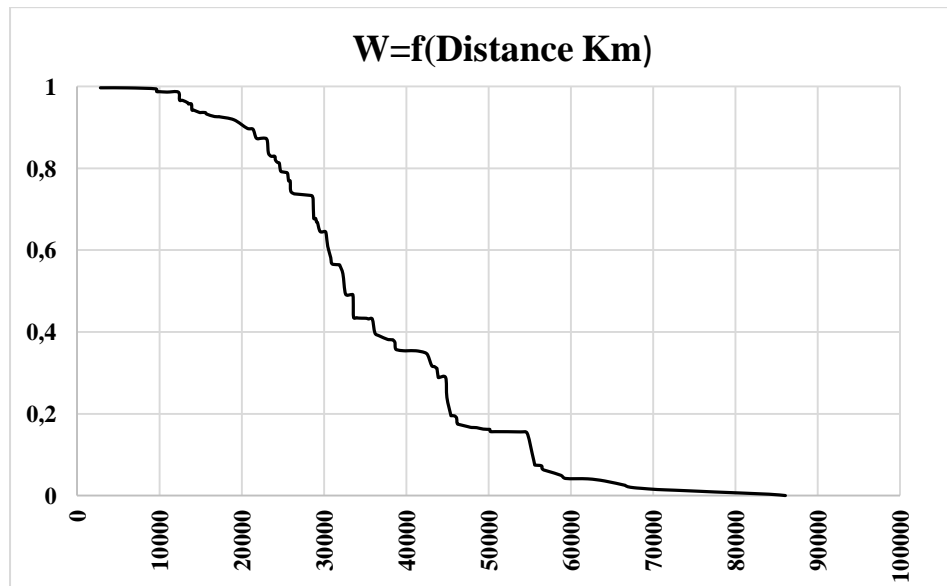
Diverses fonctions ont été revendiquées par les scientifiques en rapport avec les SDF, la méthode d'estimation spatiale est l'élément le plus important dans cette partie. Pour déterminer la SDF il est nécessaire de passer par plusieurs étapes :

- Le calcul des distances de toutes les stations étudiées (17 stations)

- Tout travail de réduction d'échelle spatiale nécessite des pondérations (poids),  $W_i$ , qui aident à transférer les informations des  $n$  stations voisines,  $Z_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) au lieu d'estimation,  $Z_E$ , par le biais de la moyenne pondérée suivante :

$$Z_E = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Z_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{V.1}$$

Où  $W_i$  est le poids attaché au  $i$ ème point de données et  $W_T$  représente le poids total ( $W_T = W_1 + W_2 + \dots + W_n$ ).  $n$  est le nombre de points de données utilisés. A la fin nous avons un poids pour chaque distance (Şen, 2010).



**Figure 5.1.** SDF des stations du bassin versant la Tafna.

Logiquement, le SDF diminue à mesure que la distance entre le pivot et une station quelconque augmente. Dans une telle fonction, toutes les caractéristiques régionales des données qui proviennent de la combinaison de la morphologie (orographie), des effets ONA et des occurrences de précipitations frontales jouent également un rôle. À titre d'exemple, la figure 5.1

montre les SDF pour les stations de précipitation de la Tafna. Les coefficients de pondération sur l'axe vertical sont des valeurs sans dimension.

La méthodologie de réduction d'échelle utilisée dans ce travail est celle suggérée par Şen et al. (2012). Elle est nommée "Quadrangle Downscaling Methodology" (QDM). Elle consiste à choisir une station (160303), et les 4 nœuds du GCM les plus proches qui l'entourent, et nous calculons le poids de chaque nœud. Et de la série du GCM (de 2006 à 2100), on calcule la valeur au niveau de notre station :

$$P_{i\_160303} = \sum_{i=1}^n (W_i/W_t) * P_i \tag{V.2}$$

Avec:

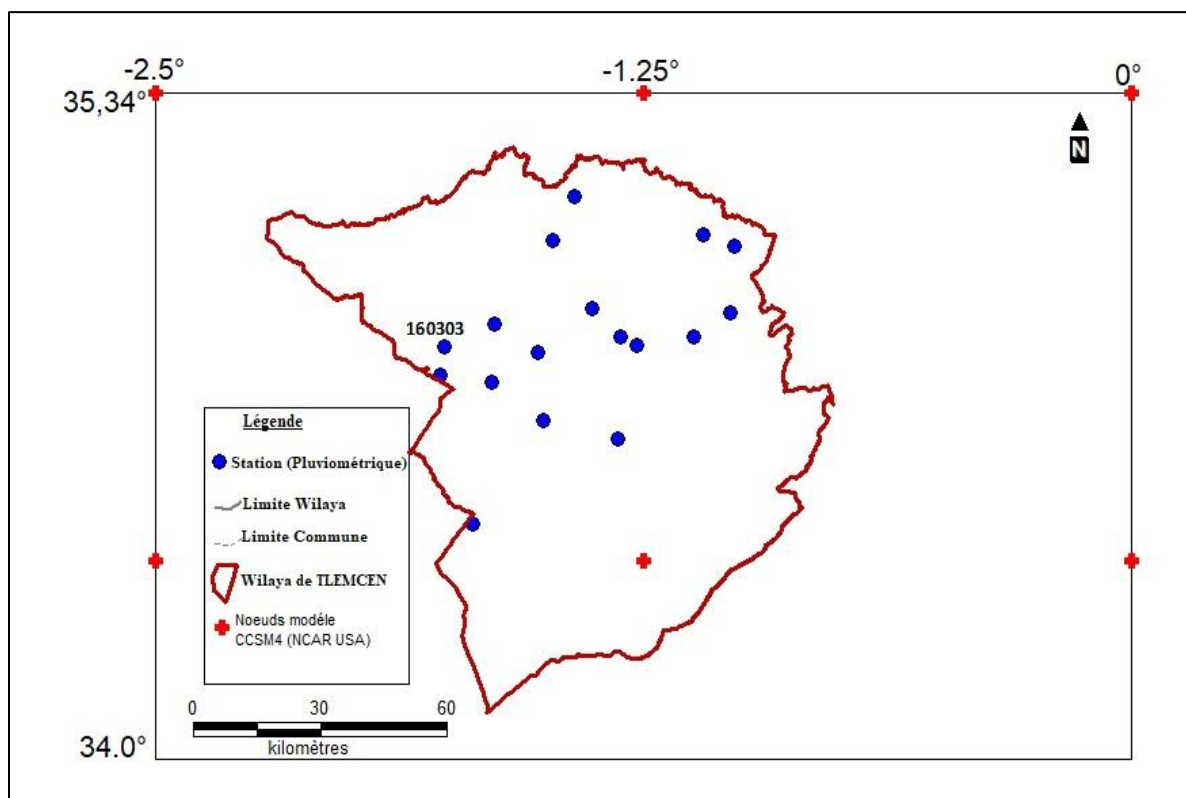
$P_{i\_160303}$  : pluviométrie de l'année i au niveau de notre station

$W_t$  : totale des 4 poids  $w_i$

$P_i$  : pluviométrie du nœud i de l'année (ou mois) (Şen, 2012)

Maintenant nous avons une nouvelle série (**série estimée**) qui contient les valeurs de la pluviométrie du GCM mais au niveau de notre station 160303.

La Figure 5.2 indique la disposition des stations étudiées dans le bassin versant de la Tafna et la localisation des nœuds du modèle CCSM4. Les dimensions de la grille de ce modèle sont 105x115km.



**Figure 5.2.** Carte de localisation des stations avec les nœuds du modèle CCSM4.

### 5.2.2 la projection de la précipitation

A partir de la série estimée du GCM au niveau de la station choisie (160303). Nous avons fait notre projection sur la série des stations observée de l'ANRH :

- Calculons  $Z_i$  (Pour chaque valeur de précipitation  $P_i$ ) :

$$Z_i = (P_i - M_e) / S_e \quad V.3$$

- Calculons la projection de la précipitation ( $P_p$ ) :

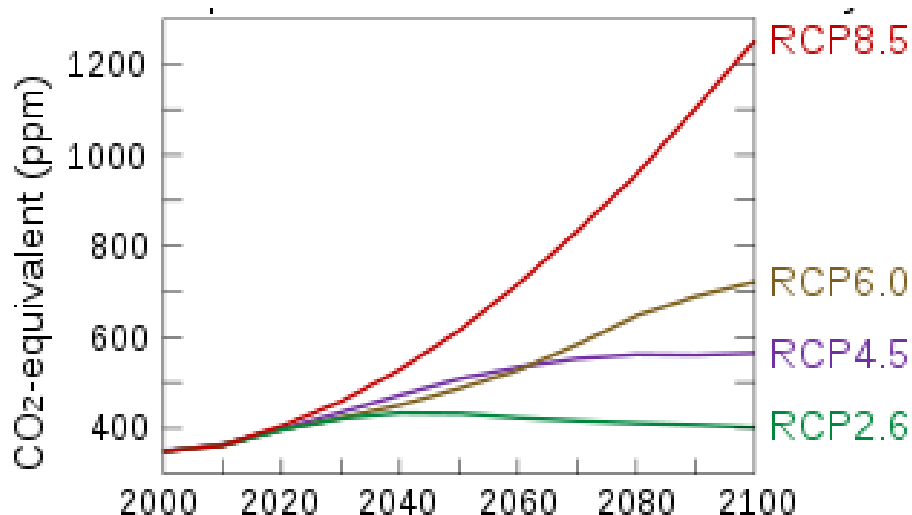
$$P_p = Z_i * S_o + M_o \quad V.4$$

Avec :  $Z_i$  : normalisation de  $P_i$   
 $M_e, S_e$  : la moyenne, l'Ecart type de la série estimée  
 $M_o, S_o$  : la moyenne, l'Ecart type de la série observée

Nous avons utilisé le modèle CCSM4 du centre national pour les recherches atmosphériques (National Center for Atmospheric Research, NCAR, USA). c'est une version du modèle de système climatique communautaire (Community Climate System Model, CCSM) qui est un modèle climatique de circulation générale comprenant l'atmosphère, la terre, l'océan et la glace de mer qui sont reliées par un coupleur qui échange des informations sur l'état et les flux entre les composantes.

Le CCSM est développé et utilisé par une communauté de scientifiques et d'étudiants des laboratoires nationaux et d'autres institutions. Le CCSM a été utilisé pour étudier plusieurs paléoclimats, le climat du passé le plus récent et pour faire des projections sur les éventuels changements climatiques futurs (Gent, 2011).

Quatre scénarios (RCP pour Radiative Concentrations Pathways) ont été appliqués, pour la modélisation du climat et la recherche pour le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5) en 2014 (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5). Ces scénarios décrivent différents futurs climatiques, qui sont tous considérés comme possibles en fonction de la concentration de gaz à effet de serre (GES) émis dans les années à venir. Représentant respectivement des perturbations du bilan radiatif de 2,6, 4,5, 6 et 8,5  $W/m^2$  (Figure 5.3).



**Figure 5.3.** Les concentrations atmosphériques en équivalent CO<sub>2</sub> de tous les agents de forçage (en parties par million en volume (ppmv)) selon les quatre RCP utilisés par le cinquième rapport d'évaluation du GIEC.

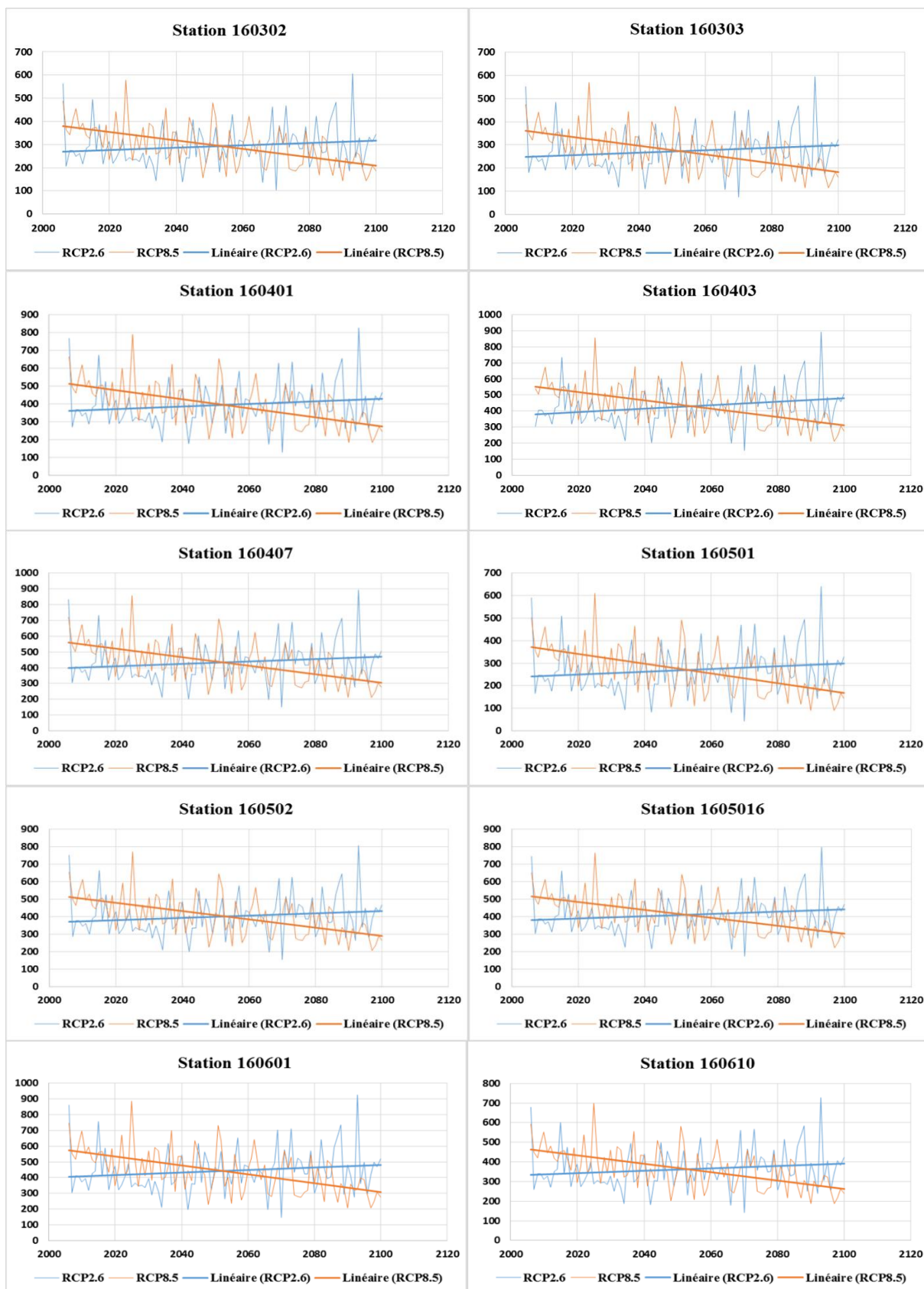
### 5.3 Résultats et discussion

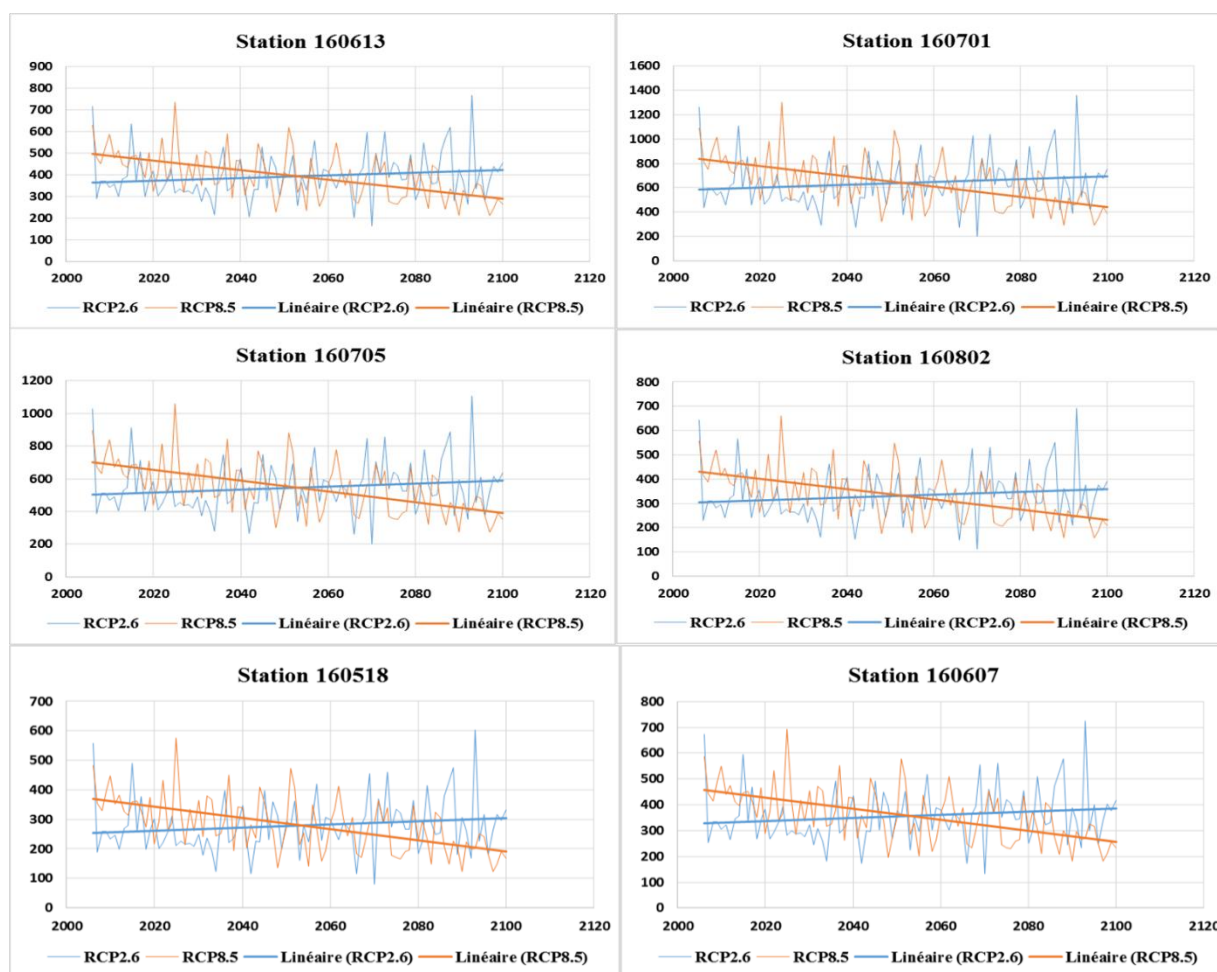
Dans ce chapitre deux scénarios ont été utilisés (RCP2.6, RCP8.5). Pour étudier la tendance annuelle de la série projetée (2006-2100) par la méthode de  $r$  de Pearson et l'analyse innovante de la tendance, et effectuer une comparaison avec les résultats de l'étude de tendance sur la série observée étudiée dans le chapitre précédent.

#### 5.3.1 Etude de la tendance annuelle par le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson

Les résultats sont montrés sur la Figure 5.4 et la Figure 5.5 :







**Figure 5.4.** Courbes de la pluviométrie annuelle avec leurs droites de tendances (2006-2100)

L'analyse graphique est une bonne manière de comprendre les différentes caractéristiques. Les graphes de la Figure 5.4 se ressemblent beaucoup dans leurs prévisions, les valeurs annuelles les plus extrêmes des précipitations sont prévu pour l'année 2093 (RCP2.6) et 2025 (RCP8.5), ces graphes montrent clairement que les droites de tendance sont en diminution dans toutes les stations pour le scénario RCP8.5. En revanche le scénario RCP2.6 indique une augmentation des droites de tendance de toutes les stations étudiées.

A partir de la Figure 5.4 et les coefficients de corrélation (Tableau 5.1), nous avons déterminé les tendances positives et négatives, et pour une interprétation plus claire une comparaison a été faite entre la série observée et les prévisions (Figure5.5).

Tableau 5.1. Calcule des coefficients de corrélation pour chaque station

Station n°	Coefficient de corrélation (RCP2.6)	Coefficient de corrélation (RCP8.5)
160104	0,19	-0,57
160302	0,19	-0,57
160303	0,19	-0,57
160401	0,19	-0,57
160403	0,19	-0,57
160407	0,19	-0,57
160501	0,19	-0,57
160502	0,19	-0,57
160516	0,19	-0,57
160601	0,19	-0,57
160610	0,19	-0,57
160613	0,19	-0,57
160701	0,19	-0,57
160705	0,19	-0,57
160802	0,19	-0,57
160518	0,19	-0,57
160607	0,19	-0,57

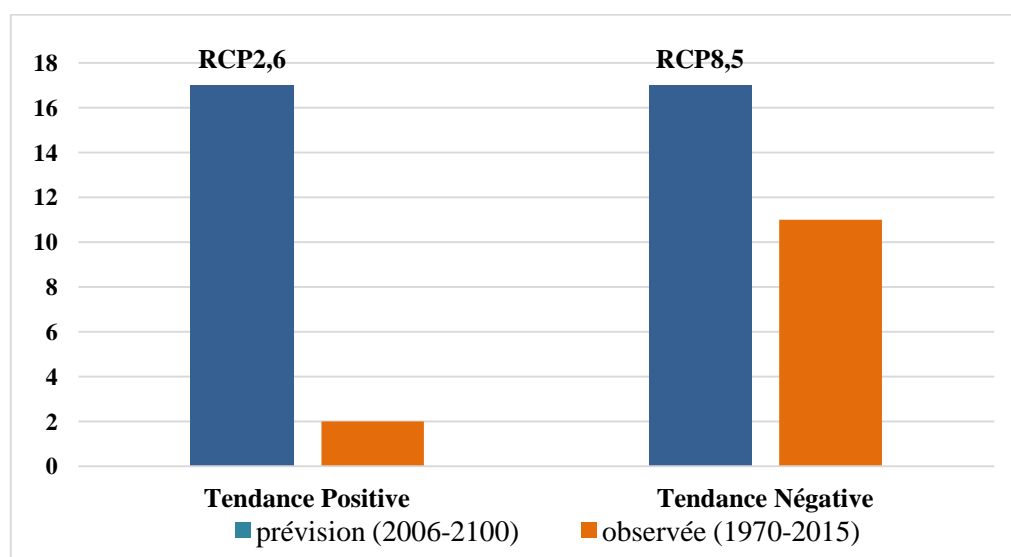


Figure 5.5. Nombre de stations par type de tendance.

Le scénario RCP8.5 est marqué par une tendance décroissante dans toutes les stations étudiées (Figure 5.5). Ces résultats sont similaires aux résultats trouvés par la série observée, où 64.78 des stations ont une tendance à la baisse. Contrairement au scénario RCP2.6 qui indique une tendance à la hausse dans toutes les stations à l'encontre de nos résultats précédant.

### 5.3.2 Etude de la tendance annuelle par l'Analyse innovante de la tendance

L'analyse innovante de la tendance a été appliquée sur la série étudiée. Les résultats sont donnés à la Figure 5.5 et 5.6. Ces résultats englobent les moyennes arithmétiques ( $m_1$  et  $m_2$ ) des deux moitiés (2006-2052 et 2053-2100), les écarts types ( $s_1$  et  $s_2$ ), les pentes de tendance ( $S$ ). Cette méthode offre la possibilité de faire une évaluation graphique à partir des valeurs faibles, moyennes, élevées. Vu le nombre des stations nous avons présenté que quelques stations.

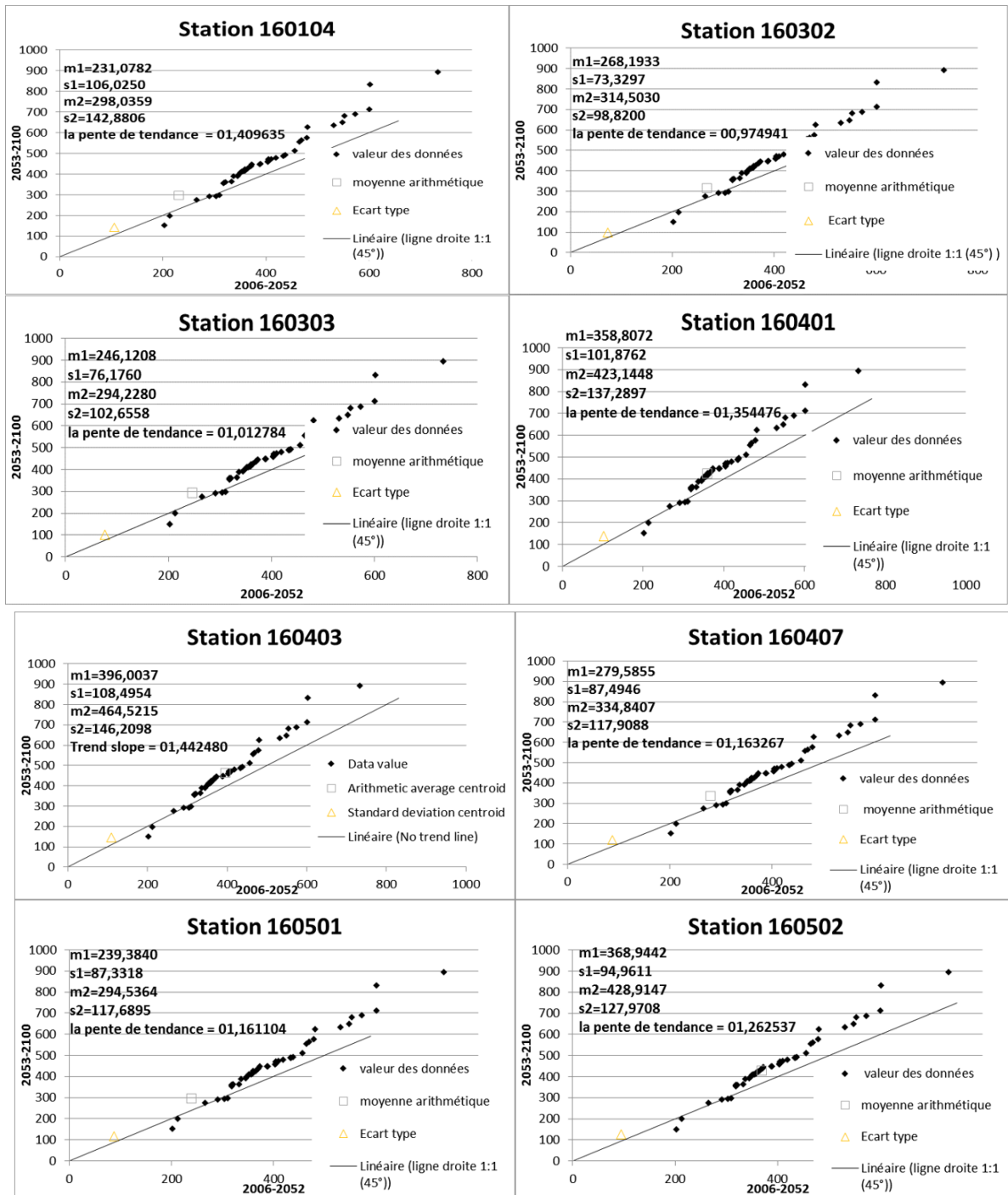


Figure 5.6. Tendence des précipitations annuelle (RCP2.6).

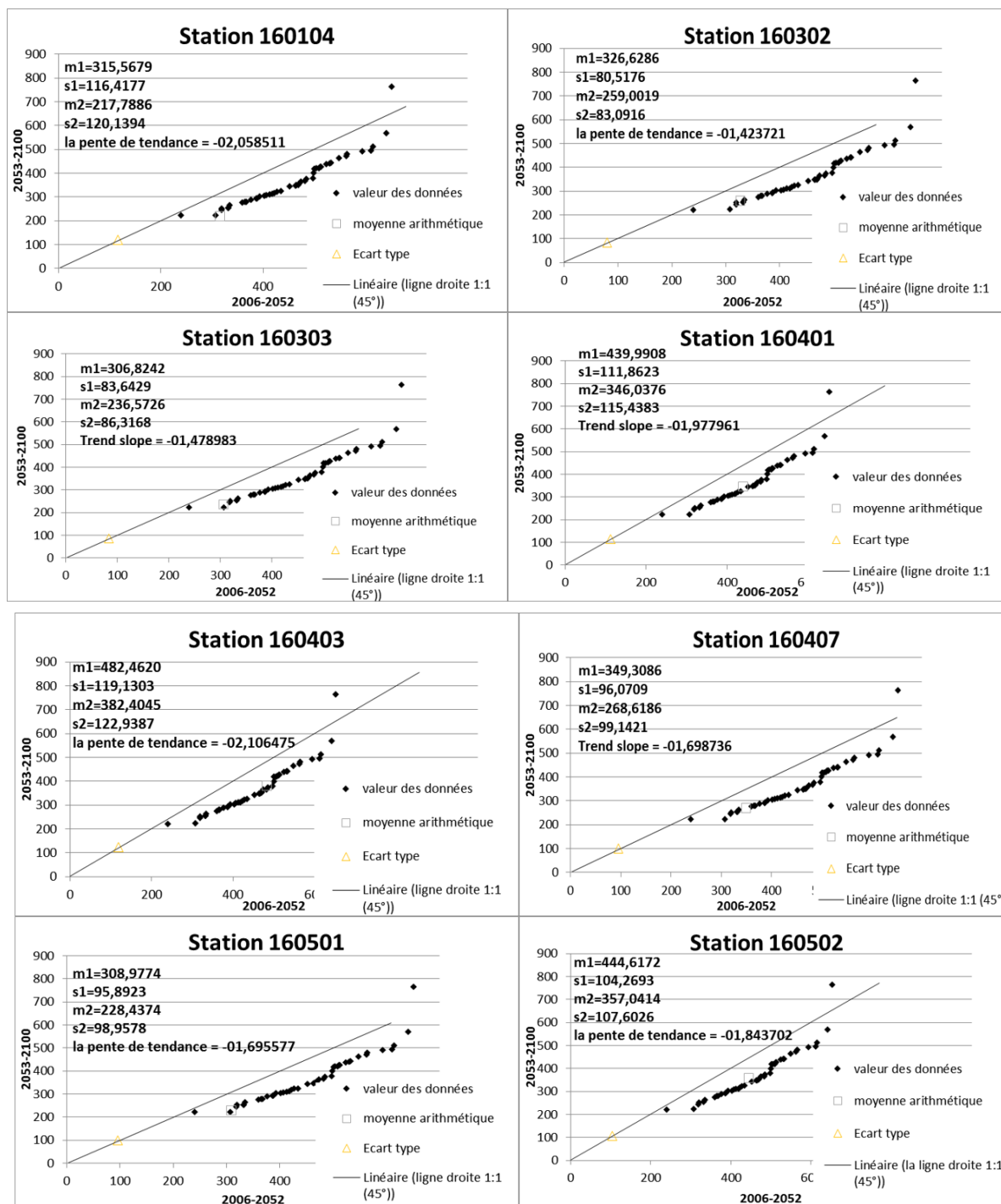


Figure 5.6. Tendance des précipitations annuelle (RCP8.5).

La Figure 5.5 présente un régime pluviométrique similaire, où tous les points de dispersion des données se trouvent au-dessus de la ligne 1:1. Il y a donc une tendance à la hausse. Il est évident que pour des valeurs de précipitations élevées, la tendance est plus efficace car les points de précipitations élevées sont plus éloignés de la ligne droite 1:1 par rapport aux valeurs de précipitations faibles et moyennes. D'autre part la Figure 5.6 montre une tendance à la baisse, tous

les points de dispersion se trouvent au-dessus de la ligne 1:1, les catégories de valeurs élevées sont les plus touchées.

Afin de mieux comprendre la variabilité de la tendance dans la région de Tafna, deux autres graphiques sont présentés dans les Figures 5.7 et 5.8. Ils traitent de la tendance régionale des moyennes arithmétiques, des écarts-types.

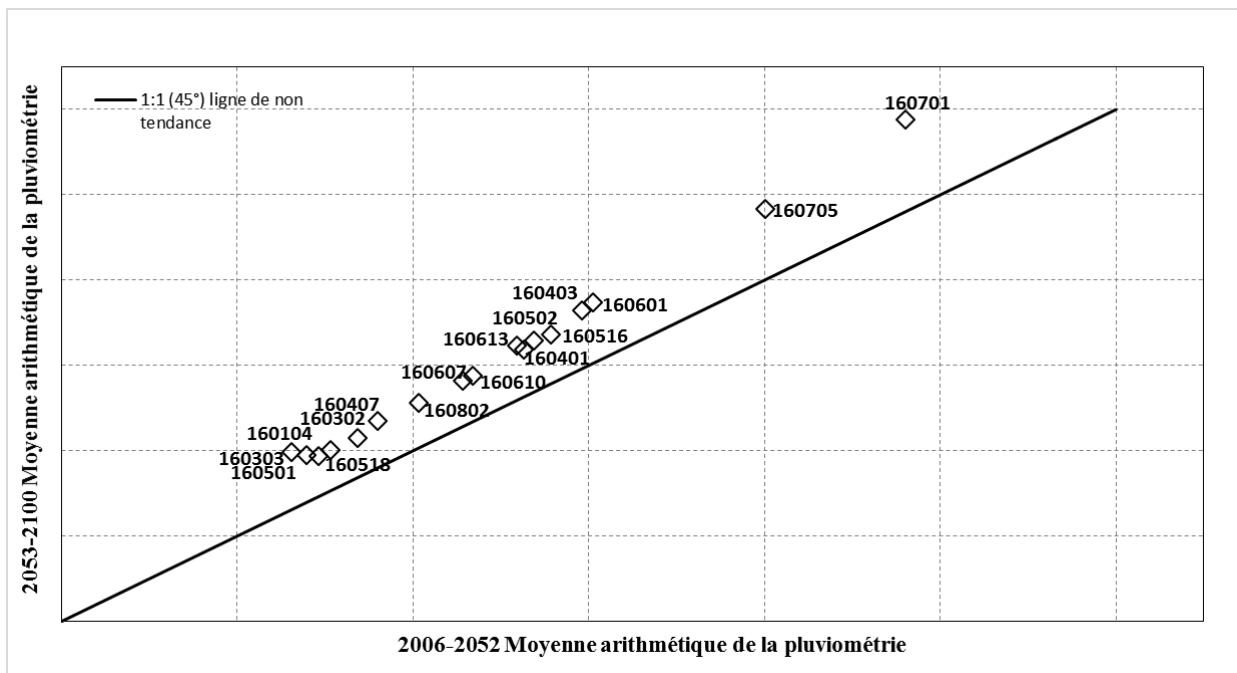


Figure 5.8. Graphe de l'identification de la variabilité régionale (moyenne arithmétique) (RCP2.6)

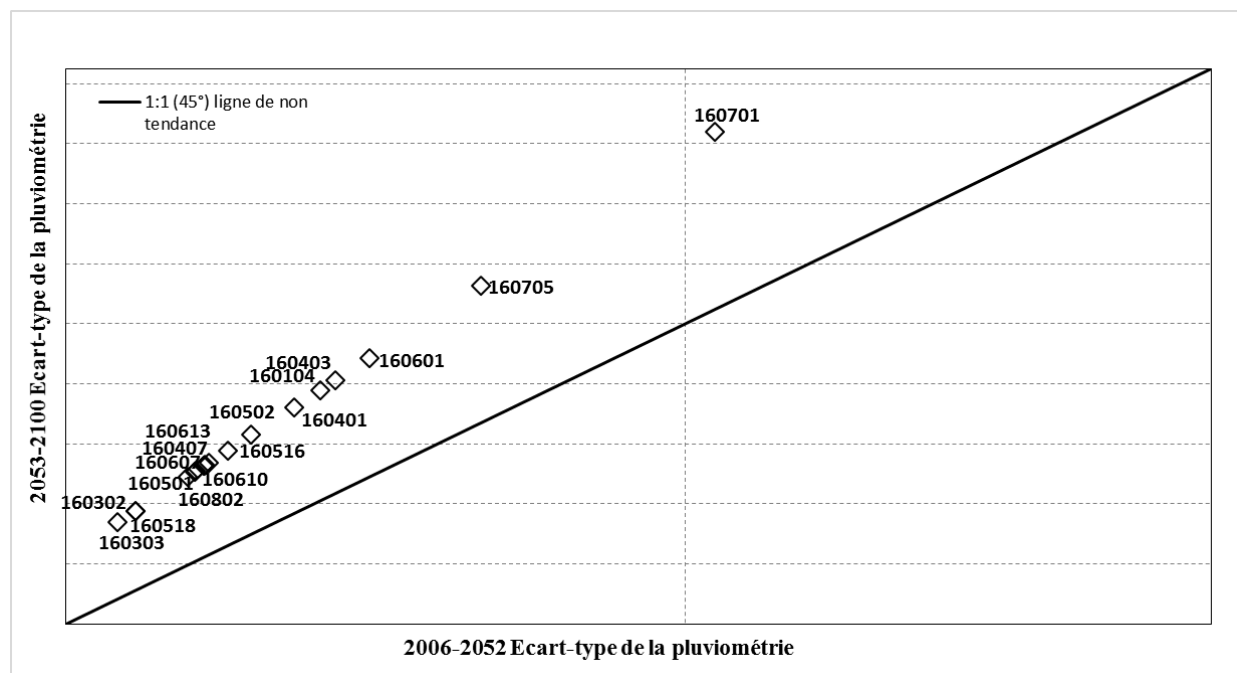


Figure 5.9. Graphe de l'identification de la variabilité régionale (écart-type) (RCP2.6).

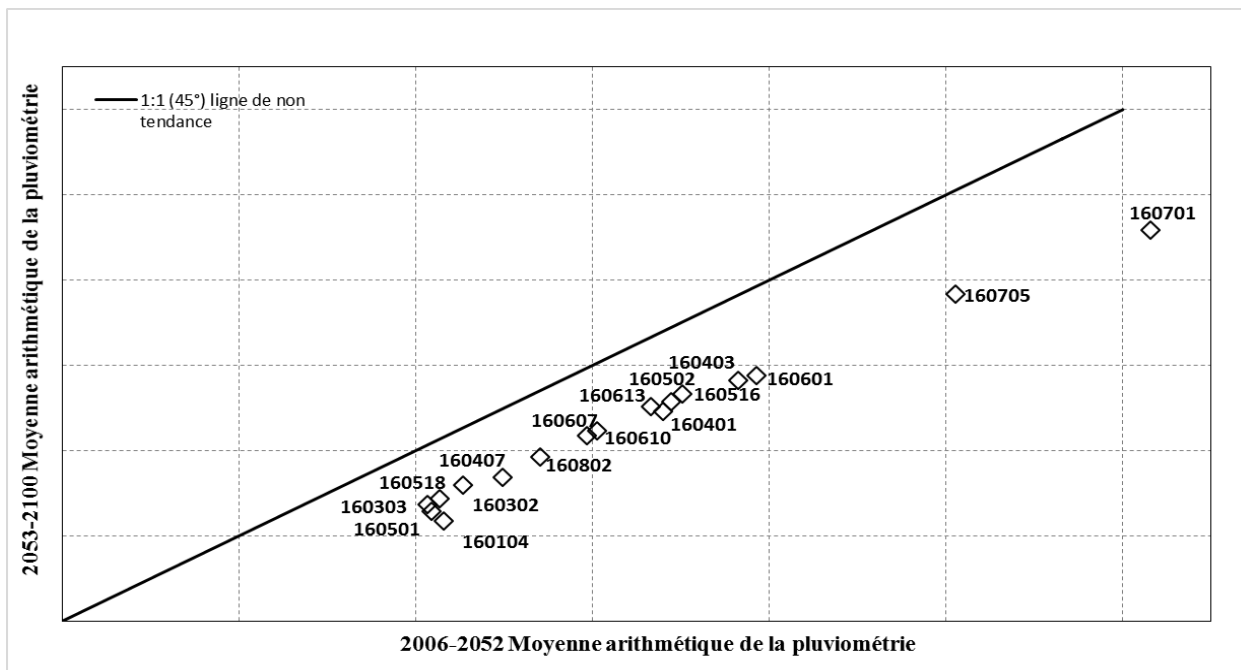


Figure 5.10. Graphe de l'identification de la variabilité régionale (moyenne arithmétique) (RCP8.5).

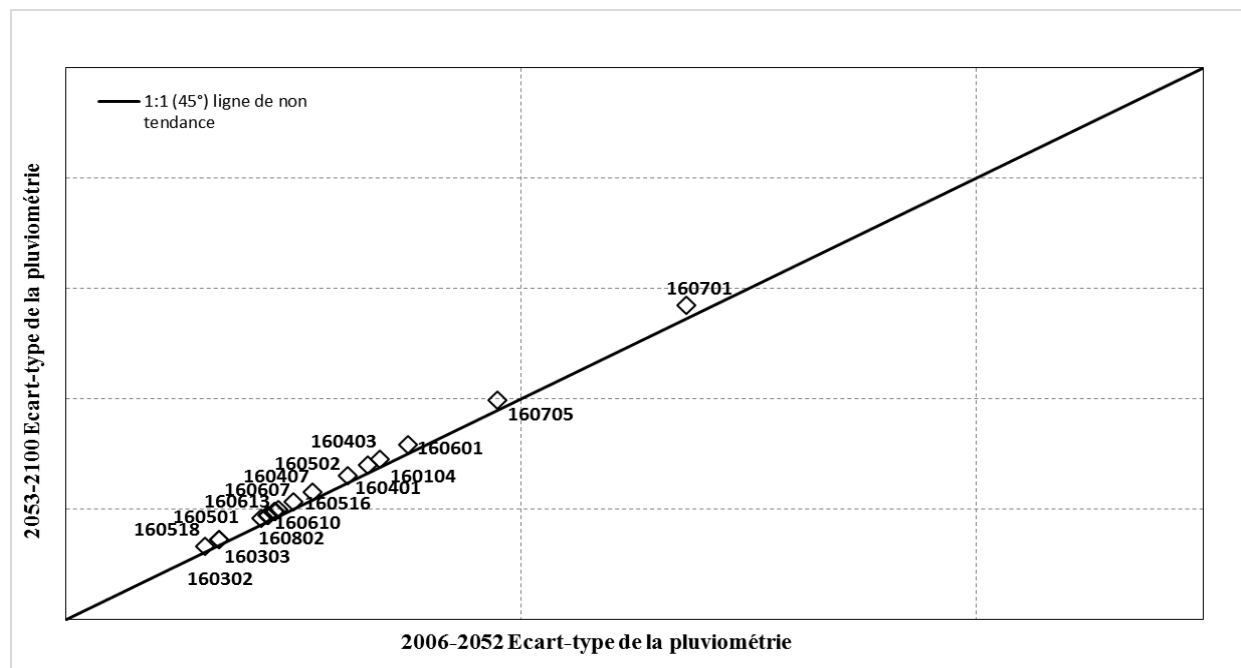


Figure 5.11. Graphe de l'identification de la variabilité régionale (écart-type) (RCP8.5)

La Figure 5.7 et 5.9 est très importante pour comprendre la variabilité de la tendance future en fonction de la distance des stations de la ligne 1:1(45°), Plus l'emplacement de la station est proche de la ligne 1:1 (45°), moins la pente de la tendance est importante et inversement. Par exemple sur la Figure 5.7, le scénario RCP 2.6 prévoit que toutes les stations se trouvent dans la



région de tendance croissante du modèle de tendance, la plus forte augmentation a été enregistrer au niveau de la station 160701.

Contrairement à la Figure 5.9 (scénario PCP 8.5) où toutes les stations se trouvent dans la région de tendance décroissante. Ce dernier prévoit que les stations 160701 et 160705 auront la plus forte diminution de la moyenne arithmétique, tandis que l'augmentation maximale est enregistrée au niveau de la station 160303.

La Figure 5.8 et 5.10 est utilisée pour comparer la variabilité entre les stations dans le bassin versant la Tafna, plus la position des stations est proche de la ligne 1:1(45°) plus la variabilité est faible. Par conséquent la Figure 5.10 montre une variabilité très faible pour toutes les stations, finalement la Figure 5.8 indique une variabilité plus ou moins forte.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé les données mensuelles du modèle CCSM4 de 2006 à 2100, afin d'étudier la tendance future, dont il est nécessaire d'apporter une correction de ces données par la fonction de dépendance spatiale, ce qui nous permet d'avoir les données du modèle CCSM4 au niveau de la station 160303.

L'étude de la tendance annuelle par le coefficient de Bravais-Pearson en se basant sur les deux scénarios climatiques du cinquième rapport (AR5) du GIEC, a montré que les valeurs annuelles les plus extrêmes des précipitations sont prévus pour les années 2093 (RCP 2.6) et 2025 (RCP 8.5).

L'étude de la tendance annuelle par l'analyse innovante de la tendance prévoit une tendance significative à la baisse pour le scénario RCP8.5. La plus forte diminution de la pluviométrie est enregistrée au niveau des stations 160705 et 160701.

Cette baisse des précipitations confirme nos résultats précédant et les résultats de différentes études dans le bassin versant la Tafna.

## *Conclusion générale*

### Conclusion générale

Cette thèse a analysé l'impact du changement climatique dans le bassin versant la Tafna, ce travail est un complément aux précédents travaux réalisés sur la variation des précipitations,

La partie bibliographique est pour but de donner des notions sur le changement climatique, les causes et les conséquences de ce dernier, ainsi les modèles climatiques et leurs fonctionnements.

L'étude a utilisé un totale de 17 stations pluviométriques, répartis plus ou moins uniformément dans le bassin versant de la Tafna sur une période de 46ans (1970-2015), l'homogénéité de notre série pluviométrique a été testée on utilisant la lois racines normale, et vérifier par le teste de Pettitt et le teste de Buishand, La détection des valeurs aberrantes et le comblement des lacunes sont réalisée à l'aide du logiciel Hydrolab.

L'étude de la tendance pluviométrique a été faite dans un premier temps au niveau mensuel, saisonnier et annuel. En second lieu nous avons étudié la géographie précise des changements, pour cela trois méthodes statistiques sont utilisées, r de Pearson, Le tau de Kendall et l'Analyse innovante de la tendance de la pluviométrie.

La méthode de r de Pearson et le tau de Kendall ont montré au niveau mensuel une diminution sur le mois de février, mars, avril, mai, juin, juillet. La plus grande diminution a été marquée dans le mois de mars, au niveau saisonnier nous avons déterminé que la saison d'hiver et printemps sont les deux saisons les plus touché par le changement climatique. D'un point de vue annuel, la majorité des stations ont montré une tendance a la baisse répartie sur le long du bassin.

L'Etude des tendances par l'Analyse innovante de la tendance de la pluviométrie a été appliquée sur les séries de précipitations saisonnières et annuelles, L'étude saisonnière a montré que l'hiver et le printemps présentent une tendance à la baisse de 88% et 100% des stations respectivement. Pour l'hiver, ce sont les catégories de valeurs "basses" (38%) et "hautes" (38%) qui sont les plus touchées par la diminution, tandis que pour le printemps, ce sont les valeurs "moyennes" et "hautes" qui sont touchées.

La fréquence des faibles précipitations a tendance à augmenter au cours des deux autres saisons, l'été et l'automne, la situation s'est complètement déplacée vers la tendance à la hausse (100 % et 94 %). En été, les catégories les plus touchées par cette augmentation sont les valeurs "faibles" (39%) et "élevées" (36%), tandis qu'en automne, ce sont les valeurs "moyennes" (41%) et "élevées" (36%).

Sur une échelle annuelle, une tendance à la baisse a été détectée dans 71% des stations. Les catégories les plus touchées par cette baisse sont les valeurs "Moyenne" (39%) et "Élevée" (43%).

Finalemment, une correction des prévisions mensuelles des précipitations de 2006 à 2100 a été faite par l'application de la méthode de réduction d'échelle statistique. Ensuite nous avons utilisé les deux scénarios du cinquième rapport du GIEC (AR5) pour décrire la tendance future. Les résultats du scénario RCP 8.5 prévoit une tendance à la baisse de toutes les stations étudiées, ces résultats sont similaires aux résultats trouvés par la série observée où nous avons trouvé que la majorité des stations montre une tendance à la baisse.

Ce travail ne peut être parfait, il peut être complété par d'autres travaux plus poussés. Nous espérons le compléter par d'autres études sur les précipitations, en utilisant des données provenant d'un plus grand nombre de stations et des périodes d'observation plus longues, pour une meilleure représentativité de la région.

## *Références bibliographiques*

- Adjim H (2003):** Evaluation et affectation des ressources hydriques superficielles du bassin versant de la TAFNA, Mémoire de magister, Université TLEMCEM.
- Albritton D A. et al. (2001):** Changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse, constitue le quatrième volume du Troisième rapport d'évaluation du GIEC, et comprend le Document de synthèse, les Résumés à l'intention des décideurs et les Résumés techniques des volumes des trois Groupes de travail du GIEC.
- Alexandersson H (1986):** A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6, 661-675.
- Alotaibi K, Ghumman A, Haider H, Ghazaw Y M, Shafiquzzaman M D (2018):** Future Predictions of Rainfall and Temperature Using GCM and ANN for Arid Regions: A Case Study for the Qassim Region, Saudi Arabia. *Water*, v. 10, n. 9. Doi:10.3390/w10091260
- AMAP (2011):** Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, xii + 538 pp.. ISBN 978-82-7971-071-4.
- Assaba M, Laborde J P, Rezak S (2013):** Les effets d'une baisse de la pluviométrie sur les volumes régularisables des barrages d'Algérie. *Revue scientifique et technique. LJEE N°21 et 22. Spécial colloque CIREDD'2013.*
- Balah B, Amarchi H (2016):** Variability of rainfall series of Seybouse watershed of North-East of Algeria. *Rev. Sci. Technol., Synthèse*, v. 32, n. 2016 pp. 86 -97. Doi : 10.12816/0027954
- Barnett V, Lewis T (1994):** Outliers in statistical data. 3rd ed. New York: John Wiley.
- Benzater B, Elouissi A, Benaricha B, Habi M (2019):** Spatio-temporal trends in daily maximum rainfall in northwestern Algeria (Macta watershed case, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, v. 12, n. 11, p. 1-18. DOI 10.1007/s12517-019-4488-8.
- Belarbi F (2018):** Etude des précipitations, du transport solide dans le bassin versant de la Tafna et leur interrelation. Thèse de doctorat en hydraulique, Département d'hydraulique, Université de Tlemcen, Algérie.
- Belarbi F (2010):** Etude de la pluviométrie journalière dans le bassin versant de la Tafna. Mémoire de magister en hydraulique. Département d'hydraulique. Université de Tlemcen, Algérie.
- Belić D S (2006):** Global Warming and Greenhouse Gases. *Facta Universitatis Series: Physics, Chemistry and Technology*, v. 4, n. 1, 2006, pp. 45–55. <https://doi.org/10.2298/FUPCT0601045B>.

- Benikhlef A (2008):** Contribution A L'étude De L'impact Des Changements Climatique Sur Les Ressources Hydriques –Cas Du Bassin Versant De La Tafna. Mémoire de magister. Département d'hydraulique. Université de Tlemcen, Algérie.
- Benmossat A (2012):** Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin de la Tafna. Mémoire deMagister, Option : Mobilisation et protection des ressources en eau, Département d'hydraulique, Université de Tlemcen, Algérie
- Benzaki Y (2018):** Comment traiter les données manquantes en Data Science. Machine learning made easy.<https://mrmint.fr/donnees-manquantes-data-science>
- Bessaoud O, Pellissier J P, Rolland J P, Khechimi W (2019):** Rapport De Synthèse Sur L'agriculture En Algérie, Rapport De Recherche, CIHEAM-IAMM. 2019, pp.82. Hal-02137632
- Berolo W (2010) :** Estimation des précipitations mensuelles décennales et centennales. Travaux de Recherche par W. Berolo. Géoazur, UNS, Nice, France.
- Blain G C (2013):** The Mann-Kendall test: the need to consider the interaction between serial correlation and trend. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 35, n. 4, pp. 393-402, Doi: 10.4025/actasciagron.v35i4.16006
- Bollmann M, Bosch T. et al. (2010):** World Ocean review: living with the oceans. ed. by Gelpke, Nikolaus and Visbeck, Martin. Mare, Hamburg, 234 pp. ISBN 978-3-86648-000-1
- Bouanani A (2004):** Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW- Algérie). Thèse de Doctorat, Department d'hydraulique, Université de Tlemcen.
- Boucekima B, Bechki D, Bouguettaia H, Boughali S, Meftah M T (2008):** The underground brackish waters in South Algeria: potential and viable resources, international water resources association, XIII World Water Congress.
- Boukhateb Y (2013):** Etude Des Diptères Simuliidae De La Haute Tafna (Nord-Ouest Algérien), Mémoire De Master, Département : Ecologie Et Environnement, Université De Tlemcen.
- Boukhari S (2018):** La gestion durable des services d'eau potable et d'assainissement en Algérie, Thèse de doctorat, Département d'Hydraulique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, université badji mokhtar annaba
- Bouregba N (2006):** Modélisation du climat et changement climatique (cas de L'Algérie), mémoire de magister, centre Universitaire de Mascara.
- Bourque A (2000):** Les changements climatiques et leurs impacts, Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement En ligne, v. 1, n, 2.Doï : <https://doi.org/10.4000/vertigo.4042>

- Bois P (1986):** Contrôle des séries chronologiques corrélées par étude du cumul des résidus de la corrélation. Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, annexe 3.
- Brander M, Davis G (2012):** Greenhouse Gases, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2e</sub>, and Carbon: What Do All These Terms Mean?. *Econometrica*, White Papers.
- Bucchignani E, Mercogliano P, Panitz H J, Montesarchio M (2018):** Climate change projections for the Middle East-North Africa domain with COSMO-CLM at different spatial resolutions. v. 9, n. 1, pp. 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.01.004>
- Calas J A, Charlat, Rousseau D (1993):** Contrôle des longues séries de précipitations dans le Sud-Est de la France. Rapport de projet de climatologie de l'ENM, Météo-France, Toulouse.
- Chadid O (2003):** Analyse Des Séries Hydrométéorologiques Par La Transformée En Ondelettes. Mémoire Présenté À L'école De Technologie Supérieure Comme Exigence Partielle À L'obtention De La Maîtrise En Génie Électrique.
- Charles A, Sommier D, Vidal G (2015):** Modèles climatiques et impacts du réchauffement climatique en France, portail Drias les futurs du climat, ENS-Lyon/Ifé.
- Chourghal N (2016):** Impacts des changements climatiques sur la culture du blé dur en Algérie, thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, Ecole Nationale Supérieure Agronomique Alger.
- Cicognani M G, Berchtold A (2010):** Imputation des données manquantes : Comparaison de différentes approches. 42èmes Journées de Statistique, Marseille, France.
- Claire Lang Delus (2011):** Sévérité des étiages et indigence des précipitations : une relation évidente mais rarement simple - Exemple en régime pluvial océanique. *Revue Géographique de l'Est*. v. 51, pp. 3-4.
- Claussen M, Mysak L, Weaver A. et al. (2002):** Earth system models of intermediate complexity: Closing the gap in the spectrum of climate system models. *Climate Dynamics*, v. 18, n. 2002, pp. 579–586. <https://doi.org/10.1007/s00382-001-0200-1>
- Cole-dai J (2010):** Volcanoes and climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v.1, n. 6, pp. 824–839. Doi : 10.1002/wcc.76.
- Collins W D, et al. (2006):** The Community Climate System Model version 3 (CCSM3). *J. Clim.*, v. 19, n. 11, pp. 2122–2143. <https://doi.org/10.1175/JCLI3761.1>
- Coryn A L, Bailer-Jones (2009):** The evidence for and against astronomical impacts on climate change and mass extinctions: A review. *International Journal of Astrobiology*, v.8, n.3, pp. 213.219. Doi : 10.1017/S147355040999005X.
- Cramer W, Guiot J, Fader M, Garrabou J, Gattuso J P, Iglesias A, Lange M A, Lionello P, Llasat M C, Paz S, Peñuelas J, Snoussi M, Toreti A, Tsimplis M N, Xoplaki E (2018):**



- Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, Nature Publishing Group, v. 8, n. 11, pp. 972 – 980. Doi: 10.1038/s41558-018-0299-2.
- Dabanli I, Sen Z, Yelegen M, Sisman E, Selek B, Güçlü Y (2016):** Trend assessment by the innovative-Sen method. *Water Resources Management*, v. 30, n. 14, p. 1-11.
- Doukpolo B (2007):** Variabilité et tendances pluviométriques dans le nord-ouest de la Centrafrique : enjeux environnementaux. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'études approfondies (DEA) en « Géographie et Gestion de l'Environnement », Université d'Abomey -Calavi-
- Drouiche N, Ghaffour N, Naceur M W, Lounici H, Drouiche M (2012):** Towards sustainable water management in Algeria. *Desalination and Water Treatment*, v. 50, n. 1-3, pp. 272-284, Doi: 10.1080/19443994.2012.719477.
- Drouiche N, Ghaffour N, Naceur M W, Mahmoudi H, Ouslimane T (2011):** Reasons for the fast growing seawater desalination capacity in Algeria. *Water Resour. Manage*, v. 25, n. 2011, pp. 2743–2754. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9836-8>
- Duby C, Robin S (1996):** Analyse de Séries Chronologiques. AgroParisTech. <http://www2.agroparistech.fr/Supports-de-cours-1177.html>
- Elmeddahi Y (2016):** Les Changements Climatiques et Leurs Impacts Sur Les Ressources En Eau, Cas Du Bassin Du Cheliff. Thèse de Doctorat. Université Hassiba Benbouali Chlef.
- Elmeddahi Y, Mahmoudi H, Issaadi A et Goossen M.FA (2015):** Analysis of treated wastewater and feasibility for reuse in irrigation: a case study from Chlef, Algeria. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n.12. Doi : 10.1080/19443994.2015.1021999.
- Elouissi A (2016) :** Changement climatique, impacts et vulnérabilité. Cas du bassin versant de la Macta. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen.
- Elouissi A, Şen Z, Habi, M (2016):** Algerian rainfall innovative trend analysis and its implications to Macta watershed. *Arabian Journal of Geosciences*. Arab J Geosci, p. 1-12. DOI 10.1007/s12517-016-2325-x.
- Fatichi S, Ivanov V, Caporali E (2012):** Assessment of a stochastic downscaling methodology in generating an ensemble of hourly future climate time series. *Clim Dyn*, v. 40, n. 2013, p. 1841–1861. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1627-2>.

- Flato G (2011):** Earth system models: an overview. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 2, n. 6, pp. 783–800. <https://doi.org/10.1002/wcc.148>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018):** Drought characteristics and management in North Africa and the Near East. Rome, 2018.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2009):** Groundwater Management in Algeria. Draft Synthesis Report. Rome, 2009.
- Franco B, Vincent C (2007):** Chapitre 10. Le XXI<sup>e</sup> siècle vu par les modèles : Réponses des glaciers au nouveau climat *In* : Les glaciers à l'épreuve du climat. Marseille : IRD Éditions, 2007, pp. 217-241. Doi : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9993>.
- Gachon P (2000):** La modélisation du climat - où en sommes-nous?. Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, v. 1, n. 2, DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.4044>
- Gent P R (2011):** The Community Climate System Model Version 4, Journal of Climate, v. 24, n. 19, pp. 4973-4991. DOI: 10.1175/2011JCLI4083.1.
- Ghenim A N, Megnounif A (2016):** Variability and Trend of Annual Maximum Daily Rainfall in Northern Algeria. International Journal of Geophysics. Article ID 6820397, p. 1-11. <https://doi.org/10.1155/2016/6820397>.
- Ghenim A N, Megnounif A, Djelloul S M I R S M (2014):** Evaluation des changements dans la pluviométrie du bassin versant de la Tafna (nord-ouest de l'Algérie). p. 65-77, 2014. [https://www.researchgate.net/publication/272829428\\_Evaluation\\_des\\_changements\\_dans\\_la\\_pluviometrie\\_du\\_bassin\\_versant\\_de\\_la\\_Tafna\\_nord-ouest\\_de\\_l'Algerie](https://www.researchgate.net/publication/272829428_Evaluation_des_changements_dans_la_pluviometrie_du_bassin_versant_de_la_Tafna_nord-ouest_de_l'Algerie). Accessed 20 January 2019.
- Ghenim A N, Megnounif A (2013) :** Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie). Physio-Géo, v. 7, n. 2013. DOI : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3173>
- Ghenim A N, Megnounif A (2011) :** Caractérisation de la sécheresse par les indices spi et SSFI (nord-ouest de l'Algérie). Revue scientifique et Technique. LJEE N°18 Juin 2011, p. 59-77.
- Ghenim A N, Megnounif A, Seddini A, Terfous A (2010):** Fluctuations hydropluviométriques du bassin versant de l'Oued Tafna à Béni Bahdel (Nord-Ouest Algérien).Sécheresse, v. 21, n.2, pp.115-120.
- Ghzel H (2018):** Synthèse monographique sur l'état de l'environnement en Algérie. Observatoire du sahara et du sahel, OSS. \_ Tunis : OSS, 2018.\_ 28p.
- Goosse H P Y, Barriat W, Lefebvre M F, Loutre V Z (2010):** Introduction to climate dynamics and climate modelling, online textbook <http://www.climate.be/textbook>.

- Goubanova K, LI L (2007):** Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change*, v. 57, n. 2, p. 27-42.
- Grasland C (2000):** Initiation Aux Methodes Statistiques En Sciences Sociales, Université Paris VII / UFR GHSS / 1998-2000, [Http://Grasland.Script.Univparis-Diderot.Fr/STAT98/Stat98\\_6/Stat98\\_6.Htm](http://Grasland.Script.Univparis-Diderot.Fr/STAT98/Stat98_6/Stat98_6.Htm)
- Guardia P (1975):** Géodynamique de la Marge Alpine du Continent Africain. D'après l'Etude de l'Oranie Nord Occidentale. Relations Structurales et Paléogéographiques Entre le tell Extrême et L'avant Pays Atlassique. Thèse 3ème cycle, Université de Nice, France.
- Hamiche A M, Boudghene Stambouli A, Flazi S (2016):** A Review on the Water and Energy Sectors in Algeria: Current, Forecasts, Scenario and Sustainability Issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, pp. 261–276. Doi: 10.1016/j.rser.2014.08.024.
- Haeberli W, Huggel C, Paul F, Zemp M (2013):** Glacial Responses to Climate Change. *The San Diego law review*, v. 13, pp. 152-175. Doi: 10.5167/uzh-83972.
- Hattermann F F, Krysanova V, Gosling S, Dankers R, Daggupati P, Donnelly Ch, Flörke M, Huang S, Motovilov Yu, Buda S, Yang T, Müller C, Leng G, Tang Q, Portmann F T, Hagemann S, Gerten D, Wada Y, Masaki Y, Alemayehu T, Satoh Y, Samaniego L (2017):** Cross-scale inter-comparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. *Clim. Change*, v. 141, n. 3, pp. 561–576. Doi: 10.1007/s10584-016-1829-4
- Held I M (2005):** The gap between simulation and understanding in climate modeling. *Bull. Am. Meteorol.*, v. 86, n. 11, pp. 1609–1614. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-11-1609>
- Helsel D R, Hirsch R M (2002):** Statistical Methods in Water Resources, Chapter A3, Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey
- Herr D, Galland G R (2009):** The Ocean and Climate Change. Tools and Guidelines for Action. IUCN, Gland, Switzerland. 72pp
- Hoerling M, Kumar A (2003):** The perfect ocean for drought. *Science*, v. 299, n. 5607, pp. 691-694, doi:10.1126/science.1079053.
- Horton R, Gornitz V, Bowman M, Blake R (2010):** Chapter 3: Climate observations and projections. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1196, n. 1, pp. 41–62. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05314.x>.
- Huber P J (1981):** Robust Statistics. New York: John Wiley and Sons.

- IPCC (2014):** Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2013):** Summary for Policymakers. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Climate Change 2013; Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2013; pp. 1–30.
- IPCC (2007):** Climate change 2007: the physical science basis, Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York.
- IPCC (2001):** Climate Change 2001: The Scientific Basis [Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguera M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 p
- IPCC (2000):** Emissions Scenarios 2000: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Published by The Press Syndicate of The University Of Cambridge The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom.
- IPCC (1996):** Manuel simplifié pour l'inventaire des gaz à effet de serre, Lignes Directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre - version révisée 1996, Manuel simplifié (Volume 2)
- IPCC (1990):** Climate Change, the IPCC Scientific Assessment, Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge CB2 3RQ, UK.
- Iratni N (2014):** Modélisation Hydrologique De Quelques Sous Bassins Versant De La Tafna, Mémoire De Magister, Département D'hydraulique, Université D'oran
- Jarabíková M, Pásztorová M, Minarič P, Skalová J (2015):** Impact Of The Climate Change On Evapotranspiration In The Poipie Area, Acta Sci. Pol. Formatio Circumictus, v. 14, n. 1, pp. 85–97. <http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/2015.14.1.85>
- Jóhannesson T. et al (2006):** The impact of climate change on glaciers and glacial runoff in the Nordic countries, European Conference on Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources Reykjavik, Iceland.

- Josse J, Husson F, Pages J (2009):** Gestion des données manquantes en Analyse en Composantes Principales. *Journal de la Société Française de Statistique*, v. 150, n. 2, pp. 28-51
- Karl T R, et al (2009):** Global climate change", *Global Climate Change Impacts in the United States*, (eds.).Cambridge University Press.
- Kelly P M., Adger W N (2000):** Theory and Practice in Assessing Vulnerability to Climate Change and Facilitating Adaptation, *Climatic Change*, v. 47, n. 4, pp. 325 - 352. Doi:10.1023/A:1005627828199
- Kettab A (2001):** Les ressources en eau en Algerie : stratégies, enjeux et vision. *Desalination*, v. 136, n. 2001, pp 25–33. Doi : 10.1016/S0011-9164(01)00161-8.
- Khaldi A (2005):** Impacts de la sécheresse sur les régimes des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'ouest algérien « mont de Tlemcen-Saida ». thèse de doctorat en hydrologie. Faculté de science de la terre, de géographie et l'aménagement du territoire, université d'Oran.
- Khan Z A (2017):** Causes and Consequences of Greenhouse Effect & Its Catastrophic Problems for Earth, *International Journal of Sustainability Management and Information Technologies*, v. 3, n. 4, pp. 34-39. Doi : 10.11648/j.ijsm.20170304.11.
- Khoualdia W (2015):** Contribution à l'étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques « cas d'oued Medjerda Nord-Est Algérie », Thèse de doctorat, université badji mokhtar- Annaba.
- Khromova T E (2010):** Cryosphere and climate, *International Conference on Planetary Boundary Layer and Climate Change*, IOP Publishing, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, v. 13, n. 2010. Doi:10.1088/1755-1315/13/1/012002.
- Kreibich H, Di Baldassarre G, Vorogushyn S, Aerts J C J H, Apel H, Aronica G T, Arnbjerg-Nielsen K, Bouwer L M, Bubeck P, Caloiero T (2017):** Adaptation to flood risk: Results of international paired flood event studies. *Earth's Future*, v. 5, n. 10, p. 953-965, <https://doi.org/10.1002/2017EF000606>.
- Krysanova V. et al. (2017):** Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts projected for 12 large river basins worldwide-A synthesis. *Environmental Research Letters*, v.12, n, 2017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8359>
- Kusangaya S, Warburton M L, Archer E, Jewitt J P W (2014):** Impacts of Climate Change on Water Resources in Southern Africa, *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 67–69, n. 2014, pp 47–54. DOI: 10.1016/j.pce.2013.09.014.

- Labban A H (2016):** Dust Storms over Saudi Arabia: Temporal and Spatial Characteristics Climatology and Synoptic Case Studies. Thesis in Meteorology. School of Science College of Science Engineering and Health RMIT University, Australia.
- Laborde J P (1998):** Notice D'utilisation Du Logiciel Hydrolab. (Version 98.2 Pour Excel4, Excel5 Et Excel97). Centre national de la recherche scientifique, Université de Nice.
- Lamarque P (1993):** Étude des longues séries climatologiques dans le cadre de l'évolution climatique. Note de travail de l'ENM n° 396, Météo-France, Toulouse.
- Laux P, Nguyen P N B, Cullmann J (2017):** Impacts of Land-Use/Land-Cover Change and Climate Change on the Regional Climate in the Central Vietnam, In: Nauditt A., Ribbe L. (eds) Land Use and Climate Change Interactions in Central Vietnam. Water Resources Development and Management. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2624-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2624-9_9).
- Li L, Li J, Yu R (2020):** Characteristics of summer regional rainfall events over Ili River Valley in Northwest China. Atmospheric Research, v. 243, n. 2020, p. 1-10.
- Lott F, Guez L (2007):** Simulations de la Circulation Générale de l'Atmosphère. Travaux de Modélisation et de Simulation de la Majeure 2. Simulation Et Instrumentation des Systèmes Mécaniques "SEISM", Ecole Normale Supérieure. France. 25p.
- Louamri A (2013):** Le Bassin-Versant De La Seybouse (Algérie Orientale): Hydrologie Et Aménagement Des Eaux. Thèse De Doctorat En Sciences (Géographie Et Aménagement Du Territoire, Option : Hydrologie), Université De Constantine 1.
- Louamri A (2009):** Cartographie Des Pluies Annuelles Dans Le Bassin versant De L'oued Seybouse (Nord-Est Algerien). Sciences & Technologie : : Architecture et Sciences de la Terre, v. 2009, n. 30, pp. 43-52. <https://search.emarefa.net/detail/BIM-293228>
- Lopez-Bustins J A (2007):** The Western Mediterranean Oscillation and Rainfall in the Catalan Countries. PhD Thesis. University de Barcelona Spain. 184p.
- Lopez J, Frances F (2010):** Influence of the North Atlantic Oscillation and the western Mediterranean oscillation in the maximum flow events in Spain International workshop advances in statistical hydrology may 23-25 2010 Taormina Italy <https://www.researchgate.net/publication/268418202> . consulter le 6 December 2018.
- Lubès H, Masson J M, Servat É, Paturel J E, Kouamé B, Boyer J F (1994):** Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Étude bibliographique. Programme ICCARE, Rapport n° 3, ORSTOM, Montpellier, France.

- MATE, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'environnement (Ministry of Land Planning and Environment) (2010):** Seconde communication nationale de l'Algérie sur les changements climatiques à la CCNUCC, projet GEF –PNUD 00039149, 2010, Algiers.
- Maciá-Pérez F, Berna-Martinez J V, Oliva A F, Ortega M A (2015):** Algorithm for the detection of outliers based on the theory of rough sets. *Decision support systems*, v. 75, n. 2015, pp. 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2015.05.002>
- Mboera L E G, Mayala B K, Kweka E J, Mazigo H D (2011):** Impacts of climate change on human health and health systems in Tanzania: a review, *Tanzania Journal of Health Research*, v, 13. Doi:<http://dx.doi.org/10.4314/thrb.v13i1.10>.
- Meddi H, Meddi M, Arkamose A A (2014):** Study of Drought in Seven Algerian Plains. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 39, n. 2014, pp. 339–359, DOI 10.1007/s13369-013-0827-3.
- Meddi M, Toumi S, Mehaiguene M (2013):** Hydrological Drought in Tafna Basin–Algeria. *researchGate*. DOI: 1013140/2125982245.
- Meddi M M, Arkamose A, Meddi H (2010):** Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments Northwestern Algeria. *Water Resour Manage*, v. 24, n. 2010 pp. 3817–3833. DOI 101007/s11269-010-9635-7.
- Meddi H, Meddi M (2009):** Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Article de recherche Sécheress*. V. 20, n. 1, p. 57-65. DOI:10.1684/sec.2009.0169.
- Meddi M, Talia A, Bekoussa B (2003):** Evaluation du régime hydro pluviométrique du bassin de la Tafna. *Nord-Ouesr de l'Algerie*
- Meddi M, Hubert J (2000):** Variabilité pluviométrique dans l'ouest Algérien durant les cinq dernières décennies. 13<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de climatologie. 6 au septembre 2000 Nice, France.
- Merabti A, Meddi M, Martins S D, Pereira S (2017):** Comparing SPI and RDI Applied at Local Scale as Influenced by Climate, *Water Resour Manage*, v. 32, n. 2018, pp. 1071–1085 DOI: 10.1007/s11269-017-1855-7.
- Maheshwari K, Singh M (2016):** Outlier detection using divide-and-conquer strategy in density based clustering. In: *Proc. of International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering*.
- M R E (2012):** Ministère des ressources en eaux: Indicateurs sectoriels : secteur des ressources en eaux.

- Messahel M, Benhafid M S (2007):** Water resources of Algeria: availability and needs. In: Lamaddalena. Water saving in Mediterranean agriculture and future research needs, Proceedings of the International Conference WASAMED Project (EU contract ICA3-CT-2002-10013), 2007/02/14-17, Valenzano (Italy), v. 3, n. 56. pp. 235-242.
- Milly P, Betancourt J, Falkenmark M, Hirsch R, Kundzewicz Z, Lettenmaier D, Stouffer R (2008):** Stationarity is dead: whither water management? *Science*, v. 319, n. 5863, p. 573–5740.
- Mishra A K, Desai V R (2005):** Drought forecasting using stochastic models. *Stoch Environ Res Risk Assess*, v. 19, n. 2015 pp. 326–339, DOI 10.1007/s00477-005-0238-4.
- Mobeen M, Haroon A, Riaz O, Khan M R (2017):** Impact of climate change on the precipitation pattern of district Sargodha, Pakistan. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. V. 9, n. 1, pp. 21-35. Doi: 10.1108/IJCCSM-10-2015-0147.
- Mohorji A M, Sen Z, Almazroui M (2017):** Trend Analyses Revision and Global Monthly Temperature Innovative Multi-Duration Analysis. *Earth Systems and Environment*, v. 1, n. 9, p. 1-13, 2017. DOI 101007/s41748-017-0014-x.
- Mutin G (2011):** L'eau dans le monde arabe : menaces, enjeux, conflits. 2e édition mise à jour, Paris : Ellipses, 176.
- NASA (2015):** Global Climate Change, Global Climate Change: How do we know?. <http://climate.nasa.gov/evidence/>
- Nazarenko, L et al. (2015):** Future climate change under RCP emission scenarios with GISS Model E2. *J. Adv. Model. Earth Syst*. V. 7. Doi:10.1002/2014MS.
- Nefzi A (2012):** Evaluation Economique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture : étude théorique et application au cas de la Tunisie. Thèse de Doctorat, AgroParitec.
- Nikolov T, Petrov N (2014):** Main factors influencing climate change : A review, Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, Sciences De La Terre, l'atmosphère et l'espace Climatologie, Tome. 67, n. 11.
- Obassi G O (1994):** WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of American Meteorological Society*, v. 75, n. 9, pp. 1655–1662. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1994\)075<1655:WRITID>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1994)075<1655:WRITID>2.0.CO;2).
- Ondo J C (2002):** Etude Comparative Des Tests De Stationnarité. Thèse de doctorat en Sciences de L'eau. Spécialité : Hydrologie Statistique.
- OMM Organisation météorologique mondiale (2019):** Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2018, OMM-N° 1233



- ONM (2009)** National Weather Office, internal report, 2009, Algiers.
- Oualkacha L, Stour L, Agoumi A, Kettab A (2017):** chapter 2: Climate Change Impacts in the Maghreb Region: Status and Prospects of the Water, M. Ouessar et al. (eds.), Water and Land Security in Drylands, pp.17-25. Doi: 10.1007/978-3-319-54021-4\_2.
- Ouzeau G M, Déqué M, Jouini S, Planton R Vautard (2014):** Le Climat De La France Au Xxie Siècle. V. 4, Scénarios Régionalisés : Edition 2014 Pour La Métropole Et Les Régions D’outre-Mer, Ministère De l’Écologie, Du Développement Durable Et De l’Énergie. France.
- Öztopal A, Sen Z (2017):** Innovative trend methodology applications to precipitation records in Turkey. *Water Resources Management*, v. 31, n. 3, p. 727-737.
- Page C, Eric S, Terray L, Thiéry D (2011):** Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine. Résultats du projet GICC–RexHySS, Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l’Environnement de la Seine.
- Pearson K (1901):** LIII. On lines and plane of closest fit to systems of points in space. *A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*, v. 2, n. 11, p. 559–572. Doi :10.1080/14786440109462720
- Petoukhov V, Claussen M, Berger A. et al. (2005):** EMIC Intercomparison Project (EMIP–CO<sub>2</sub>): comparative analysis of EMIC simulations of climate, and of equilibrium and transient responses to atmospheric CO<sub>2</sub> doubling. *Climate Dynamics*, v. 25, n, 2005, pp. 363–385. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0042-3>
- Pettitt A N (1979):** A nonparametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*, v. 28, n. 2, pp. 126-135. Doi : 10.2307/2346729
- Planchon V(2005):** Traitement des valeurs aberrantes : concepts actuels et tendances générales. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, V. 9, N.1, Pp. 19–34.
- Plateforme Ocean et Climat (2019):** Océan Et *Changement* Climatique : Les Nouveaux Défis.Focus Sur 5 Grands Thèmes Du Rapport Spécial « Océan Et Cryosphère », p.40
- Potter K W (1981):** Illustration of a new test for detecting a shift in mean in precipitation series. *Monthly Weather Review*, 109, 2040-2045
- Ramamasy S, Baas S (2007):** Change: adaptation to drought in Bangladesh, A resource book and training guide, Asian Disaster Preparedness Center Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Rezaie Narimisa M (2018):** Global Warming and Climate Change; Local Scale Meteorological Indicators. *Revista Publicando*, v. 5, n, 14. pp. 560-569.
- Riphah U S (2015)** Global Warming: Causes, Effects and Solutions, *Durreesamin Journal*, v. 1, n. 4.

- Robock A (2003):** Climatic Impact of Volcanic Emissions, A Chapter of State of the Planet (AGU monograph, Steve Sparks and Chris Hawkesworth, Editors).
- Roger A, Pielke Sr (2011):** Andy Pitman, Dev Niyogi, Dev Niyogi Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, v. 2, n. 6, pp.828 – 850. DOI: 10.1002/wcc.144
- Romain G S (2018):** Effets Des Variabilités Pluviométriques Sur Les Systèmes De Culture Et Adaptations Des Agriculteurs Dans La Plaine Du Mayo-Kebbi (Sud-Ouest Du Tchad). Thèse du doctorat PhD de Géographie, Université Maroua.École de troisième cycle.
- Rubio J L, Safriel U, Daussa R, Blum W E H, Pedrazzini F, Hoffman M T (2009):** Water Scarcity, Land degradation and desertification in the mediterranean region: Environmental and security aspects African. J. Range Forage Sci, v. 26, n. 3, pp. 193–194. <https://doi.org/10.2989/AJRF.2009.26.3.11.956>.
- Sahnoune F, Belhamel M, Zelmat M, Kerbachi R (2013):** Climate Change in Algeria: Vulnerability and Strategy of Mitigation and Adaptation, Energy Procedia, v. 36, n. 2013, pp. 1286 – 1294, doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.145.
- Salameh T (2008):** Modélisation multi-échelles de la circulation atmosphérique hivernale sur le bassin méditerranéen : rôle des interactions d'échelles. Thèse de Doctorat. École polytechnique. France 11p.
- Salinger M J, Striger C J, Dase H P (2000):** Agrometeorological adaptation strategies to increasing climate variability and climate change. Agri for Meteorolo, v. 103, n. 2000, pp. 167-184. Doi :10.1016/S0168-1923(00)00110-6
- Sayemuzzaman M, Manoj K J H A (2013):** Seasonal and annual precipitation time series trend analysis in North Carolina United States. Atmospheric Research. V. 137, n. 2014, p. 183–194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.012>.
- Şen Z (2014):** Trend identification simulation and application. Journal of Hydrologic Engineering, v. 19, n. 3, p. 635-642.
- Şen Z (2012):** Innovative trend analysis methodology. Journal of Hydrologic Engineering, v. 17, n. 9, p. 1042-1046, 2012.
- Şen Z (2010):** Critical assessment of downscaling procedures in climate change impact models. International Journal of Ocean and Climate Systems, v.1, n. 2, p. 85–98, Doi:10.1260/1759-3131.1.2.85
- Servat E, Paturel J E, Lubes H, Kouame B, Ouedraogo M, Masson J M (1997):** Variabilité climatique en Afrique humide le long du Golfe de Guinée. Première partie : analyse détaillée du phénomène en Côte d'Ivoire. Journal of Hydrology, n. 191, pp. 1-15.

- Sivaramanan S (2015):** Global Warming and Climate change causes, impacts and mitigation. DOI:10.13140/RG.2.1.4889.7128.
- Snyder R L, Moratiel R, Zhenwei Song, Swelam A, Jomaa I, Shapland T (2011):** Evapotranspiration Response to Climate Change. *Acta Horticulturae*, v. 922, pp. 91-98  
Doi: 10.17660/ActaHortic.2011.922.11.
- Sørland S L, Schar C, Luthi D, Kjellstrom E (2018):** Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 7, pp.1-11  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacc77>
- SORO T D, SORO N, OGA Y M, LASM T, SORO G, AHOUSI K E, BIEM J (2011):** La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Géographie physique et environnement* v. 5, n. 2011, pp. 55-73.  
<https://doi.org/10.4000/physio-geo.1581>.
- Stockton C W (1988):** Current research progress toward understanding drought. In: *Sécheresse, gestion des eaux et production alimentaire*. Mohammédia : Imprimerie Fédala, p. 21-35.
- Stocker T (2011):** Introduction to Climate Modelling. *Advances in Geophysical and Environmental Mechanics and Mathematics*, ed: 1, Springer, 182 pp. Doi: 10.1007/978-3-642-00773-6.
- Study of Man's Impact on Climate (SMIC) (1971):** Inadvertent Climate Modification: Study of Man's Impact on Climate, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Spencer R W, Braswell W D (2008):** Potential biases in cloud feedback diagnosis: A simple model demonstration, *J. climate*, v. 21, n. 21, pp. 5624–5628.  
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2253.1>
- Sun F, Roderick M, Farquhar G (2018):** Rainfall statistics, stationarity, and climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*, v. 115, n. 10, pp. 2305–2310.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1705349115>
- Taabni M, El Jihad M D (2012):** Eau et changement climatique au Maghreb : quelles stratégies d'adaptation?. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, n.206, pp.493-518. DOI: 10.4000/com.6718.
- Taleb A, Belaidi N, Sanchez-Perez J M, Vervier P, Sauvage S, Gagneur J (2008):** The role of the hyporheic zone of a semi-arid gravel bed stream located downstream of a heavily polluted reservoir (Tafna wadi, Algeria). *River Research and Applications*, v. 24, n. 2, pp. 183–196.  
<https://doi.org/10.1002/rra.1039>.
- Taibi S, Meddi M, Mahé G, Assanin A (2014):** Variability of Annual and Extreme Rainfall over Northern Algeria and Relationship with Teleconnections Patterns. *Proceedings of the Mediterranean Meeting on “Monitoring Modelling and Early Warning of Extreme. Events*

Triggered by Heavy Rainfalls”, PON 01\_01503 - MED-FRIEND project. University of Calabria, Cosenza.

**Taibi S, Meddi M, Souag D, Mahe G (2013):** Evolution et régionalisation des précipitations au nord de l’Algérie (1936–2009). *Climat and Land Surface Changes in Hydrology. Proceedings of H01 IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly Gothenburg Sweden July 2013 (IAHS Publ 359 2013)*, p. 191-197. <https://www.researchgate.net/publication/273060403>. Consulter le 24 November 2018

**Taithe B (2006):** Algerian orphans and colonial Christianity in Algeria, 1866– 1939. *Fr. Hist*, v. 20, n. 3, pp. 240–259, doi:10.1093/fh/cr1019.

**Touitou M, Abul Quasem A (2018):** Climate change and water resources in Algeria: Vulnerability, impact and adaptation strategy. *Economic and Environmental Studies*, v. 18, n. 1, pp. 411-429, <http://dx.doi.org/10.25167/ees.2018.45.23>

**Trenberth K E (2005):** The Impact of Climate Change and Variability on Heavy Precipitation, Floods, and Droughts. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Edited by M G Anderson.

**Tsiourtis N X (2008):** Experiences for drought management plans in Cyprus. In: López-Francos A. (ed). *Drought management: scientific and technological innovations*. Zaragoza, p. 171-178 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 80).

**United Nations environment, Mediterranean action plan (2017):** Mediterranean Quality Status Report.

**United Nations (1988):** Ground Water in North and West Africa. *Natural Resources Water Series*, v. 18, n. 18, ISBN 92-1-104203-8

**Ulbrich U, May W, Li L, Lionello P, Pinto J G, Somot S (2006):** The Mediterranean Climate Change under Global Warming. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, v. 4, n. 2006, pp. 99-415. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80011-X](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80011-X).

**U.S. Global Change Research Program USGCRP (2016):** The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States: A Scientific Assessment, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, 312 pp. <http://dx.doi.org/10.7930/JOR49NQX>.

**Wang Y, Xu Y, Tabari H, Wang J, Wang Q, Song S, Hu Z (2020):** Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall in the Yangtze River Delta, eastern China. *Atmospheric Research*, v. 213, n. 2020, p. 1-14.

**White P G (2013):** Strengthening adaptive capacities to the impacts of climate change in resource poor. Small-scale aquaculture and aquatic resources-dependent sector in the south and south-

east Asian region-aqua climate. A Review of Climate Change Model Predictions and Scenario Selection for impacts on Asian Aquaculture, AquaClimate.

**Wilhite D A, Glantz M H (1985):** Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, v. 10, n. 3, pp. 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>.

**Wolfe J (2000):** Volcanoes and Climate Change. Earth Observatory [Article], Retrieved from <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Volcano>.

**World Development Report (2010):** The science of climate change, World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/4387> License: CC BY 3.0 IGO.”

**World meteorological organization (WMO) (2011):** Guide to Climatological Practices. 2011 edition. WMO-No. 100

**Wu N, Ding X, Wen Z, Chen G, Meng Z, Lin L, Min J (2020)** Contrasting frontal and warm-sector heavy rainfalls over South China during the early-summer rainy season. *Atmospheric Research*, v. 235, n. 2020, p. 104693.

**Yevjevich V, Da Cunha L, Vlachos E (1984):** Coping with Droughts; Water Resources. Publications: Littleton, CO, USA.

**Zettam A, Taleb A, Belaidi N, Sauvage S, Boithias L, Sánchez-Pérez J (2017):** Modelling hydrology and sediment transport in a semi-arid and anthropized catchment using the swat model: The case of the Tafna River (Northwest Algeria). *Water*, v. 9, n. 3. Doi: 103390/w9030216