

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **THESE**

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR EN SCIENCES**

**En** : Hydraulique

**Spécialité** : Hydraulique

**Par** : Elouissi Abdelkader

### **Sujet**

**CHANGEMENT CLIMATIQUE, IMPACTS ET  
VULNERABILITE. CAS DU BASSIN VERSANT DE LA MACTA**

Soutenue publiquement, le 01/12/2016, devant le jury composé de :

M Bouchelkia Hamid	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M Habi Mohammed	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M Remini Boualem	Professeur	Univ. Blida	Examineur 1
M Saad Hamoudi Abdelamir	Professeur	Univ. Chlef	Examineur 2
M Hamimed Abderrahmane	MCA	Univ. Mascara	Examineur 3

# Remerciements

Au bout de cette thèse. Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au Pr. Mohammed Habi qui fut pour moi un directeur de thèse attentif et disponible malgré ses engagements et occupations. Je le remercie pour son intérêt, son soutien et son analyse soignée ainsi que ses commentaires judicieux, lesquels m'ont permis de raffiner davantage certains points de l'analyse et de l'interprétation de mes données.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien du Pr. Zekai Şen, de l'université technique d'Istanbul, Turquie, pour ses conseils et ses orientations pertinentes et ses réponses presque immédiates à mes interrogations nombreuses. Un merci particulier au personnel de la fondation de l'eau de Turquie (Turkish Water Foundation) pour leurs accueils chaleureux.

Je souhaiterais également remercier le Dr. Bouchelkia Hamid, pour avoir accepté de juger ce travail et d'en présider le jury de soutenance.

Les examinateurs qui ont accepté de siéger sur le jury de cette thèse doivent aussi trouver ici l'expression de ma reconnaissance, soit messieurs Remini Boualem, Saad Hamoudi Abdelamir et Hamimed Abderrahmane.

Au terme de ce parcours, je remercie enfin celles et ceux qui me sont chers et que j'ai quelque peu délaissés ces derniers mois pour achever cette thèse. Leurs attentions et encouragements m'ont accompagnée tout au long de ces années. Je suis redevable à mes parents, ma femme et mes enfants, pour leur soutien moral et matériel et leur confiance indéfectible dans mes choix. Enfin, j'ai une pensée toute particulière pour mon père, Mohammed, à qui je lui dois toute ma vie.

Mes remerciements vont aussi à mes ami(e)s et collègues qui ont su m'aider que ce soit au niveau de la recherche, mais aussi pour le support moral.

## المخلص

التغيرات المناخية يمكن أن يكون لها عواقب هامة من حيث التأثير على الأنشطة البشرية. الهدف من هذا البحث هو تحديد تأثير تغير المناخ على مياه الأمطار لـ 42 محطة تنتمي لمسقط المياه المقطع. تم اختيار الفترة 1970-2011 لهذه الدراسة. في البداية، تتم معالجة بيانات الأمطار الشهرية لتشكيل سلسلة كاملة. في دراسة الأمطار الغزيرة لفترات عودة مختلفة (10 و 100 و 1000 سنة)، نجد أن القيم المقدرة لجميع المحطات انخفضت لشهر مارس. في خطوة أخرى، ثلاث طرق (r لبيرسون، كيندال  $\tau$  و  $\rho$  سبيرمان) استخدمت للكشف عن الاتجاهات الشهرية، الفصلية والسببية. أظهرت الدراسة الشهرية تناقص شهر مارس. تحدد الدراسة الموسمية انخفاض في هطول الأمطار لفصل الشتاء والربيع ضد زيادة في الصيف. من وجهة نظر سنوية، انسجمت جميع الطرق الثلاث على الاتجاه النازل عند المحطات التي تقع في شمال وسط مسقط المياه المقطع والاتجاه التصاعدي للمحطات الواقعة في الجنوب. نفس النتائج أكدت باستخدام الطريقة المبتكرة لـ  $\text{Sen}$ . وأخيراً، قمنا بتصغير سلم توقعات الأمطار (2010-2100) لنموذج المناخ CCSM4 من مركز الأبحاث NCAR على مستوى محطة مطمور. النتائج تتنبأ بفترات جفاف أكثر تردداً. أيضاً، الدراسة تتوقع فترتين طويلتين من تناقص الأمطار السنوية تتخللها فترة قصيرة من الإرتفاع.

**الكلمات المفتاحية:** القطع - تغير المناخ - اتجاهات الأمطار - تغيرات الأمطار - نماذج المناخ - توقعات الأمطار.

## Abstract

Climate change can have important consequences in terms of impact on human activities. The aim of this thesis is to determine the effect of rainfall climate change of 42 Macta watershed stations. The 1970-2011 period is chosen for this study. Initially the monthly rainfall data are processed to form complete series. In the extreme rainfall study, for different return periods (10, 100 and 1000 years), we find that the estimated values of all stations are down for March. In a further step, three methods (Bravais Pearson  $r$ , Kendall  $\tau$  and Spearman  $\rho$ ) are used to detect monthly, seasonal and annual trends. The monthly study shows the decrease of March. The study determines winter and spring rainfall reduction against the summer increase. From an annual view point, all three methods are harmonized on the downward trend of stations located in North Central Macta and the upward trend of stations in southern area. This result is confirmed using the innovative method of  $\text{Sen}$ . Finally, we reduce the scale of precipitation forecasts (2010 to 2100) from the climate model CCSM4 from NCAR center at the Matemore station. The results provide more frequent droughts periods. Alos, Matemore annual rainfall will have two longs decreasing periods alternating with a short increasing one.

**Keywords:** Macta – Climate change – Trend – Precipitations variability – Climates models – Rainfall forecast

## Résumé

Les changements climatiques peuvent avoir d'importantes conséquences en termes d'impact sur les activités humaines. Le but de cette thèse est de déterminer l'effet du changement climatique sur la pluviométrie de 42 stations du bassin versant de la Macta. La période 1970-2011 est choisie pour notre étude. Dans un premier temps, les données de la pluviométrie mensuelle sont traitées pour former des séries complètes. Lors de l'étude des pluies extrêmes pour différentes périodes de retour (10, 100 et 1000ans), nous trouvons que les valeurs estimées de toutes les stations sont en baisse pour le mois de mars. Dans une autre étape, trois méthodes ( $r$  de Bravais Pearson,  $\tau$  de Kendall et  $\rho$  de Spearman) sont utilisées pour détecter les tendances mensuelles, saisonnière et annuelles. L'étude mensuelle montre la décroissance du mois de mars. L'étude saisonnière détermine la réduction de la pluviométrie de la saison d'hiver et printemps contre l'augmentation de celle de l'été. D'un point de vue annuel, toutes les trois méthodes s'harmonisent sur la tendance à la baisse des stations situées au Centre-Nord du bassin de la Macta et la tendance à la hausse des stations situées au Sud de la Macta. Ce dernier résultat est confirmé en utilisant la méthode innovante de  $\text{Sen}$ . Enfin, nous réduisons l'échelle des prévisions des précipitations (de 2010 à 2100) issues du modèle climatique CCSM4 du centre NCAR au niveau de la station de Matemore. Les résultats prévoient des périodes de sècheresses de plus en plus fréquentes. Aussi, la pluviométrie annuelle de la station de Matemore aura deux longues périodes a tendances décroissantes alternées par une courte période d'augmentation relative.

**Mots clés:** Macta – Changement climatique – Tendances – Variabilité des précipitations – Modèles climatiques – Prévision de la pluviométrie.

# Table des matières

Introduction.....	1
I. Chapitre 1 : Le changement climatique .....	4
1.1. Définition .....	4
1.1.1. Termes clés et distinctions .....	4
1.1.1.1. Climat .....	4
1.1.1.2. Variabilité climatique .....	5
1.1.1.3. Système climatique mondial.....	5
1.1.1.4. Changement d'affectation des terres .....	5
1.1.1.5. Changements climatiques .....	5
1.1.1.6. Réchauffement planétaire .....	6
1.1.1.7. Gaz à effet de serre .....	6
1.1.1.8. L'effet de serre .....	7
1.1.1.9. Forçage radiatif.....	8
1.1.1.10. Effets indirects des aérosols .....	9
1.1.1.10.1. Premier effet indirect .....	9
1.1.1.10.2. Second effet indirect.....	9
1.1.1.11. L'effet de serre additionnel .....	9
1.1.1.12. Le "fonctionnement" de l'effet de serre .....	10
1.1.1.13. Potentiel de réchauffement global (PRG).....	11
1.1.1.14. L'équivalent carbone .....	12
1.1.1.15. Augmentation de l'effet de serre .....	13
1.1.1.16. Changement climatique (explications scientifiques) .....	13
1.1.1.17. Changement climatique rapide .....	14
1.2. Les changements climatiques régionaux.....	15
1.3. Le changement climatique global « mondial» .....	15
1.3.1. Causes des variations climatiques à l'échelle de la planète .....	16
1.3.1.1. Les cycles glaciaires-interglaciaires .....	17
1.3.1.2. L'origine des cycles glaciaires-interglaciaires .....	17
1.3.1.3. Glacières .....	18
1.3.1.4. Interglaciaires .....	18
1.3.1.5. Causes du réchauffement planétaire .....	19
1.3.1.5.1. Causes naturelles .....	19
1.3.1.5.2. Les activités humaines qui contribuent au changement climatique.....	19
1.3.2. La situation passée du climat mondial.....	21
1.3.3. La situation actuelle du climat mondial .....	22
1.3.4. Le future du climat mondial «Prévisions».....	22
1.3.4.1. Les Modèles climatiques .....	23
1.3.5. Les conséquences probables des changements climatiques .....	23
1.3.6.1. Les conséquences physiques du changement climatique .....	24
1.3.6.1.1. La montée des eaux et fonte des glaciers .....	24
1.3.6.1.2. L'humidité absolue.....	27
1.3.6.1.3. La précipitation.....	27
1.3.6.1.4. La circulation thermo haline .....	27
1.3.6.1.5. Glaces et couverture neigeuse .....	28
1.3.6.1.6. Des phénomènes à très long terme .....	28
1.3.6.2. Les conséquences du changement climatique sur l'homme et la nature.....	28
1.3.6.2.1. Au niveau biologique et écologique .....	29
1.3.6.3. Conséquences positives pour l'humanité .....	30
1.3.7. Les effets du changement climatique sur les ressources en eau.....	31
1.3.8. Les incidences du changement climatique.....	33
1.3.8.1. Incidence du changement climatique sur les régions polaires.....	33
1.3.8.2. Incidence du changement climatique sur les forets .....	33

1.3.9. Le changement climatique à l'échelle de la méditerranée .....	34
1.3.9.1. Changements des régimes thermiques et hydrologiques «impact sur les hydro systèmes continentaux et leur peuplement» .....	35
1.3.9.1.1. Le changement thermique .....	36
1.3.9.1.2. Le changement hydraulique.....	36
1.3.9.2. Conséquences possibles des changements climatiques sur la flore et la végétation du bassin méditerranéen .....	36
1.3.9.2.1. L'influence des "changements globaux" .....	37
1.3.9.2.2. Les maladies émergentes consécutives au réchauffement et à l'extension des zones humides.....	38
1.4. Le changement climatique aux pays du Maghreb .....	38
1. 5. Le changement climatique en l'Algérie .....	39
II. Chapitre 2 : Les modèles climatiques .....	43
2.1 Introduction .....	43
2.2. Modèles climatiques .....	44
2.3. Principe de fonctionnement d'un modèle climatique .....	47
2.4. Liste des modèles de circulation atmosphérique .....	48
2.5. Scénarios climatiques.....	49
2.5.1. Les scénarios du GIEC .....	50
2.5.1.1. Scénarios SRES (Special Report on Emission Scenarios) .....	51
2.5.1.2. Nécessité de définir des nouveaux scénarios (scénarios RCP).....	54
2.6. Incertitudes.....	61
2.6.1. Causes d'incertitudes.....	62
2.6.1.1. Scénarios d'émission.....	62
2.6.1.2. Transformation : émissions concentrations .....	63
2.6.1.3. Modèle climatique .....	63
2.6.1.4. Régionalisation ou réduction d'échelle (RE).....	63
2.6.1.5. Modèles d'impacts .....	63
2.7. Techniques de réduction d'échelle (RE).....	64
2.7.1. Réduction d'échelle statistique (RES) .....	66
2.7.1.1. Les méthodes de réduction d'échelle statistique (RES) .....	68
2.7.1.1.1. Les méthodes de régression linéaire.....	68
2.7.1.1.1.1. La régression linéaire multiple .....	68
2.7.1.1.1.2. Méthode de changement de facteur (LOCI) .....	69
2.7.1.1.1.3. La régression canonique .....	69
2.7.1.1.1.4. Le réseau de neurones artificiel .....	69
2.7.1.1.2. Les méthodes de classification synoptique du temps .....	69
2.7.1.1.3. Les générateurs stochastiques de conditions météorologiques.....	70
2.7.1.1.4. La méthode des deltas.....	71
2.8. Conclusion.....	72
III. Chapitre 3 : Zone d'étude .....	73
3.1. Présentation géographique .....	73
3.1.1. La situation géographique.....	73
3.2. Caractéristique des rivières .....	75
3.2.1. Oued El-Hammam .....	75
3.2.2. Oued Mékéra.....	75
3.2.3. Oued Saida.....	76
3.3. Esquisse hydrologique.....	76
3.3.1. Cycle hydrologique .....	78
3.4. Le réseau hydrographique .....	79
3.5. Le réseau hydro-climatologique .....	79

3.6. Potentialités des ressources en eau superficielle dans le bassin de la Macta .....	80
IV. Chapitre 4 : Climatologie .....	81
4.1. Introduction .....	81
4.2. Le climat .....	81
4.2.1. Eléments du climat .....	82
4.2.1.1. La température .....	82
4.2.1.2. Les vents .....	82
4.2.1.3. Les précipitations .....	82
4.2.2. Les facteurs du climat .....	83
4.3. Collecte et traitement des données .....	83
4.3.1. Collecte des données .....	83
4.3.2. Choix des stations et de la période de l'étude .....	83
4.3.3. Etude de l'homogénéité .....	86
4.3.4. Valeurs aberrantes .....	87
4.3.4.1. Méthodes analytiques .....	89
4.3.4.2. Méthodes graphiques .....	89
4.3.4.2.1. Le simple cumul .....	89
4.3.4.2.2. Le double cumul (ou double masse) .....	90
4.3.4.2.3. Méthode du cumul des résidus .....	91
4.3.5. Estimation des données manquantes .....	95
4.3.5.1. Méthodes de comblement des lacunes .....	95
4.3.5.1.1. Méthode de régression simple .....	95
4.3.5.1.2. Méthode de régression multiple .....	96
4.3.5.1.3. Méthode de l'analyse en composante principale (ACP) .....	96
4.4. Période de retour .....	99
4.5. Conclusion .....	102
V. Chapitre 5 : Etude de l'évolution de la pluviométrie (tendances) .....	103
5.1. Introduction .....	103
5.2. Etude de la tendance (Coefficient de corrélation de Bravais-Pearson) .....	104
5.2.1. Introduction .....	104
5.2.2. Méthodologie .....	104
5.2.3. Résultats et discussion .....	105
5.2.3.1. Etude de la tendance mensuelle .....	105
5.2.3.1.1. Conclusion .....	122
5.2.3.2. Etude de la pluviométrie saisonnière .....	123
5.2.3.2.1. Conclusion .....	134
5.2.3.3. Etude de la pluviométrie annuelle .....	134
5.2.3.4. Conclusion .....	138
5.3. Etude de la tendance par le test de Kendall .....	139
5.3.1. Introduction .....	139
5.3.2. Méthodologie .....	140
5.3.2.1. Approximation des échantillons assez grands .....	141
5.3.2.1.1. Traitement des ex-æquo .....	141
5.3.3. Résultats et discussion .....	142
5.3.3.1. Etude de la tendance mensuelle .....	142
5.3.3.1.1. Conclusion .....	155
5.3.3.2. Etude de la tendance saisonnière .....	156
5.3.3.2.1. Conclusion .....	160
5.3.3.3. Etude de la tendance annuelle .....	161
5.3.4. Conclusion .....	163
5.4. Etude des tendances (coefficient de corrélation de Spearman) .....	163
5.4.1. Introduction .....	163

5.4.2. Méthodologie .....	164
5.4.2.1. Traitement des ex-aequo.....	165
5.4.3. Résultats et discussion.....	165
5.4.3.1. Etude de la tendance mensuelle.....	165
5.4.3.1.1. Conclusion.....	178
5.4.3.2. Etude de la tendance saisonnière .....	179
5.4.3.2.1. Conclusion.....	183
5.4.3.3. Etude de la tendance annuelle .....	184
5.4.4. Conclusion .....	185
5.5. Etude des tendances par l'Analyse innovante de la tendance de la pluviométrie.....	186
5.5.1. Introduction.....	186
5.5.2. Méthodologie .....	186
5.5.3. Résultats et discussion.....	187
5.5.4. Conclusion .....	199
5.6. Conclusion.....	200
VI. Chapitre 6 : Prévion de la pluviométrie .....	201
6.1. Introduction .....	201
6.2. Méthodologie .....	201
6.3. Résultats et discussion .....	205
6.4. Conclusion.....	214
7. Conclusion et perspectives .....	216
7.1. Conclusion générale .....	216
7.2. Perspectives .....	218
Références bibliographiques .....	219

# Liste des figures

<b>Figure 1.1:</b> Température moyenne global de la Terre (en degré Celsius) et tendance sur 15 ans (Swingedouw D et al.,2010).....	21
<b>Figure 1.2:</b> Courbe de tendance du niveau global moyen des mers (1993-2014) (CSIRO, 2015)...	26
<b>Figure 1.3:</b> Cartes des précipitations normales de septembre 2015 à janvier 2016 (en pourcent) par rapport à la période de base 1961-1990 (NOAA, 2014) .....	32
<b>Figure 2.1 :</b> Exemple d'un maillage horizontal et vertical (Spencer and Braswell, 2008).....	46
<b>Figure 2.2 :</b> Comparaison des modèles climatiques par leurs dimensions de maille (IPCC, 2007) .	47
<b>Figure 2.3 :</b> Émissions mondiales de GES (en Gt équiv.-CO <sub>2</sub> ) (IPCC, 2007).....	54
<b>Figure 2.4 :</b> Élaboration en parallèle des scénarios climatique (O'Neill et Schweizer, 2011) .....	57
<b>Figure 2.5 :</b> Représentation de tous les agents équivalent-CO <sub>2</sub> du forçage atmosphérique, selon quatre scénarios RCP (en ppm) (IPCC, 2013). .....	59
<b>Figure 2.6 :</b> La cascade des incertitudes caractéristique d'une étude des impacts du changement climatique (Boé, 2007) .....	62
<b>Figure 2.7 :</b> La structure du modèle de réduction d'échelle statistique .....	66
<b>Figure 3.1 :</b> Situation géographique du bassin versant de la Macta .....	74
<b>Figure 3.2 :</b> Localisation du bassin de la Macta dans le contexte administratif .....	74
<b>Figure 3.3 :</b> Réseau hydrographique du bassin versant de la Macta (Meddi et al.,2009).....	77
<b>Figure 4.1:</b> Carte des stations retenues .....	85
<b>Figure 4.2:</b> Pourcentage des lacunes par année .....	86
<b>Figure 4.3:</b> Ajustement à la loi Racine Normale de quelques stations (mois de janvier).....	87
<b>Figure 4.4:</b> Méthode des doubles cumuls (doubles masses) (Laborde, 2013).....	91
<b>Figure 4.5:</b> Exemple de détection des valeurs aberrantes par la méthode des résidus cumulés .....	92
<b>Figure 4.6:</b> Exemple de détection des anomalies .....	94
<b>Figure 4.7:</b> Proportions entre valeurs période de retour de la période 1970-1991 et 1992-2011...	101
<b>Figure 4.8:</b> Nombre de stations ayant des proportions négatives .....	102
<b>Figure 5.1 :</b> Exemple des Courbes de la pluviométrie mensuelle avec leurs droites de tendances	107
<b>Figure 5.2 :</b> Nombre de stations pour chaque type de tendance mensuelle (r de Pearson) .....	110
<b>Figure 5.3 :</b> Carte des tendances du mois de janvier (r de Pearson).....	111
<b>Figure 5.4 :</b> Carte des tendances du mois de février (r de Pearson) .....	112
<b>Figure 5.5 :</b> Carte des tendances du mois de mars (r de Pearson) .....	113
<b>Figure 5.6 :</b> Carte des tendances du mois d'avril (r de Pearson).....	114
<b>Figure 5.7 :</b> Carte des tendances du mois de mai (r de Pearson).....	115
<b>Figure 5.8 :</b> Carte des tendances du mois de juin (r de Pearson).....	116
<b>Figure 5.9 :</b> Carte des tendances du mois de juillet (r de Pearson) .....	117
<b>Figure 5.10 :</b> Carte des tendances du mois d'aout (r de Pearson) .....	118
<b>Figure 5.11 :</b> Carte des tendances du mois de septembre (r de Pearson).....	119
<b>Figure 5.12 :</b> Carte des tendances du mois d'octobre (r de Pearson) .....	120
<b>Figure 5.13 :</b> Carte des tendances du mois de novembre (r de Pearson) .....	121
<b>Figure 5.14 :</b> Carte des tendances du mois de décembre (r de Pearson).....	122
<b>Figure 5.15 :</b> Courbes de la pluviométrie saisonnière (Automne) (avec droites de tendances) .....	125
<b>Figure 5.16 :</b> Courbes de la pluviométrie saisonnière (Hiver)(avec droites de tendances) .....	126
<b>Figure 5.17 :</b> Courbes de la pluviométrie saisonnière (Printemps) (avec droites de tendances) ...	127
<b>Figure 5.18 :</b> Courbes de la pluviométrie saisonnière (Eté) (avec droites de tendances) .....	128
<b>Figure 5.19 :</b> Nombre de station pour chaque type de tendance saisonnière (r de Pearson) .....	129
<b>Figure 5.20 :</b> Carte de la tendance de la saison de l'Automne (r de Pearson) .....	130
<b>Figure 5.21 :</b> Carte de la tendance de la saison de l'Hivers (r de Pearson).....	131
<b>Figure 5.22 :</b> Carte de la tendance de la saison du Printemps (r de Pearson) .....	132
<b>Figure 5.23 :</b> Carte de la tendance de la saison de l'Eté (r de Pearson) .....	133

<b>Figure 5.24</b> : Pluviométrie annuelle des stations étudiées .....	135
<b>Figure 5.25</b> : Pluviométrie annuelle des stations étudiées .....	136
<b>Figure 5.26</b> : Nombre de stations pour chaque type de la tendance annuelle (r de Pearson) .....	137
<b>Figure 5.27</b> : Carte de la tendance de la pluviométrie annuelle (r de Pearson) .....	138
<b>Figure 5.28</b> : Nombre de stations par type de tendance ( $\tau$ de Kendall) .....	143
<b>Figure 5.29</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de janvier) .....	144
<b>Figure 5.30</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de février).....	145
<b>Figure 5.31</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de mars).....	146
<b>Figure 5.32</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois d'avril) .....	147
<b>Figure 5.33</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de mai).....	148
<b>Figure 5.34</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de juin) .....	149
<b>Figure 5.35</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de juillet) .....	150
<b>Figure 5.36</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois d'août).....	151
<b>Figure 5.37</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de septembre) .....	152
<b>Figure 5.38</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois d'octobre).....	153
<b>Figure 5.39</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de novembre).....	154
<b>Figure 5.40</b> : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de décembre) .....	155
<b>Figure 5.41</b> : Nombre de stations de la tendance saisonnière ( $\tau$ de Kendall) .....	156
<b>Figure 5.42</b> : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'automne ( $\tau$ de Kendall) ....	157
<b>Figure 5.43</b> : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'hiver ( $\tau$ de Kendall).....	158
<b>Figure 5.44</b> : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison du printemps ( $\tau$ de Kendall)....	159
<b>Figure 5.45</b> : Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'été ( $\tau$ de Kendall) .....	160
<b>Figure 5.46</b> : Nombre de stations pour chaque type de la tendance annuelle ( $\tau$ de Kendall) .....	161
<b>Figure 5.47</b> : Carte de la tendance annuelle des stations étudiées ( $\tau$ de Kendall) .....	162
<b>Figure 5.48</b> : Nombre de stations pour chaque type de tendance ( $\rho$ de Spearman).....	166
<b>Figure 5.49</b> : Carte des tendances des stations du mois de janvier ( $\rho$ de Spearman) .....	167
<b>Figure 5.50</b> : Carte des tendances des stations du mois de février ( $\rho$ de Spearman) .....	168
<b>Figure 5.51</b> : Carte des tendances des stations du mois de mars ( $\rho$ de Spearman).....	169
<b>Figure 5.52</b> : Carte des tendances des stations du mois d'avril ( $\rho$ de Spearman) .....	170
<b>Figure 5.53</b> : Carte des tendances des stations du mois de mai ( $\rho$ de Spearman).....	171
<b>Figure 5.54</b> : Carte des tendances des stations du mois de juin ( $\rho$ de Spearman) .....	172
<b>Figure 5.55</b> : Carte des tendances des stations du mois de juillet ( $\rho$ de Spearman) .....	173
<b>Figure 5.56</b> : Carte des tendances des stations du mois d'août ( $\rho$ de Spearman).....	174
<b>Figure 5.57</b> : Carte des tendances des stations du mois de septembre ( $\rho$ de Spearman) .....	175
<b>Figure 5.58</b> : Carte des tendances des stations du mois d'octobre ( $\rho$ de Spearman).....	176
<b>Figure 5.59</b> : Carte des tendances des stations du mois de novembre ( $\rho$ de Spearman).....	177
<b>Figure 5.60</b> : Carte des tendances des stations du mois de décembre ( $\rho$ de Spearman) .....	178
<b>Figure 5.61</b> : Nombre de stations pour chaque type de tendance saisonnière .....	179
<b>Figure 5.62</b> : Carte des tendances de l'automne ( $\rho$ de Spearman) .....	180
<b>Figure 5.63</b> : Carte des tendances de l'hiver ( $\rho$ de Spearman) .....	181
<b>Figure 5.64</b> : Carte des tendances du printemps ( $\rho$ de Spearman).....	182
<b>Figure 5.65</b> : Carte des tendances de l'été ( $\rho$ de Spearman) .....	183
<b>Figure 5.66</b> : Nombre de stations pour chaque type de tendance annuelle ( $\rho$ de Spearman) .....	184
<b>Figure 5.67</b> : Carte des tendances annuelles ( $\rho$ de Spearman) .....	185
<b>Figure 5.68</b> : Modèle de la méthode de tendance innovante (Elouissi et al., 2016).....	187
<b>Figure 5.69</b> : Tendances innovantes descendantes (a).....	189
<b>Figure 5.70</b> : Tendances innovantes ascendantes .....	192
<b>Figure 5.71</b> : Tendances innovantes (absence de tendance) .....	193
<b>Figure 5.72</b> : Répartition spatiale de la tendance de la pluviométrie mensuelle .....	196
<b>Figure 5.73</b> : Graphe de l'identification de la variabilité régionale (moyenne arithmétique) .....	197
<b>Figure 5.74</b> : Graphe de l'identification de la variabilité régionale (écart-type).....	198
<b>Figure 5.75</b> : Graphe de l'identification de la variabilité régionale (pente de la tendance) .....	199
<b>Figure 6.1</b> : Les différentes formes de la fonction de dépendance spatiale (SDF).....	203
<b>Figure 6.2</b> : La structure de la méthode de réduction d'échelle quadratique (Şen et al., 2012) .....	204

<b>Figure 6.3 :</b> Carte de localisation des stations avec les noeuds du modèle CCSM4 .....	205
<b>Figure 6.4 :</b> Comparaison entre les valeurs observées et ré estimées de la période 1970-2011.....	206
<b>Figure 6.5:</b> Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station Ras El ma) .....	207
<b>Figure 6.6:</b> Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station SBA) .....	208
<b>Figure 6.7:</b> Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station Hammam Rabi) ..	208
<b>Figure 6.8:</b> Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station Matemore) .....	209
<b>Figure 6.9:</b> Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station Ferme Assorain) .	210
<b>Figure 6.10:</b> Fréquences des précipitations mensuelles (période de référence Vs 2010-2040).....	211
<b>Figure 6.11:</b> Fréquences des précipitations mensuelles (période de référence Vs 2040-2070).....	211
<b>Figure 6.12:</b> Fréquences des précipitations mensuelles (période de référence Vs 2070-2100).....	212
<b>Figure 6.13:</b> Pourcentage du nombre de mois secs (<30mm) par mois.....	213
<b>Figure 6.14:</b> Fréquence de la durée de la sècheresse en mois .....	214

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Le pouvoir de réchauffement global des gaz à effet de serre (CITEPA, 2015) .....	12
<b>Tableau 1.2</b> : Bilan et potentiel en eau renouvelable en km <sup>3</sup> /an (moyenne 1981-2010) (Mutin, 2011; FAO, 2010) .....	40
<b>Tableau 2.1</b> : Liste des modèles de circulation atmosphérique .....	49
<b>Tableau 2.2</b> : Les quatre familles de scénarios du quatrième rapport et les prévisions des hausses de températures globales moyennes en 2100 (IPCC, 2001) .....	52
<b>Tableau 2.3</b> : Estimation des impacts liés au développement démographique et économique (Carter, 2007).....	53
<b>Tableau 2.4</b> : Les quatre scénarios RCP retenue par le GIEC (Moss et al, 2008) .....	57
<b>Tableau 2.5</b> : Les modèles respectant les RCP et retenus par le GIEC (Moss et al, 2008) .....	58
<b>Tableau 4.1</b> : Liste des stations météorologiques retenues.....	84
<b>Tableau 4.2</b> Groupes de stations formées .....	93
<b>Tableau 4.3</b> : Exemple de reconstitution des données manquantes.....	98
<b>Tableau 4.4</b> Estimation des valeurs de la pluviométrie pour différentes périodes de retour.....	99
<b>Tableau 4.5</b> Proportion des valeurs estimées (période1/période2) pour chaque période de retour (mois de Janvier).....	100
<b>Tableau 5.1</b> : Pluviométrie mensuelle des stations retenues du mois de septembre .....	105
<b>Tableau 5.2</b> : Symbole de la tendance mensuelle pour chaque station (r de Pearson).....	109
<b>Tableau 5.3</b> : Répartition des mois au sein des saisons .....	123
<b>Tableau 5.4</b> : Données de la pluviométrie saisonnière (Automne) (1970-2011) .....	124
<b>Tableau 5.5</b> : Données de la pluviométrie saisonnière (hiver) (1970-2011).....	124
<b>Tableau 5.6</b> : Données de la pluviométrie saisonnière (Printemps) (1970-2011).....	124
<b>Tableau 5.7</b> : Données de la pluviométrie saisonnière (Eté) (1970-2011).....	124
<b>Tableau 5.8</b> : Signe de la tendance selon le test de Kendall.....	142
<b>Tableau 5.9</b> : Les paramètres de l'analyse de tendance innovante .....	194

# Liste des acronymes et symboles

AR4 : 4<sup>ème</sup> rapport d'évaluation.

AR5 : 5<sup>ème</sup> rapport d'évaluation.

CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CMIP-5: Coupled Model Intercomparison Project.

CST: Classification synoptique du temps.

GCM : General Circulation Model ou Modèle de Circulation Générale.

GES : Gaz à effet de serre.

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

IAMs: Integrated Assessment Models.

IAMC: Integrated Assessment Modeling Consortium.

MCG : Modèle du Climat Global.

MCGA: Modèles du Climat Global Atmosphérique.

MCGAO: Modèle du Climat Global Atmosphère Océan.

MCR: Modèles Climatiques Régionaux.

NAO : North Atlantic Oscillation.

NetCDF: Network Common Data Form.

OMM : Organisation Mondiale de Météorologie.

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economique.

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

RCP : Representative Concentration Pathway (Profils représentatifs d'évolution de concentration des GES).

RE : Réduction d'échelle.

RES : Réduction d'échelle statistique.

RNA: Réseau de neurones artificiel.

SDF : Spatial Dependence Function (Fonction de Dépendance Spatiale)

SRES : Special Report on Emissions Scenarios.

WCRP: World Climate Research Programme.



## **Introduction**

Partout dans le monde, le changement climatique devient de plus en plus une préoccupation importante et pour pouvoir s'adapter aux conséquences qui en découlent, les changements attendus doivent tout d'abord être compris. On peut affirmer que la climatologie a maintenant atteint un certain niveau de maturité qui la rend plus précieuse et utile pour les décideurs (Charron, 2014).

Le changement climatique est devenu rapidement une question qui préoccupe, non seulement les scientifiques, mais toute la communauté internationale. Ses conséquences représentent un défi pour l'humanité. Ce défi est dans les deux sens : chance et risque. Certes le risque est considérable et ne doit pas être ignoré. Mais un tel risque peut néanmoins être une chance pour l'humanité. On peut y voir une occasion exceptionnelle de prendre conscience de notre communauté de destin et de tester notre capacité à changer la direction de la gouvernance mondiale avant qu'il ne soit trop tard (Delmas-Marty et al., 2015). Les scientifiques font donc l'objet de très fortes demandes de la part de la société pour comprendre les conséquences des changements climatiques sur les activités humaines.

La pluviométrie, son régime et ses tendances, sont les paramètres climatiques les plus touchés par le changement climatique. Il est donc nécessaire de s'intéresser aux effets du changement climatique sur les précipitations.

Dans cette thèse nous étudions les tendances de la pluviométrie dans 42 stations appartenant au bassin versant de la Macta puis, par une réduction d'échelle statistique (Statistical Downscaling), les changements prévus pour l'horizon 2100.

### **Pourquoi étudier les changements climatiques?**

C'est près de 90% de la population Algérienne, qui vit à environ 100 km de la mer, qui est concernée par les changements climatiques comme les sécheresses. De par la forte démographie du pays, on s'attend à ce que la population soit de plus en plus nombreuse et risque donc d'être de plus en plus sensibles aux risques climatiques. La sécheresse et la famine dans certains pays africains sont des événements qui nous incitent à comprendre ces changements pour mieux anticiper leurs occurrences dans l'avenir.

En raison de ses caractéristiques géographiques particulières et de sa position sur la région méditerranéenne, l'Algérie est parmi les pays les plus durement touchés par les impacts du changement climatique, même si elle contribue une très faible part des émissions mondiales des gaz à effet de serre (3,3 tonnes/personne) entre 2009 et 2013 (Banque mondiale, 2016). L'Algérie se classe en 96<sup>ème</sup> place dans l'indice de l'échelle du risque climatique global (Kreft et David, 2014), et

elle est considérée comme un pays à risque dans l'indice de vulnérabilité aux changements climatiques (Maplecroft, 2014).

### **Pourquoi étudier la pluviométrie de la Macta ?**

Cette thèse est en grande partie focalisée sur la pluviométrie du bassin versant de la Macta, qui est l'un des plus grands bassins de l'Algérie. Le bassin de la Macta couvre une grande partie de l'ouest Algérien. Cette partie du pays semble plus affecté par le changement climatique que les autres régions du pays.

De plus, le bassin de la Macta contient un réseau de stations pluviométriques relativement dense. Les stations couvrent aussi bien la partie Nord, côtière, que la partie Sud, saharienne. En outre, la disponibilité des données de cette zone nous a incités à l'étudier.

### **Pourquoi regarder les modèles climatiques ?**

La prévision des pluviométries est élaborée par les scientifiques du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ou en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change "IPCC"). Ces prévisions de changements climatiques sont établies grâce à des modèles de circulation générale de l'atmosphère ou Global Circulation Model (GCM), qui sont parfois l'objet de vives critiques. Actuellement, les GCMs sont la seule source, que nous ayons, pour prédire le futur. Les scientifiques du GIEC travaillent en continue pour améliorer les modèles tant sur l'aspect précision des calculs (paramètres physiques et réduction des biais) que sur l'aspect précision spatiale (échelle).

### **Objectifs de la thèse**

Au début de cette thèse, nous nous sommes demandés sur la tendance de la pluviométrie. La pluviométrie est-elle en diminution ? Et si oui dans quelle partie de notre région d'étude ? Au niveau de quel mois, quelle saison ? Ensuite, on s'est demandé quelles sont les quantités de la pluviométrie attendues d'ici l'an 2100 ?

### **Organisation de la thèse**

Dans les premiers chapitres nous donnons quelques notions essentielles concernant la terminologie des changements climatiques et des modèles de circulations généraux (MCG). Le chapitre I présente un aperçu général sur les changements climatiques et la terminologie qui l'accompagne. Le chapitre II fournit des détails sur les modèles climatiques globaux (MCG ou GCM).

Les chapitres suivants exposent le fond de notre travail. Tout d'abord, nous présentons dans le troisième chapitre, intitulé « Zone d'étude », le bassin versant de la Macta et ses principales caractéristiques. La collecte et traitement des données de la pluviométrie mensuelle sont ensuite étudiées dans le quatrième chapitre. Nous mentionnant comment détecter les valeurs aberrantes et par la suite comment combler les lacunes de nos séries pluviométriques.

Dans le chapitre 5, les séries de la pluviométrie mensuelles de 42 stations sont ainsi formées pour étudier les tendances temporelles (mensuelles, saisonnières et annuelles) et spatiales.

Au niveau du dernier chapitre, nous essayons d'appliquer la méthode de réduction d'échelle statistique (Statistical Downscaling) pour corriger les prévisions de la pluviométrie mensuelles issues du modèle CCSM4 (NCAR, USA). Pour arriver à cette fin deux étapes sont nécessaires. La première est l'utilisation d'une fonction de dépendance spatiale (Spatial Dependence Function, SDF) pour transférer les données de sortie de GCM à partir des points les plus proches de la grille vers les stations étudiées. La deuxième étape consiste à ajuster les précipitations mensuelles du scénario régionalisé avec les données pluviométriques locales (observées).

# I. Chapitre 1 : Le changement climatique

## 1.1. Définition

La confusion qui entoure la question du changement climatique est attribuable en partie au fait que de nombreux termes, scientifiques ou non, nous viennent à l'esprit lorsque nous entendons l'expression changement climatique. Il s'agit, par exemple, du «changement climatique», du «réchauffement de la planète» et de l'«augmentation de l'effet de serre», qui ont chacun une Signification Scientifique précise. Pourtant, ces concepts ont récemment été vulgarisés à la fois par la communauté scientifique et par les médias. Pour lever la contradiction et pour bien comprendre le problème du changement Climatique, nous devons absolument saisir la distinction entre les différents termes qui seront utilisés (Environnement Canada, 2014).

### 1.1.1. Termes clés et distinctions

#### 1.1.1.1. Climat

C'est l'ensemble des phénomènes météorologiques (température, humidité, ensoleillement, pression, vent, précipitations) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné.

Au sens étroit du terme, le climat désigne généralement le "temps moyen"; il s'agit plus précisément d'une description statistique en fonction de la moyenne et de la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années (la période classique, définie par l'organisation météorologique mondiale, est de 30 ans). Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent. Dans un sens plus large, le climat est la description statistique de l'état système climatique (Moussa et al., 2006).

Selon Moussa (2006), Les climats résultent:

- de facteurs cosmiques (la source d'énergie solaire: variation de l'activité solaire);
- de facteurs planétaires (répartition de cette énergie en fonction de la sphéricité de la Terre, de ses mouvements; de l'état, en même temps que du dynamisme de l'atmosphère);
- de facteurs géographiques (les terres, le lien entre l'atmosphère et les océans, les reliefs, la végétation, les volcans, les installations humaines).

### **1.1.1.2. Variabilité climatique**

C'est les variations de l'état moyen et autres variables statistiques (écart-type, apparition d'extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales autres que celles des phénomènes météorologiques particuliers. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne) ou à des variations du forçage externe naturel ou anthropique (variabilité externe) (IPCC, 2013).

### **1.1.1.3. Système climatique mondial**

À l'échelle mondiale, le climat obéit essentiellement à la quantité d'énergie que la Terre reçoit du soleil et qu'elle rejette dans l'espace. Le climat mondial subit aussi l'influence d'autres flux d'énergie à l'intérieur du système climatique comme tel. Ces flux d'énergie sont régulés par l'atmosphère (qui fournit les gaz, les aérosols, les nuages et les vents), les océans (qui aident à répartir la chaleur par l'entremise des courants), les précipitations (sous forme de pluie, de neige et de glace), l'eau (sous forme de lacs et de rivières) et les sols (qui reflètent ou absorbent l'énergie du soleil). Des changements dans l'un ou l'autre de ces éléments peuvent affecter l'équilibre de tout le système, entraînant un changement du climat. Prenons par exemple le phénomène météorologique El Niño (Ken, 2004).

### **1.1.1.4. Changement d'affectation des terres**

Changement apporté par l'homme dans l'utilisation ou l'aménagement des sols, qui peut entraîner une modification de la couverture terrestre. La modification de la couverture terrestre et le changement d'affectation des terres peuvent avoir une incidence sur l'albédo, l'évapotranspiration, les sources et les puits de gaz à effet de serre, ou sur d'autres propriétés du système climatique et peut donc avoir des répercussions sur le climat, au plan local ou à l'échelle du globe.

### **1.1.1.5. Changements climatiques**

Le changement climatique c'est le changement qui est attribué directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables (Nations unies, 1992)

On appelle aussi changement climatique la variation «significative» de la moyenne pluriannuelle d'un, ou des, paramètre du climat ou de sa variabilité persistant pendant une période prolongée (généralement des décennies ou plus).

Les changements climatiques sont davantage qu'une tendance au réchauffement planétaire. Ces hausses de températures peuvent, influencer sur le cycle hydrologique (pluviométrie et

évaporation), menacer la biodiversité, causer l'augmentation des niveaux des mers, augmenter les risques sanitaires (modifie la distribution des vecteurs de maladies infectieuses "moustiques etc... ) et changer l'écosystème des océans. Ce sont les communautés les plus pauvres qui seront le plus exposées aux impacts des changements climatiques, car elles disposent de moins de ressources pour investir dans la prévention et l'atténuation de leurs effets. Certaines des populations les plus à risque sont les paysans pratiquant l'agriculture de subsistance, les populations autochtones et celles qui vivent le long des côtes (Nations unies, 2016).

#### **1.1.1.6. Réchauffement planétaire**

Le réchauffement planétaire est l'un des phénomènes les plus importants du XX<sup>ème</sup> et XXI<sup>ème</sup> siècles. Effet de serre, montée du niveau des mers du fait de la fonte des glaces, climats déréglés un peu partout sur la planète, autant de problèmes qui sont le signe de changements profonds attestant du réchauffement de la planète, menaçant directement l'équilibre naturel, la faune, la flore et l'être humain (Sebastien, 2006).

Le réchauffement planétaire, également appelé réchauffement global ou, changement climatique est un phénomène d'augmentation, à l'échelle mondiale et sur plusieurs années, de la température moyenne des océans et de l'atmosphère. Ce terme est appliqué au changement climatique observé depuis environ vingt-cinq ans, c'est-à-dire depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle.

Au sens strict, le «réchauffement planétaire» et «refroidissement planétaire» font référencés aux périodes de réchauffement et refroidissement que la terre a connues depuis sa création. Toutefois, le terme «réchauffement planétaire» a été vulgarisé et englobe désormais tous les phénomènes en relation avec le changement climatique, et principalement l'influence des activités humaines sur le système climat.

#### **1.1.1.7. Gaz à effet de serre**

Les gaz à effet de serre sont les constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre.

Les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote, de formule N<sub>20</sub>) et l'ozone (O<sub>3</sub>).

Les gaz à effet de serre industriels incluent les halocarbones lourds (Fluorocarbones Chlorés incluant les Chlorofluorocarbures (CFC), les molécules de HCFC-22

(Les hydrochlorofluorocarbures) comme le Fréon et le Perfluorométhane) et l'Hexafluorure de Soufre (SF<sub>6</sub>).

Jean (2002) a estimé la contribution approximative à l'effet de serre pour chacun des principaux gaz:

- Vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O): 60 %
- Dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>): 34 %
- Ozone (O<sub>3</sub>): 2 %
- Méthane (CH<sub>4</sub>): 2 %
- Oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O): 2 %

#### 1.1.1.8. L'effet de serre

L'effet de serre est le piège d'une fraction du rayonnement infrarouge réémis par la Terre vers l'atmosphère terrestre. Ceci est réalisé en particulier par les gaz dits «à effet de serre», accroissant la température troposphérique. Il n'en demeure pas moins que l'effet de serre sur la Terre est un phénomène réel et essentiel qui nous permet d'avoir une température moyenne à la surface de 15 °C au lieu de – 18 °C s'il n'existait pas (Dufresne, 2007). Les rayons du soleil qui atteignent la Terre réchauffent sa surface et sont absorbés à hauteur des deux tiers. Le tiers restant est renvoyé sous forme de rayonnement infrarouge vers l'espace, mais se trouve en partie piégé par une couche de gaz située dans la basse atmosphère: celle-ci renvoie la chaleur vers la Terre et contribue à la réchauffer davantage.

Cet effet de serre résulte pour les deux tiers de l'absorption de chaleur par la vapeur d'eau et les nuages (qui évoluent entre le sol et 12 km d'altitude). Le troisième tiers résulte de l'interaction d'un certain nombre de gaz dits à effet de serre (ou GES) qui se situent environ à 15 km au-dessus du sol. En majeure partie, leur origine est naturelle, mais la proportion due à l'activité humaine, qui est dite d'origine anthropique, s'accroît depuis le début de l'ère industrielle (1750).

L'augmentation incontrôlée de l'effet de serre pourrait provoquer selon les pires prévisions (violents incendies de forêts dus aux sécheresses et réchauffement progressif des océans entraînant la fonte puis la remontée à la surface du méthane stocké au fond des mers) une augmentation de la température du globe jusqu'à 10°C en moyenne d'ici à 2150 si rien n'est fait pour diminuer les rejets humains de gaz à effet de serre.

Ce phénomène naturel a été renforcé car la quantité de gaz à effet de serre (en particulier le CO<sub>2</sub>, naturellement en très faible concentration dans l'atmosphère) a augmenté ces dernières années, ce qui a pour conséquence de déséquilibrer le bilan radiatif de la Terre. Cette augmentation

est due à la combustion de matière carbonée fossile. Si bien que nombre de scientifiques pensent que l'effet de serre est la cause principale du réchauffement planétaire actuel.

Avec le temps, la Terre doit dégager dans l'espace autant d'énergie qu'elle en absorbe, émise par le soleil. L'énergie solaire nous parvient sous forme de rayonnement de courte longueur d'onde. Une partie de ce rayonnement est réfléchi par la surface terrestre et l'atmosphère, mais la plus grande partie traverse directement l'atmosphère pour réchauffer la surface du globe. La Terre, à son tour, se défait de cette énergie (la renvoie dans l'espace) sous forme de rayonnement infrarouge, de grande longueur d'onde (Haus, 2005).

Les gaz à effet de serre ont pour caractéristique commune d'absorber une partie des infrarouges émis par la surface de la Terre. Sans effet de serre (ce qui implique notamment : sans vapeur d'eau et sans nuages), et à albédo constant, la température moyenne sur Terre chuterait à  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mais à cette température la glace s'étendrait sur le globe, l'albédo terrestre augmenterait, et la température se stabiliserait vraisemblablement en dessous de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Baruch, 2007).

Si la concentration en gaz à effet de serre augmente, l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère va augmenter (rendant l'atmosphère opaque), induisant une augmentation corrélative de sa température. Et comme la puissance du rayonnement émis par un corps augmente avec sa température, l'atmosphère enverra plus d'énergie vers le sol qu'auparavant, d'où augmentation de la température d'équilibre de la surface (Dufresne, 2010).

Les gaz à effet de serre ont en effet la particularité d'être pratiquement transparents au rayonnement solaire, et opaques au rayonnement infrarouge émis par la terre. L'énergie est piégée (Trenberth, 2009).

#### **1.1.1.9. Forçage radiatif**

En climatologie, le forçage radiatif est défini comme la différence de l'insolation (rayonnement solaire) absorbée par la Terre et de l'énergie rayonnée vers l'espace. Typiquement, le forçage radiatif est quantifié à la tropopause (10 à 16 km d'altitude) en unités de watts par mètre carré de la surface de la Terre. Un forçage positif (plus d'énergie entrante) réchauffe le système, tandis que qu'un forçage négatif (plus d'énergie sortante) le refroidit. Les causes du forçage radiatif incluent des changements dans l'insolation et les concentrations de gaz radiatif, communément appelé gaz à effet de serre et aérosols (Shindell et al., 2013).

En général, on calcule le forçage radiatif après avoir laissé les températures stratosphériques se réadapter à l'équilibre radiatif, toutes les autres propriétés troposphériques étant toutefois maintenues à leurs valeurs non perturbées. Le forçage radiatif est qualifié d'instantané si l'on

n'observe aucune modification de la température troposphérique (Glossaire du GIEC sur le Changement Climatique, 2006).

#### **1.1.1.10. Effets indirects des aérosols**

Les aérosols peuvent provoquer indirectement un forçage radiatif du système climatique en agissant comme noyaux de condensation ou en modifiant les propriétés optiques ou la durée de vie des nuages. On distingue deux effets indirects.

##### **1.1.1.10.1. Premier effet indirect**

La condensation du noyau des nuages, dû possiblement à la pollution anthropique, peut augmenter la quantité du rayonnement solaire réfléchi par les nuages (albédo des nuages). Ce phénomène est appelé premier effet indirect du forçage radiatif. Twomey (1974) est le premier à avoir parlé de cet effet d'où l'appellation de l'effet Twomey.

Les particules d'aérosol peuvent agir comme condensation du noyau des nuages et créer ainsi davantage de gouttelettes ayant une distribution de taille plus petite. Cela augmente l'albédo des nuages et apparaissent plus blanches et plus grandes, ce qui conduit à un refroidissement compris entre  $-0.3$  et  $-1.8 \text{ Wm}^{-2}$  (Lohmann, 2006).

##### **1.1.1.10.2. Second effet indirect**

Le forçage radiatif provoqué par un accroissement des aérosols anthropiques, qui entraîne une diminution de la taille des gouttelettes, réduisant la capacité de précipitation et modifiant ainsi la teneur en eau liquide ainsi que l'épaisseur et la durée de vie des nuages. Cet effet est également connu sous le nom d'effet sur la durée de vie des nuages ou d'effet d'Albrecht. (Glossaire du GIEC sur le Changement Climatique, 2006).

#### **1.1.1.11. L'effet de serre additionnel**

La plupart des gaz à effet de serre (GES) sont d'origine naturelle. Mais certains d'entre eux sont uniquement dus à l'activité humaine, d'où on voit leur concentration dans l'atmosphère augmenter en raison de cette activité. C'est le cas en particulier de l'ozone ( $\text{O}_3$ ), du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et du méthane ( $\text{CH}_4$ ). La preuve que l'augmentation du  $\text{CO}_2$  atmosphérique est d'origine humaine se fait par analyse isotopique (Denhez et Petit, 2005). C'est cet ajout de gaz à effet de serre gaz qui est appelé effet de serre additionnel.

Par leur contribution, en pourcentage, à l'effet de serre sur la Terre, les quatre principaux gaz sont (Kiehl et al., 1997) :

- Vapeur d'eau, 36–70%
- Dioxyde de carbone, 9–26%
- Méthane, 4–9%
- Ozone, 3–7%

Cependant, la NASA (2009) pense qu'il n'est physiquement pas réaliste d'attribuer un pourcentage spécifique de chaque gaz parce que les bandes d'absorption et d'émission des gaz se chevauchent. Le principal contributeur, non-gaz, à l'effet de serre de la Terre est les nuages. Ils absorbent et émettent, aussi, le rayonnement infrarouge et donc ont un effet sur les propriétés radiatives de l'atmosphère.

L'ozone filtre les entrées de radiation solaire (l'ultraviolet) et participe ainsi à l'équilibre du système. Ces gaz sont présents depuis toujours dans l'atmosphère, c'est leur augmentation qui occasionne un effet de serre additionnel. Les activités humaines, en particulier depuis la révolution industrielle (fin du 18<sup>ème</sup> siècle), ont modifié la composition chimique de l'atmosphère (25% de CO<sub>2</sub> de plus qu'en 1750, destruction de l'ozone stratosphérique par les Chlorofluorocarbones, CFC) (Martine, 2000).

#### **1.1.1.12. Le "fonctionnement" de l'effet de serre**

Lorsque les rayons solaires atteignent l'atmosphère terrestre, une partie (environ 30%) est directement réfléchiée par l'air, les nuages à hauteur de 20% et la surface de la Terre à hauteur de 10% (en particulier les océans et les régions glacées comme l'Arctique et l'Antarctique), c'est l'albédo (Guppy, 2006).

L'albédo, dans sa définition la plus courante dite albédo de Bond, est une valeur comprise entre 0 et 1: un corps noir parfait, qui absorberait toutes les longueurs d'onde sans en réfléchir aucune, aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait, qui réfléchirait toutes les longueurs d'onde, sans en absorber une seule, aurait un albédo égal à 1.

La Terre possède un système naturel de contrôle des températures. Les gaz à effet de serre sont des éléments cruciaux de ce système. En moyenne, près d'un tiers des rayonnements solaires atteignant la terre sont renvoyés dans l'espace. Le reste est partagé entre l'atmosphère, qui en absorbe, et la terre et l'océan qui en absorbent la majeure partie. La surface de la terre se réchauffe et émet un rayonnement infrarouge. Les gaz à effet de serre bloquent le rayonnement infrarouge et réchauffent l'atmosphère.

En 1909, Robert Williams Wood a réfuté par l'expérience que l'effet de serre est un mécanisme lié à l'absorption et à l'émission de radiations thermiques par le verre. En remplaçant

le verre qui recouvre une serre par du halite, un matériau totalement transparent aux infrarouges, Robert Wood mesure une augmentation similaire de température dans les deux cas. Aussi l'augmentation de température dans une serre ne s'explique pas par le fait que le verre réfléchit les infrarouges. L'expression «effet de serre» a néanmoins été conservée dans l'usage courant. Mais le terme scientifique, utilisé par la communauté scientifique pour décrire l'influence des composants de l'atmosphère bloquant le rayonnement infrarouge sur le bilan thermique de la Terre, est forçage radiatif (Urgelli, 2003). Le fonctionnement d'une serre s'explique essentiellement par une analyse de la convection et non du rayonnement: la chaleur s'accumule à l'intérieur de la serre car les parois bloquent les échanges convectifs entre l'intérieur et l'extérieur.

Les rayons incidents qui n'ont pas été réfléchis vers l'espace sont absorbés par l'atmosphère (20,7%) et la surface terrestre (51%). Cette dernière partie absorbée par la surface du sol lui apporte de la chaleur qu'elle restitue à son tour, le jour comme la nuit, en direction de l'atmosphère. Le transfert de chaleur entre la Terre et l'atmosphère se fait, conformément au deuxième principe de la thermodynamique, du chaud (la terre) vers le froid (l'atmosphère); il se fait par convection (réchauffement et humidification de l'air au contact du sol puis ascension de cet air et libération de la chaleur latente de la vapeur d'eau lorsqu'elle se condense en nuages) et sous forme de rayonnements infrarouges lointains (dans la plage 8–13  $\mu\text{m}$  principalement). L'effet de serre ne s'intéresse qu'à ces rayonnements, qui seront absorbés en partie par les gaz à effet de serre, ce qui contribue à réchauffer l'atmosphère. Puis dans un troisième temps, cette chaleur contenue par l'atmosphère est réémise dans toutes les directions; une partie s'échappe vers l'espace, mais une autre partie retourne vers la Terre et vient en déduction de l'apport de chaleur de la surface vers l'atmosphère, donc s'oppose au refroidissement de la surface (Dufresne, 2010).

Il faut bien comprendre que l'énergie de l'espace reçue par la terre et l'énergie de la terre émise vers l'espace est égale en moyenne, sinon, la température de la Terre changerait dans un seul sens en permanence, vers toujours plus froid ou vers toujours plus chaud. Si l'échange moyen d'énergie avec l'espace n'est pas nul, cela entraîne un stockage ou un déstockage de l'énergie de la Terre. Ce changement peut se traduire par un changement de température de l'atmosphère.

#### **1.1.1.13. Potentiel de réchauffement global (PRG)**

Le réchauffement climatique est la conséquence de l'effet de serre provoqué par certains gaz. Le plus connu est le CO<sub>2</sub>, mais il est loin d'être le seul à participer à l'effet de serre. Pour une même quantité émise dans l'atmosphère, chaque gaz produit un effet de serre plus ou moins puissant. Le but est de pouvoir quantifier l'impact de chaque gaz.

L'unité utilisée est le kilogramme équivalent carbone. L'impact sur l'effet de serre se calcule à l'aide du PRG: Pouvoir de Réchauffement Global (Tableau 1.1). Le PRG représente en quelque sorte « la puissance de réchauffement climatique » du gaz, plus il est élevé, plus le gaz va contribuer fortement au réchauffement climatique. Comme nous voulons obtenir des kg équivalent CO<sub>2</sub>, on rapporte le pouvoir de réchauffement des autres gaz à celui du CO<sub>2</sub>. Le PRG du CO<sub>2</sub> est donc fixé à 1 (car 1 kg de CO<sub>2</sub> = 1 kg équivalent CO<sub>2</sub>). Le PRG est exprimé en "équivalent CO<sub>2</sub>" (noté CO<sub>2</sub>e).

**Tableau 1.1** : Le pouvoir de réchauffement global des gaz à effet de serre (CITEPA, 2015)

Nom du gaz à effet de serre	Pouvoir de réchauffement global (à 100 ans)
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	1
Méthane (CH <sub>4</sub> )	21
Oxyde nitreux, protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	310
Hydrofluorocarbures (HFC) (moyenne)	variables selon les molécules et l'année considérées (valeur pondérée de 6 685 en 1990, 9 966 en 1993, 2 093 en 2013)
Perfluorocarbures (PFC) (moyenne, hors SF <sub>6</sub> )	variables selon les molécules considérées (valeur pondérée de 8 843 en 1990, 9 180 en 1994 et 9 069 en 2013)
Hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> )	23 900

Au final, pour calculer l'impact, il faut multiplier la quantité de gaz émis par son PRG. Le résultat est obtenu en kilogramme équivalent CO<sub>2</sub>. Par exemple, le PRG du méthane est de 21, c'est-à-dire qu'il a un pouvoir de réchauffement climatique 21 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub>. Une entité rejetant une tonne de méthane se verra donc imputer 21 tonnes équivalent CO<sub>2</sub> dans son bilan d'émissions de gaz à effet de serre. Cet indicateur se limite pour le moment aux gaz à effet de serre direct et plus particulièrement à ceux visés par le Protocole de Kyoto, à savoir le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, le N<sub>2</sub>O, les HFC, les PFC, le SF<sub>6</sub> et le NF<sub>3</sub>.

Le PRG est calculé sur la base d'un horizon fixé à 100 ans afin de tenir compte de la durée de séjour des différentes substances dans l'atmosphère.

#### 1.1.1.14. L'équivalent carbone

Nous pouvons exprimer l'émission en kg équivalent carbone. Nous prendrons comme référence l'atome de carbone (au lieu du gaz CO<sub>2</sub>). Pour obtenir une émission en kg équivalent

carbone, il faut donc réaliser un rapport de masse molaire. Le carbone a une masse molaire égale à 12, le CO<sub>2</sub> a une masse molaire de 44 (CO<sub>2</sub> = 12 + 16 × 2 = 44). Ainsi, une émission exprimée en kg équivalent CO<sub>2</sub> sera multipliée par 44 et divisée par 12 (ou tout simplement multiplier par 0,2727).

$$\text{Équivalent carbone} = \text{PRG} * 0,2727 \text{ (en kilos)}$$

Guppy (2006) a établi les équivalents carbonés des GES les plus communs:

- Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>): 0,273
- Vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O): 2,2
- Méthane (CH<sub>4</sub>): 6,27
- Protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O): 81
- Chlorofluorocarbures (CFC ou C<sub>n</sub>F<sub>m</sub>Cl<sub>p</sub>): 1256 à 3818
- Hydro fluorocarbures (HFC ou C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>F<sub>p</sub>): 3,3 à 3273
- Perfluorocarbures (PFC ou C<sub>n</sub>F<sub>2n+2</sub>): 1555 à 3245
- Hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>): 6055

**Exemple:** l'équivalent carbone de 1 tonne de CO<sub>2</sub> est de 12/44 teC (tonne équivalent Carbone), soit 0,273 teC.

#### 1.1.1.15. Augmentation de l'effet de serre

Si les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère augmentent, elles intensifieront l'effet de serre naturel, provoquant ce que l'on appelle l'«augmentation» de l'effet de serre. Les scientifiques s'accordent pour dire que si les humains continuent d'ajouter des gaz à effet de serre dans l'atmosphère par la combustion de combustibles fossiles et le déboisement des forêts, l'effet de serre augmentera. Cela provoquera une hausse sans précédent des températures de la planète.

Des mesures assez fines montrent la réalité du changement climatique ainsi que de l'accroissement des gaz à effet de serre d'origine humaine depuis le début de la révolution industrielle. Sur la base de plusieurs scénarios de croissance en GES, les conséquences prévues pour le XXI<sup>ème</sup> siècle sont assez alarmantes. Pourtant la modélisation du climat mondial est assez complexe (François, 2001).

#### 1.1.1.16. Changement climatique (explications scientifiques)

Le changement climatique Désigne l'ensemble des variations des caractéristiques climatiques en un endroit donné, au cours du temps: réchauffement ou refroidissement. Certaines formes de

pollution de l'air, résultant d'activités humaines, menacent de modifier sensiblement le climat, dans le sens d'un réchauffement global. Ce phénomène peut entraîner des dommages importants:

- élévation du niveau des mers;
- augmentation des incidents climatiques extrêmes (sécheresses, inondations, cyclones,...);
- déstabilisation des forêts, menaces sur les ressources d'eau douce;
- difficultés agricoles, désertification, réduction de la biodiversité, extension des maladies tropicales, etc.;

On utilise souvent les expressions «Réchauffement planétaire» et «changements climatiques» pour décrire le même phénomène. En fait, on peut les distinguer à titre de cause et d'effet, ou encore de problème et de conséquence. Le réchauffement planétaire n'est que l'augmentation de la température de la basse atmosphère de la terre à la suite de l'accroissement de l'effet de serre. Les répercussions de cette augmentation des températures sont ce que nous appelons les changements climatiques. Cela comprend la modification de la configuration des vents ainsi que l'abondance et le type de précipitations, qui à leur tour influent sur les types et la fréquence des phénomènes météorologiques exceptionnels auxquels on peut s'attendre dans une région donnée. Ainsi, c'est le réchauffement planétaire qui engendre les changements climatiques. L'expression variabilité du climat sert à décrire la façon dont le climat varie en fonction des conditions climatiques moyennes, sur des échelles de temps calculées en saisons, années, décennies et ainsi de suite. Une bonne partie de la variabilité du climat dépend des oscillations naturelles des courants océaniques et de la pression atmosphérique. Toutefois, les changements climatiques causés par les êtres humains peuvent aussi influencer sur la variabilité du climat (Martine, 2000).

Dans certain point de vu les changements climatiques indiquent, par définition, des variations statistiquement significatives du climat, persistant sur des périodes de l'ordre de quelques décades et plus, incluant des décalages en fréquence et intensité de certains phénomènes climatiques ainsi qu'une augmentation lente et continue de la température globale moyenne de la surface de la terre.

#### **1.1.1.17. Changement climatique rapide**

La non-linéarité du système climatique peut entraîner des changements climatiques rapides, appelés parfois événements brusques, voire surprendre. Certains de ces événements brusques sont concevables, comme la réorganisation spectaculaire de la circulation thermohaline, la déglaciation rapide ou la fonte massive du pergélisol entraînant de rapides changements dans le cycle du carbone. D'autres peuvent être totalement imprévisibles, par exemple lorsqu'ils sont causés par un

puissant forçage, en évolution rapide, d'un système non linéaire. (Glossaire du GIEC sur le Changement Climatique, 2006).

Dans certains point de vu, les termes "changement climatique" et le "réchauffement planétaire" sont souvent utilisés l'un pour l'autre. Pourtant, ils ne sont pas synonymes. Le changement climatique inclut à la fois le réchauffement et le refroidissement de la planète. Le réchauffement planétaire correspond uniquement aux changements climatiques provoqués par les augmentations de température. Toutefois, pour comprendre les aspects scientifiques de ce réchauffement, nous devons commencer par nous placer dans le contexte du changement climatique régional et global «mondial».

## **1.2. Les changements climatiques régionaux**

Les activités humaines modifient le climat de certaines régions. Les villes créent des microclimats et élèvent la température de quelques degrés. La déforestation accélère la sécheresse.

Comme le montrent les données d'observation disponibles, les changements du climat à l'échelle régionale, en particulier les hausses de température, ont déjà eu une influence sur un large éventail de systèmes physiques et biologiques dans de nombreuses parties du globe.

Parmi les changements observés, on peut mentionner le retrait des glaciers, le dégel du pergélisol, le gel tardif et la dislocation précoce de la glace sur les rivières et les lacs, l'allongement de la période de végétation aux latitudes moyennes à élevées, la progression en altitude ou le déplacement vers les pôles des aires de distribution géographique d'un certain nombre d'espèces végétales et animales, la régression de certaines populations végétales et animales et la précocité de la floraison des arbres, de l'apparition des insectes et de la ponte des oiseaux. Certaines corrélations entre l'évolution des températures à l'échelle régionale et les changements observés des systèmes physiques et biologiques ont été établies dans nombre de milieux marins, terrestres et aquatiques (Ahmad et al., 2001).

Beaucoup d'études ont montré que les villes présentent des micros-climat, ou encore appelé "Ilot de Chaleur urbain" (Jean, 2002) et prouve ainsi que l'activité humaine influe sur le climat..

## **1.3. Le changement climatique global «mondial»**

Le changement climatique correspond à un changement du «temps moyen» observé dans une région donnée. Le temps moyen comprend tous les éléments que nous associons habituellement au temps, à savoir la température, les caractéristiques des vents et les précipitations. Lorsque nous parlons de changement climatique à l'échelle de la planète, nous faisons référence aux modifications que connaît l'ensemble du climat de la terre. A long terme, la rapidité et l'ampleur

des changements climatiques peuvent avoir de nombreuses conséquences sur les écosystèmes naturels (Environnement canada, 2014).

Le changement climatique mondial est bel et bien un phénomène naturel. Le système climatique naturel de la terre a toujours connu, et continue de connaître des changements. Les scientifiques ont étudié les données qu'ont emmagasinées au fil des époques les roches et les nappes glaciaires. Ils ont ainsi découvert que la terre a connu de nombreuses périodes de réchauffement et de refroidissement au cours du dernier million d'années.

La variabilité du climat planétaire est normale, et tient aux fluctuations des courants océaniques, aux éruptions volcaniques, au rayonnement solaire, aux paramètres astronomiques et à d'autres composantes du système climatique encore partiellement incomprises (Tabeaud et Magdelaine, 2014).

Les mesures terrestres de température réalisées au cours du XXe siècle montrent une élévation de la température sur la majorité de la surface terrestre. L'élévation de cette température est constatée en mesurant en divers points du globe l'écart entre la température actuelle et une température prise comme référence puis en calculant la moyenne pondérée de ces écarts (MeteoOffice, 2014).

On observe également depuis 1988 une diminution notable de la couverture neigeuse printanière aux latitudes moyennes de l'hémisphère nord. Cette diminution est préoccupante car cette couverture neigeuse contribue à l'humidité des sols et aux ressources en eau (Collins et al., 2007). L'élévation du niveau moyen des océans entre 1993 et 2003 est estimée à 3,1 mm par an ( $\pm 0,7$  mm) (Cazenave et Berthier, 2010).

Le réchauffement observé se serait déroulé en deux phases, la première de 1910 à 1945, la seconde de 1976 à aujourd'hui. Ces deux phases sont séparées par une période de léger refroidissement. Ce réchauffement planétaire semble de plus corrélé avec une forte augmentation dans l'atmosphère de la concentration de plusieurs gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote (Puget et al., 2010).

### **1.3.1. Causes des variations climatiques à l'échelle de la planète**

Traversons-nous présentement une période de changement climatique? Le climat de la planète devient-il plus chaud, plus froid, plus humide ou plus aride? Si c'est le cas, quelle en est la cause? Quelles seront les conséquences?

Il n'existe aucune réponse définitive à ces questions, seulement des hypothèses éclairées. La complexité de l'atmosphère et l'interaction des variables en cause rendent difficile la prévision des changements climatiques.

C'est essentiellement aux naturalistes et aux physico-chimistes du XIXe siècle que nous devons les premières recherches scientifiques sur les glaciations (Imbrie, 1979).

L'hypothèse d'un lien entre la température moyenne du globe et le taux de gaz carbonique dans l'atmosphère a été formulée pour la première fois en 1894 par Svante Arrhenius. En 1979, lors de la première conférence mondiale sur le climat, est avancée pour la première fois sur la scène internationale l'éventualité d'un impact de l'activité humaine sur le climat. L'adhésion assez massive de certains scientifiques à cette cause est récente, mais une controverse existe dans ce milieu quant aux causes de ce réchauffement. Des climatologues soutiennent en effet que le réchauffement observé n'est que la conséquence de phénomènes naturels (telles que les fluctuations de l'activité solaire et celles de l'orbite terrestre) (Collins et al., 2007).

Les variations climatiques à l'échelle des cycles glaciaires s'expliquent par des changements quasi-périodiques de l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre et de la forme de l'orbite de cette dernière autour du Soleil. Ces changements astronomiques induisent de lentes modifications dans l'énergie solaire atteignant la terre à l'échelle des millénaires. Ils ont en outre été amplifiés par des variations de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cette explication, à laquelle l'Université Catholique de Louvain (UCL) a contribué, ne fait pratiquement plus l'objet d'aucun doute. Différentes sources de données (sédiments, carottes de glace...) ont permis de reconstituer les variations climatiques des dernières centaines de milliers d'années, qui correspondent à plusieurs cycles glaciaires-interglaciaires (Philippe et al., 2006).

### **1.3.1.1. Les cycles glaciaires-interglaciaires**

Une chose est sûre, le climat de la Terre a vu se succéder des périodes glaciaires et interglaciaires. Les variations des caractéristiques de l'orbite terrestre autour du soleil modifient la distribution de l'ensoleillement à la surface du globe et entraînent des changements climatiques suffisamment importants pour être enregistrés dans les glaces encore présentes à la surface terrestre (Robert, 2005).

### **1.3.1.2. L'origine des cycles glaciaires-interglaciaires**

Le climat de la Terre a évolué entre des régimes très contrastés, allant du froid extrême lors de glaciations généralisées jusqu'à l'équateur à une atmosphère surchauffée par l'effet de serre au temps des dinosaures. A l'échelle des quelques derniers millions d'années, l'évolution du climat se caractérise par des cycles glaciaires-interglaciaires. La cause principale en est la cyclicité de la répartition géographique de l'insolation due à des changements des paramètres de l'orbite terrestre.

Les trois cycles majeurs sont liés aux variations de l'excentricité de cette orbite, de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre et enfin de la précession des équinoxes (Bard, 2007).

Selon Delaygue et Thomas (2003), il existe deux rythmes de glaciations que l'on peut appeler "ères" et "périodes".

Les ères glaciaires sont rares, durent environ 10 à 30 millions d'années pendant lesquelles le climat est globalement froid, avec des glaciers au moins aux pôles. Un exemple est notre ère mio-plio-quadernaire. Entre ces ères glaciaires, le climat est plus chaud et les glaciers sont inexistant, même aux pôles.

A l'intérieur d'une ère glaciaire, il y a alternance de périodes plus froides avec beaucoup de glaciers (exemple des périodes glaciaires du Würm<sup>1</sup>, Mindel<sup>2</sup>, Riss<sup>3</sup> ...au Quaternaire) et de périodes plus chaudes avec moins de glaciers, comme actuellement (période interglaciaire).

### 1.3.1.3. Glacières

Initialement, la datation des glaciations du Quaternaire s'est appuyée sur la localisation des dépôts correspondants. On les distinguait par la structure des couches alternées des sédiments interglaciaires avec les moraines glaciaires. Mais la comparaison et la recherche de correspondances entre les dépôts identifiés dans des régions éloignées a fait apparaître de nombreuses difficultés. Ainsi, on n'a toujours aucune certitude sur la concomitance des dépôts de la glaciation de la Saale (qui a affecté l'Allemagne du Nord) et ceux de la Glaciation de Riss, dans l'espace Alpin. C'est pourquoi les différentes régions de la Terre conservent leur propre division stratigraphique du Quaternaire. Ces différentes appellations régionales, où les spécialistes eux-mêmes ont du mal à se retrouver, créent de la confusion auprès du grand public. C'est ainsi que la dernière avancée des glaciers, qui a culminé il y a plus de 20 000 ans, est appelée « glaciation de Würm » en France et dans les autres pays alpins, « glaciation du Devensien » dans les Îles Britanniques, « glaciation de la Vistule » en Allemagne et en Europe du Nord, « glaciation de Valdaï » en Russie, et enfin « glaciation du Wisconsin » en Amérique du Nord. Il y a tout autant de diversité pour les autres périodes glaciaires et interglaciaires (Tierney et al., 2008).

### 1.3.1.4. Interglaciaires

Avec la déglaciation, les conditions de vie s'améliorent. Les calottes de glace fondent, vêtant des icebergs et émettant des eaux de fonte sur les continents. Le recul de la glace de mer permet

---

<sup>1</sup> La Würm est une rivière bavaroise. Elle est le principal affluent de l'Amper et un sous affluent du Danube. En géologie le terme désigne la dernière glaciation alpine du quaternaire.

<sup>2</sup> Deuxième glaciation du quaternaire.

<sup>3</sup> Troisième glaciation du quaternaire.

l'avancée vers les hautes latitudes d'eau chaudes: c'est le retour de la fraîcheur et de l'humidité. La montée du niveau marin est localement compensée par le soulèvement des continents allégés. Aux latitudes moyennes, la reconquête forestière progresse lentement à partir de sites refuges. Dans la zone intertropicale, les conditions de chaleur et de précipitations sont optimales: des sédentaires vivent au Sahara. L'interglaciaire Holocène, qui a débuté il y a 10 000 ans, a connu un optimal climatique il y a 8000 ans. La prochaine grande glaciation devrait intervenir dans 60 000 ans (Martine, 2000).

#### **1.3.1.5. Causes du réchauffement planétaire**

Sébastien (2006), indique que les causes du réchauffement planétaire ne sont généralement pas sujettes à controverses. Ce qui est plus discuté est la contribution relative de chacune des causes possibles. Parmi celles-ci, on peut citer:

- La rétention de la chaleur par l'atmosphère, amplifiée par les gaz à effet de serre;
- les fluctuations cycliques de l'activité solaire;
- la réflectivité de la surface terrestre (albédo) qui est modifiée par la déforestation, l'avancée des déserts, l'agriculture, le recul des glaces, neiges et glaciers, mais aussi par les cirrus artificiels créés par les traînées des avions;
- les émissions volcaniques.

##### **1.3.1.5.1. Causes naturelles**

François (2001) pense que grâce à l'observation du passé, on connaît de grandes causes naturelles à la modification dans le temps de la température de la Terre et de ses climats:

- La variation de la composition de son atmosphère en gaz à effet de serre (GES d'origine naturelle), en particulier du gaz carbonique;
- Les variations de sa position astronomique (les grandes glaciations);
- Les variations de son activité solaire;
- On reconnaît aussi l'influence accidentelle de rejets massifs de poussière, de type éruption volcanique ou impact de météorite géante.

##### **1.3.1.5.2. Les activités humaines qui contribuent au changement climatique**

John (2001) suspecte l'influence grandissante de l'homme sur l'évolution du climat général de la terre par le biais:

- de rejets massifs de gaz à effet de serre;
- de perturbations à grande échelle du cycle de l'eau.

L'impact de l'homme sur le réchauffement climatique est controversé mais il est établi que l'activité humaine a un impact sur le climat car on peut remarquer des différences entre le climat durant les jours de semaine et celui du week-end.

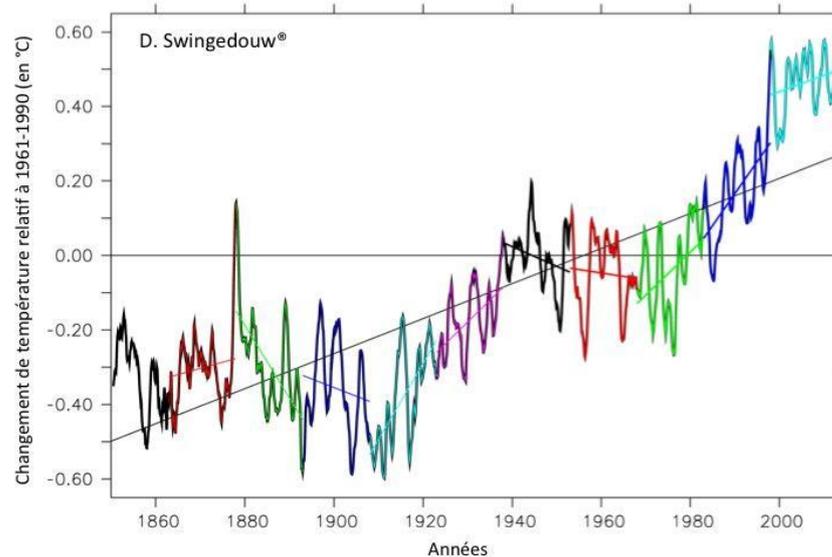
Luke Howard est le premier à avoir mis en évidence l'influence de l'homme sur l'élévation de la température. Il décrit le phénomène d'îlots de chaleur urbain (ICU). Ce sont des élévations localisées des températures, particulièrement des températures maximales diurnes et nocturnes, enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales ou forestières voisines ou par rapport aux températures moyennes régionales (Bosquet et Sylvain, 2014).

Au sein d'une même ville, des différences importantes de température peuvent être relevées selon la nature de l'occupation du sol (forêt, étendues d'eau, banlieue, ville dense...), l'albédo, le relief et l'exposition (versant sud ou nord), et bien entendu selon la saison et le type de temps (Cantat, 2004). Les îlots de chaleur sont des microclimats artificiels.

D'autres études similaires ont été faites en Chine et permettent d'établir les impacts de l'activité humaine sur le climat.

Plus de 600 climatologues, qui se réunissent régulièrement au sein du GIEC, le Groupe Intergouvernemental des Experts sur l'Evolution du Climat, qui ont leur propre sujet de recherche et qui n'appartiennent pas aux mêmes écoles de pensée, arrivent, en 2013, aux mêmes conclusions: **les causes du réchauffement climatique sont attribuables à 95% aux activités humaines, et en particulier à la production massive de gaz à effets de serre**. Alors qu'en 2007 elle était de 90%. Le GIEC estimait aussi que d'ici 2100, il fera en moyenne 4,8° de plus sur Terre (IPCC, 2013).

On observe, depuis le XX<sup>ème</sup> siècle, une tendance sans précédent au réchauffement de la planète. La moyenne globale actuelle de la température à la surface de la Terre est de 15 °C, près de 0.6 °C plus élevé que ce qu'elle était au début du XX<sup>ème</sup> siècle. La comparaison des températures par rapport à la période 1961-1990 montre un net réchauffement de la planète (Figure 1.1).



**Figure 1.1:** Température moyenne globale de la Terre (en degré Celsius) et tendance sur 15 ans (Swingedouw D et al.,2010).

Présentement, les scientifiques estiment que la moyenne globale de la température à la surface du globe augmentera en moyenne de 1.4 °C à 5.8 °C avant la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle. Les précipitations sont également à la hausse. Dans l'hémisphère Nord, les précipitations ont augmenté de 0.5% à 1.0% par décennie comparativement à 0.2% à 0.3% dans les pays en région tropicale (IPCC, 2013).

### 1.3.2. La situation passée du climat mondial

Dans le passé, avant l'ère industrielle, la Terre a été le cadre de variations climatiques contrastées, différentes des variations actuelles en nature, durée et amplitude, et qui offrent une possibilité unique, à l'aide de simulations paléo climatiques, d'estimer la sensibilité du climat à différents forçages, d'évaluer les capacités des modèles et ainsi d'améliorer les prévisions. L'étude du dernier millénaire permet de comparer le réchauffement observé au siècle dernier aux variations naturelles précédentes. Le milieu de l'holocène<sup>1</sup>, il y a 6 000 ans, est aussi une période privilégiée pour comparer modèles et observations car il est le siège d'intense pluies de mousson. Les travaux du programme international coordonné par la France ont ainsi montré qu'il est indispensable de prendre en compte les interactions océan-atmosphère-végétation pour représenter la complexité des modifications de la mousson. De nouveaux enregistrements Stratigraphiques (forages) à haute résolution sont en cours d'analyse pour préciser les corrélations climatiques entre différentes régions. On a cependant déjà pu montrer, par exemple, que les événements froids abrupts dits de

<sup>1</sup> Période du quaternaire.

Heinrich<sup>1</sup> des périodes glaciaires sont corrélés à des épisodes d'aridité dans le bassin méditerranéen. À l'échelle de ces événements rapides, les carottes marines tropicales suggèrent aussi que l'hydrologie profonde de l'Atlantique et la climatologie de L'Antarctique est liée (Joussaume et al., 2007).

### **1.3.3. La situation actuelle du climat mondial**

Nous avons des preuves certaines de l'arrivée du changement climatique. Les activités humaines entraînent une hausse des températures à l'échelle mondiale. Au cours des cent dernières années, les températures moyennes en Europe ont augmenté de 0,8 °C, et elles augmenteront probablement encore de 1 à 6 °C d'ici à 2100 (Commission Européenne de l'Environnement, 2010).

Les activités humaines, telles que la combustion de pétrole, de charbon et de gaz, ainsi que la déforestation, sont les causes principales de l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Près de 87% des émissions de dioxyde de carbone attribuables à l'homme, proviennent de la combustion de combustibles fossiles, tels que le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Le reste provient du défrichage des forêts et autres changements dans l'utilisation des sols (9%), ainsi que de certains procédés industriels, comme la fabrication de ciment (4%) (Le Quéré et al., 2013). Toutes ces émissions contribuent d'une manière directe dans le réchauffement global.

La concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a augmenté d'environ 280 parties par million (ppm) en 1750 à environ 350 ppm en 1990 et s'élève encore, avec comme principale raison de l'augmentation la combustion des carburants fossiles. Les estimations des futures émissions de CO<sub>2</sub> et la concentration attendue dans l'atmosphère varient, mais il apparaît probable que la concentration s'élèvera jusqu'à une moyenne de 550 ppm en l'an 2050 (Aulay et al., 2000 ; Adam, 2008).

### **1.3.4. Le future du climat mondial «Prévisions»**

La prévision de l'évolution future du climat a été rendue possible par l'utilisation de modèles informatiques. Ces modèles, dits de circulation générale, simulent les déplacements et les températures des masses atmosphériques et océaniques. Les plus récents prennent aussi en compte d'autres phénomènes, comme le cycle du carbone.

Selon Jean (2002), plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre ont été envisagés, citons:

---

<sup>1</sup> Phase froide de la dernière période glaciaire.

- Hausse de la température mondiale moyenne entre 1,4 °C et 5,8 °C.
- Elévation du niveau de la mer comprise entre 9 et 88 cm.
- Fréquence accrue des événements extrêmes.

#### **1.3.4.1. Les Modèles climatiques**

Les modèles sont capables de simuler des variations connues du climat, comme les variations saisonnières, le phénomène El Niño, ou l'oscillation Atlantique Nord. Les modèles les plus récents simulent de façon satisfaisante les variations de température au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, l'évolution future du climat, mais aussi pour cerner les causes du réchauffement climatique actuel, en comparant les changements climatiques observés avec les changements induits dans ces modèles par différentes causes naturelles ou humaines.

Les projections climatiques sont basées sur des modèles climatiques et répondent à divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, ou de scénarios de forçage radiatif, basés sur des hypothèses concernant l'évolution socioéconomique et technologique à venir. Or, ces hypothèses pouvant se réaliser ou non, les projections sont donc sujettes à une forte incertitude (Agence européenne pour l'environnement, 2012).

Ces modèles sont l'objet d'incertitudes de nature mathématique, informatique, physique, etc. Les trois principales sources d'incertitude mentionnées par les climatologues sont:

- la modélisation des nuages;
- la simulation de phénomènes de petite échelle, comme les cellules orageuses, ou l'effet du relief sur la circulation atmosphérique;
- la modélisation de l'interface entre les océans et l'atmosphère (Collins et al., 2007).

De façon plus générale, ces modèles sont limités par les capacités de calcul des ordinateurs actuels et le savoir limité de leurs concepteurs, car la climatologie et les phénomènes à modéliser sont d'une grande complexité. Malgré ces limitations, le GIEC considère les modèles climatiques comme des outils pertinents pour fournir des prévisions utiles du climat.

Nous verrons dans le chapitre suivant les modèles climatiques d'une manière plus détaillées.

#### **1.3.5. Les conséquences probables des changements climatiques**

Le doublement de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> depuis son niveau actuel est prévu pour entraîner un réchauffement supplémentaire d'environ 3,5°C. L'effet de cela serait profond, comme la glace polaire fondrait et les océans s'étendraient avec la chaleur, élevant le niveau de la mer et entraînant des changements à grande échelle du climat global. De plus, le réchauffement

global pourrait obliger des organismes à migrer en vue de chercher des températures optimales, à s'adapter aux nouvelles conditions ou à affronter l'extinction. Ce mouvement des organismes peut inclure aussi des maladies tropicales (par exemple le paludisme) (Aulay et al., 2000).

Des pressions soutenues sur les milieux naturels, à travers l'accumulation de pollution, la dégradation des écosystèmes, l'érosion des sols et le détournement des ressources en eau, peuvent conduire à de véritables catastrophes écologiques, lourdes de conséquence sur le plan humain.

Catastrophe écologique, mais aussi drame économique et humain, qui peut toucher des millions de personnes. Un bilan santé des plus alarmants en a été dressé (Conférence de Noukous en 1995 in Robert, 2000).

Moussa (2006), croit que la tendance actuelle du réchauffement pourrait causer:

- des extinctions d'espèces. De nombreuses espèces de plantes et d'animaux, sont appelées à disparaître dans les 100 prochaines années.
- Des difficultés sanitaires et alimentaires de plus en plus grandes pour les êtres humains.
- Des tempêtes (KATRINA, RITA), inondations et sécheresses appelées "événements météorologiques extrêmes".
- L'augmentation du niveau de la mer de 9 à 88 cm prévue d'ici l'an 2100 en supplément de l'augmentation de 10 à 20 cm déjà observé au cours du XX<sup>ème</sup> siècle.
- Des températures plus élevées qui causeront à leurs tours, la fonte des glaciers et des calottes glaciaires et l'augmentation du volume des océans.
- La mer pourrait déborder dans des zones côtières fortement peuplées de pays tels que le Bangladesh, causant la disparition de nations entières (l'État-île des Maldives), et polluant l'eau de boisson de milliards de personnes, occasionnant ainsi des migrations massives.

### **1.3.6.1. Les conséquences physiques du changement climatique**

Les modèles utilisés pour prédire le réchauffement planétaire futur peuvent aussi être utilisés pour simuler les conséquences de ce réchauffement sur les autres paramètres physiques de la Terre, comme les calottes de glace, les précipitations ou le niveau des mers.

#### **1.3.6.1.1. La montée des eaux et fonte des glaciers**

Le réchauffement climatique pourrait nuire à tous les mécanismes terrestres. Une des conséquences du réchauffement planétaire sur lesquelles s'accordent les scientifiques est une montée du niveau de la mer. Cette augmentation serait due au réchauffement des eaux des océans

(augmentation substantielle du fait de la grande profondeur) et à l'ajout d'eau supplémentaire provenant de la fonte des calottes glaciaires continentales.

Selon le 3<sup>ème</sup> rapport du GIEC (IPCC, 2001), le niveau de la mer s'est élevé de 0,1 à 0,2 m au XX<sup>ème</sup> siècle. La montée du niveau des océans et des mers prévue serait due principalement au réchauffement des eaux océaniques, l'effet de la fonte des glaces ne se faisant sentir éventuellement qu'à beaucoup plus long terme. Les incertitudes concernant le niveau de la mer sont liées aux modèles, d'une part, et aux émissions futures de gaz à effet de serre, d'autre part.

Le 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC (IPCC, 2007) prévoit une élévation du niveau de la mer de 18 à 59 cm.

L'étude de Bryssea (2013) démontre que la plupart des prévisions du GIEC se sont avérées trop optimistes (à l'exception de celles concernant la hausse des températures): ainsi, la hausse du niveau des océans sur la période 1993-2011 a été de  $3,2 \pm 0,5$  mm/an, soit 60 % plus rapide que l'estimation du GIEC de 2 mm/an ; la fonte de la banquise arctique a été beaucoup plus rapide que les pires prévisions du GIEC; la progression des émissions des pays émergents a été largement sous-estimée (3 à 4 % par an en Chine dans les hypothèses du GIEC, 10 à 11 % en réalité) si bien que les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> sont alignées sur le plus pessimiste des scénarios du GIEC; l'amplification du réchauffement causée par la fonte du pergélisol n'a pas été prise en compte dans les modèles du GIEC.

Dans certaines régions, comme l'Europe de l'Ouest et le Bangladesh, les dommages pourraient se révéler extrêmes, à cause de la perte du réchauffement par le Gulf Stream<sup>1</sup> et la montée des océans au niveau mondial respectivement. On redoute aussi des apparitions plus fréquentes de phénomènes climatiques destructifs. Un apport massif d'eau douce aux abords des pôles peut entraîner une diminution de la salinité marine et donc de la densité des eaux de surface. Cela peut ralentir (ou arrêter) les courants marins tels que le Gulf Stream, qui assure les échanges thermiques actuels entre l'équateur et zones tempérées (Rahmstorf et al., 2015 ; Seager et al., 2002)). L'hypothèse selon laquelle l'actuel réchauffement du climat mondial pourrait, via l'arrêt ou le ralentissement de la circulation thermohaline, déclencher un refroidissement de l'Atlantique Nord, ce qui provoquerait le refroidissement, ou un réchauffement moindre dans cette région (Palter, 2015).

Cet événement affecterait particulièrement des régions comme les îles Britanniques et la Scandinavie qui sont réchauffées par la dérive nord atlantique. La probabilité d'un arrêt total de

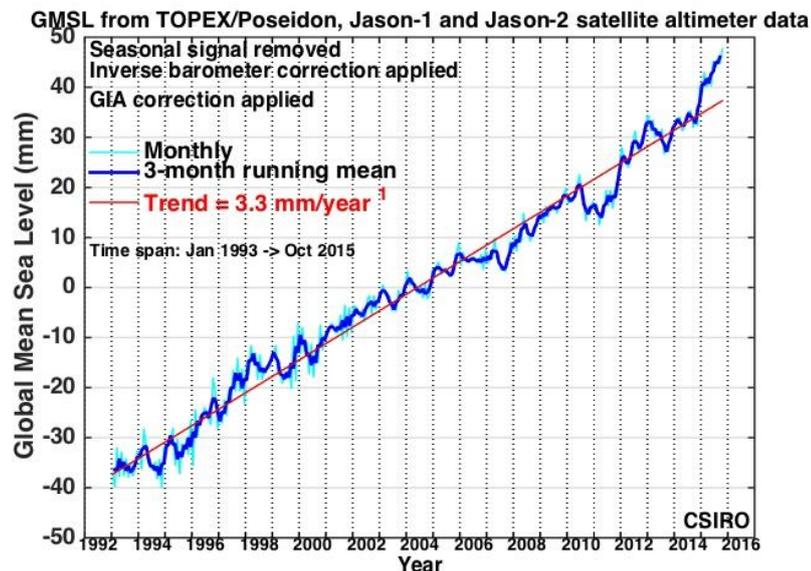
---

<sup>1</sup> Le Gulf Stream (courant du golfe) est un courant océanique qui prend sa source entre la Floride et les Bahamas et se dilue dans l'océan Atlantique vers la longitude du Groenland après avoir longé les côtes européennes. Son nom est abusivement utilisé pour désigner la dérive nord atlantique, voire l'ensemble de la circulation de surface de l'océan Atlantique Nord.

ce courant n'est pas assurée : d'une part il existe des preuves d'une relative stabilité du Gulf Stream mais également d'un possible affaiblissement de la dérive nord atlantique, d'autre part il y a des preuves de réchauffement au nord de l'Europe et dans les mers adjacentes, plutôt que l'opposé (Latif et al., 2004).

Depuis le début des années 1990, les satellites altimétriques, en particulier Topex-Poseidon et Jason, surveillent en permanence les variations du niveau de la mer, avec une précision remarquable et une couverture globale. Ces nouvelles observations montrent qu'au cours des 12 dernières années, le niveau moyen global de la mer s'est élevé de près de 3 mm par an, valeur significativement supérieure de celle mesurée par les marégraphes au cours du 20e siècle (CNRS, 2006).

L'organisation fédérale pour la recherche scientifique et industrielle (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation "CSIRO") surveille le niveau des mers depuis plusieurs années et mentionne que la tendance de l'élévation des niveaux des mers a une pente de 3.3mm/an (Figure 1.2).



**Figure 1.2:** Courbe de tendance du niveau global moyen des mers (1993-2014) (CSIRO, 2015)

Les changements du volume des océans attribués à la fonte des glaces et aussi dus aux variations de la densité de l'eau de mer, elles-mêmes causées par des variations de la température de l'océan.

L'utilisation de la cartographie par le système de positionnement mondial, la vue aérienne et l'altimétrie au laser, a permis de dresser un bilan sur les glaciers. Les glaciers de mi- latitude sont surtout de montagnes (Himalaya, Alpes ...) et sont ceux qui ont été les plus largement étudiés pendant les 150 dernières années. Pratiquement tous les glaciers des mi- latitudes sont dans une situation de bilan de masse négatif et reculent. Une petite augmentation de température de quelques

degrés seulement peut avoir un impact presque immédiat et défavorable sur les glaciers tropicaux. Les glaciers polaires représentent 99% de la glace sur terre (3km et plus d'épaisseur). Quelques-uns de ces derniers ont reculé d'une manière préoccupante (le glacier de Breiðamerkurjökull a reculé d'au moins 2 km entre 1973 et 2004) (IPCC, 2001).

Par ailleurs et d'un point de vue économique, une diminution des glaces polaires ouvrirait de nouvelles routes commerciales pour les navires, en rendant aussi le pétrole local plus facile à extraire, mais pourrait être facteur de régression de nombre d'espèces (dont plancton et poissons de haute valeur commerciale).

#### **1.3.6.1.2. L'humidité absolue**

Les modèles climatiques prédisent une augmentation de l'humidité absolue moyenne de l'air. Ce paramètre s'exprime en grammes d'eau par mètres cubes d'air. Les météorologistes mesurent plutôt l'humidité relative qui s'exprime en % sachant que 100% est le point de rosée. Sachant que l'eau est le principal vecteur de la thermodynamique atmosphérique (l'évaporation absorbe de l'énergie et la condensation la restitue), la puissance des précipitations devrait aussi augmenter.

#### **1.3.6.1.3. La précipitation**

Les modèles élaborés par les climatologues prévoient aussi une augmentation des précipitations (d'une manière générale), particulièrement les précipitations hivernales aux latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère nord. Dans cette zone, la variation des précipitations devrait aussi augmenter. Il pleut en effet davantage actuellement dans les zones subtropicales, comme en Arabie et au Sahara au grand plaisir des populations locales (Şen et al., 2012).

#### **1.3.6.1.4. La circulation thermo haline**

La circulation thermo haline est la circulation océanique, à grande échelle, engendrée par les différences de densité (masse volumique) de l'eau de mer. Ces différences de densité proviennent des écarts de température et de salinité des masses d'eau, d'où le terme de thermo -pour température- et haline -pour salinité. Température, salinité et densité sont reliés par la fonction d'état de l'eau de mer. Les eaux refroidies et salées plongent au niveau des hautes latitudes dans l'Atlantique-Nord (Norvège, Groenland, et mer du Labrador) et descendent vers le sud, à des profondeurs comprises entre 1 et 3 km, formant l'eau profonde Nord-Atlantique. Une partie remonte à la surface dans l'hémisphère sud, mais une grande part continue son périple et ne fera surface que dans l'océan Pacifique. On estime qu'une molécule d'eau fait ce circuit entier en environ 1 000/1 500 ans. Il

existe également des zones de formation d'eau dense dans l'océan Austral, au niveau des mers de Ross et de Weddell (Fieux, 2010).

#### **1.3.6.1.5. Glaces et couverture neigeuse**

Les scientifiques du GIEC prévoient, pour le XXI<sup>ème</sup> siècle une diminution de la couverture neigeuse, et un retrait des banquises. Les glaciers et calottes glaciaires de l'hémisphère nord devraient aussi continuer à diminuer. En revanche, la calotte glaciaire antarctique ne devrait pas diminuer au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle (IPCC, 2013).

#### **1.3.6.1.6. Des phénomènes à très long terme**

La majorité des climatologues, pensent que les phénomènes induits par l'émission des gaz à effet de serre vont se poursuivre et s'amplifier. Le troisième rapport du GIEC (IPCC, 2001) insiste en particulier sur les points suivants:

- Certains gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone, ont une espérance de vie longue, et influent donc sur l'effet de serre à moyen et long terme.
- De par l'inertie du système climatique, le réchauffement planétaire se poursuivra après la stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre. Ce réchauffement devrait cependant être plus lent.
- L'inertie, plus grande encore, de la masse océanique fait que l'élévation du niveau des mers se poursuivra même après la stabilisation de la température moyenne du globe. La fonte de calottes glaciaires, comme celle du Groenland, sont des phénomènes se déroulant sur des millénaires (Jean, 2002).

#### **1.3.6.2. Les conséquences du changement climatique sur l'homme et la nature**

Les changements climatiques peuvent avoir des conséquences négatives majeures pour l'humanité au XXI<sup>e</sup> siècle. Les plus attendues sont:

- une baisse des rendements agricoles potentiels dans la plupart des zones tropicales et subtropicales;
- une diminution des ressources en eau dans la plupart des régions sèches tropicales et subtropicales;
- une diminution du débit des sources d'eau issues de la fonte des glaces et des neiges, à la suite de la disparition de ces glaces et de ces neiges.

- une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes comme les pluies torrentielles, les tempêtes et les sécheresses, ainsi qu'une augmentation de l'impact de ces phénomènes sur l'agriculture;
- une augmentation des feux de forêt durant des étés plus chauds;
- l'extension des zones infestées par des maladies comme le choléra ou le paludisme;
- des risques d'inondation accrus, à la fois à cause de l'élévation du niveau de la mer et de modifications du climat;
- une plus forte consommation d'énergie à des fins de climatisation;
- une baisse des rendements agricoles potentiels aux latitudes moyennes et élevées (dans l'hypothèse d'un réchauffement fort) (Reiter, 2007).

#### **1.3.6.2.1. Au niveau biologique et écologique**

Les changements climatiques auront des effets soit néfastes, soit bénéfiques; cependant, plus ces changements seront importants, plus les effets seront néfastes.

Par exemple, un changement minime du climat pourrait avoir des effets bénéfiques sur certains rendements agricoles et forestiers; cependant, pour certains systèmes naturels, ces changements seront généralement néfastes.

En mer, de nombreuses espèces de poissons remontent vers les pôles. Sur Terre, on observe aussi une modification de l'aire de répartition de différentes espèces animales et végétales (Parmesan & Yohe, 2003). Cette modification est complexe et hétérogène. Dans certains cas, les espèces et écosystèmes reculent face à la désertification ou à la salinisation. Certaines limites d'aire de répartition montent plus haut en altitude, en particulier quand l'aire de l'espèce se déplace vers le nord (ou le sud dans l'hémisphère sud). Par exemple en Californie, pour 64 espèces végétales dont l'aire de répartition a été suivies depuis 1930 à 2010, la zone d'optimum climatique de ces plantes a diminué de 80 mètres d'altitude en moyenne (Shawn et al., 2011). Un suivi fait dans 13 États européens montre que les plantes de montagne «grimpent» en altitude, mais sont alors confrontées à une concurrence accrue. Certains forestiers pensaient que le réchauffement doperait la croissance des arbres d'Alaska mais en réalité elle diminue, sans doute à cause du stress des sècheresses estivales (Barber, 2000).

Ceci vaut aussi pour la faune terrestre. Par exemple, l'aire de répartition de la chenille processionnaire du pin est en phase d'expansion et a atteint Orléans en 1992 et Fontainebleau en 2005. La colonisation de l'espèce pourrait atteindre Paris en 2025. Cette expansion est emblématique de la propagation des bio-agresseurs des espèces forestières grâce au réchauffement climatique (INRA, 2013).

À l'échelle globale le scénario des modifications de la circulation des océans est un changement du climat catastrophique, une perte de biodiversité et des dommages irréversibles sur l'agriculture dans les écorégions les plus affectées.

A cause des effets potentiels sur la santé publique et sur l'économie, le réchauffement planétaire provoque l'inquiétude. Des changements environnementaux importants ont pu être reliés au phénomène du réchauffement planétaire. Les conséquences constatées (régression du manteau neigeux, montée des océans, changements météorologiques) peuvent influencer non seulement sur l'activité humaine, mais aussi sur l'écosystème. Dans un scénario où le réchauffement continuerait, certaines espèces seraient contraintes de migrer vers d'autres habitats (avec une possible extinction), tandis que d'autres pourraient s'étendre au-delà de leur habitat d'origine. Peu d'écorégions terrestres resteraient indemnes (Sophie et al., 1995).

Les scénarios courants prévoient une augmentation des températures moyennes, une augmentation de la productivité carbonée des végétaux et probablement une modification du régime des précipitations. Ces modifications vont affecter directement le fonctionnement trophique des communautés végétales, mais aussi les quantités de matières organiques arrivant au sol, leurs teneurs en élément nutritifs et leurs vitesses de minéralisation. Il s'ensuivra ainsi un effet en retour sur la nutrition minérale de la communauté végétale. De plus, ces modifications vont induire également un effet en retour sur la composition de l'atmosphère elle-même. En effet, le carbone organique des sols est le plus important réservoir.

Le carbone superficiel de la planète (1500Gt<sup>1</sup>) représente une source ou un puits potentiel majeur pour le CO<sub>2</sub> atmosphérique à l'échelle du siècle. L'augmentation de production carbonée doit se traduire par un stockage net de carbone dans tous les sols non perturbés et le bois des écosystèmes forestiers, contribuant ainsi à un effet en retour négatif sur le CO<sub>2</sub> atmosphérique. Ainsi, la biosphère continentale pourrait se comporter actuellement comme un puits net, non recensé, de 1,8 (+) ou (-) 1,3 Gt/ans, soit le tiers des émissions de combustible fossile (Siegenthaler et Sarmiento, 1993).

### **1.3.6.3. Conséquences positives pour l'humanité**

Jugie (2007) pense que certaines conséquences positives peuvent être prévues au XXI<sup>ème</sup> siècle:

- une plus faible mortalité hivernale aux moyennes et hautes latitudes;
- une augmentation éventuelle des ressources en eau dans certaines régions sèches tropicales et subtropicales;

---

<sup>1</sup> Gigatonnes ou milliards de tonnes.

- une hausse des rendements agricoles potentiels dans certaines régions aux latitudes moyennes (dans l'hypothèse d'un réchauffement faible);
- l'ouverture de nouvelles voies maritimes dans l'Arctique canadien à la suite de la fonte des glaces dans le passage du Nord-Ouest.

### **1.3.7. Les effets du changement climatique sur les ressources en eau**

Le changement climatique pourrait altérer considérablement les ressources en eau douce, pour un certain nombre de raisons. Les ressources nettes en eau sont principalement déterminées par la différence entre la quantité d'eau que la terre reçoit sous forme de précipitation et la quantité d'eau qui s'évapore. Le réchauffement de la planète va probablement modifier les taux d'évaporation et de précipitation dans certaines régions, ce qui pourrait influencer sur le niveau d'humidité des sols, le débit des rivières et le niveau d'eau des lacs. Si les températures plus élevées provoquent une intensification marquée de l'évaporation, même une augmentation importante des chutes de pluie pourrait ne pas suffire à éviter la diminution des ressources en eau douce. Inversement, une faible progression de l'évaporation accompagnée d'une forte augmentation des précipitations ferait augmenter les ressources en eau.

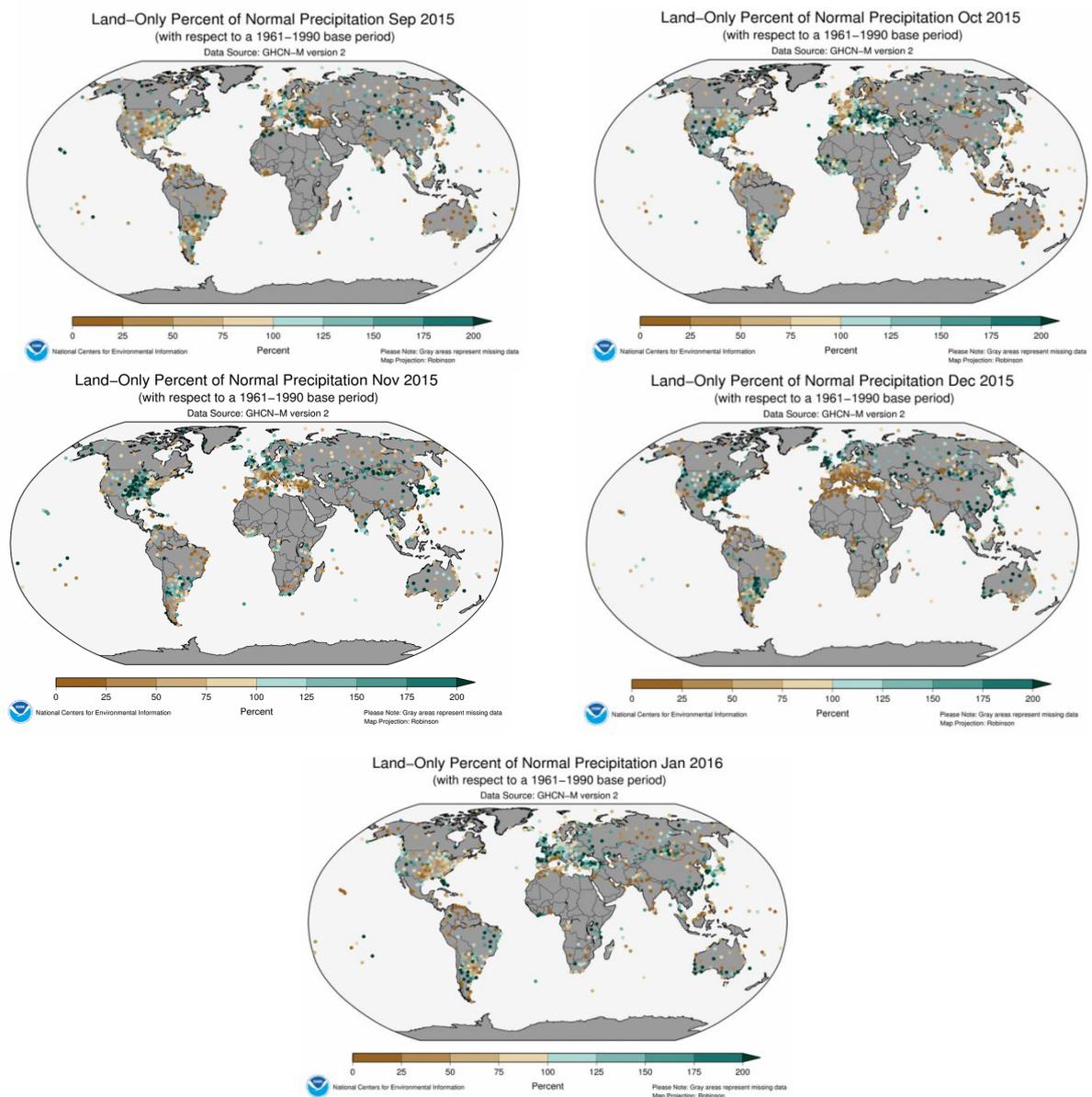
Le type de chutes de pluie peut également jouer un certain rôle. Les pluies qui tombent sous forme d'orages ou d'averses diluviennes disparaissent généralement en eaux de ruissellement plutôt que d'être absorbées par les sols. Il est probable que les accumulations de neige moins importantes apporteront moins d'eau au moment de la fonte printanière, qui se produira probablement plus tôt dans l'année. Dans de nombreuses régions, les réserves en eau pourraient être restreintes, et des sécheresses plus fréquentes et plus graves sont probables. Les variations des précipitations risquent d'être plus nombreuses. On peut s'attendre à une augmentation des besoins en irrigation. Ces éléments risquent d'aggraver la «concurrence» relative à la consommation d'eau nécessaire aux industries, à la faune, aux activités récréatives et à l'agriculture (Elouissi, 2004).

La diminution des niveaux d'eau et l'augmentation des températures pourraient altérer directement la qualité de l'eau, ou indirectement à cause du dragage de plus en plus fréquent des voies navigables et de la diminution du débit des rivières.

La communauté internationale a pris conscience du changement climatique en 1998, à la suite d'une sécheresse exceptionnelle aux Etats-Unis. «Le Mississippi était à sec, et cela a contribué à convaincre l'opinion de l'urgence d'agir», rappelle Hervé Le Treut (Ferey, 2001).

Pour la deuxième année consécutive, les précipitations annuelles étaient proches de la moyenne sur l'ensemble des pluviomètres terrestres dans le monde entier. Les précipitations pour 2013 étaient seulement 0,31mm au-dessus de la moyenne 1961-1990 de 1033mm. Comme indiqué

par la carte des précipitations normales de janvier 2016 (en pourcent) (Figure 1.3), issues du programme Global Historical Climatology Network-Monthly (GHCN-M), certaines parties de la planète ont une augmentation de leurs précipitations (en vert), tandis que d'autres parties ont des diminutions (en marron). L'Afrique du Nord est majoritairement touchée par des réductions avec des taux entre 25 et 50%. Localement, quelques régions ont des réductions de plus de 75%. En outre des précipitations extrêmes et des épisodes de sécheresses ont eu lieu à travers le monde (NOAA, 2014).



**Figure 1.3:** Cartes des précipitations normales de septembre 2015 à janvier 2016 (en pourcent) par rapport à la période de base 1961-1990 (NOAA, 2014)

La Figure 1.3 montre le déficit hydrique que vit le Nord de l'Algérie. Une réduction de plus de 50% dans la majorité de cette région est constatée (couleur marron).

Le Liban et la Jordanie ont reçu des chutes de neige rares le 10 Janvier 2013 (Jusqu'à 20 cm), marquant la plus grande tempête de neige dans ce domaine depuis 1992. Suite à son plus grand événement de chutes de neige au cours des 50 dernières années, en Novembre 2012, au début de Février, la Russie avait enregistré sa plus lourde accumulation de neige d'hiver dans plus d'un siècle, avec 216 cm de neige par rapport à la moyenne de 152 cm. Mars a apporté un supplément de 71 cm, le plus haut total du mois durant 20 ans. Le 2 Avril, la ville de La Plata, en Argentine, a reçu environ 300mm de pluie en trois heures. Ce qui a provoqué des inondations avec plus de 50 morts. Il est l'une des pires catastrophes météorologiques dans l'histoire de l'Argentine. L'Autriche a observé son plus humide, Mai-Juin, depuis 1858. Certains cours d'eau ont atteint des sommets historiques (Passau, en Allemagne a vu son niveau d'eau le plus élevé depuis 1501). Après près de trois décennies de faible pluviométrie saisonnière, les pays d'Afrique australe de l'Angola et de la Namibie ont été saisis par l'une des pires sécheresses (année 2013) au cours des 30 dernières années. Tandis que des inondations ont frappé plusieurs autres régions d'Afrique. En Juillet et Août, le sud de la Chine a connu de graves sécheresses. Les provinces de Zhejiang, Jiangxi, Anhui, Hunan, Hubei, Guizhou et Chongqing ont reçu environ 135 mm de précipitations durant la période 21 Juillet-1<sup>er</sup> Août (48% des précipitations moyennes) (NOAA, 2014).

### **1.3.8. Les incidences du changement climatique**

#### **1.3.8.1. Incidence du changement climatique sur les régions polaires**

Les changements polaires se produisent dans le cadre de vie quotidienne de plus de 4 millions de personnes. Les diminutions de la superficie et de la masse des glaces ont un impact local immédiat sur les écosystèmes terrestres et marins. Les modifications des chutes de neige et le recul des glaciers auront une incidence sur des millions de gens dont l'approvisionnement quotidien en eau pour leur consommation personnelle ou pour l'agriculture dépend de l'enneigement et des sources glaciaires. Mais, plus encore, les scientifiques savent que les régions polaires jouent un rôle important dans la régulation du climat de toute la planète (Pierre, 2007).

#### **1.3.8.2. Incidence du changement climatique sur les forêts**

Le changement climatique aura des conséquences dramatiques sur la distribution des forêts existantes. Les arbres ne sont pas équipés pour s'adapter rapidement aux changements

environnementaux en raison de leur longue période de maturation et du fait qu'ils ne peuvent se déplacer d'un endroit à l'autre.

Les forêts des hautes latitudes seront plus touchées que celles des régions tropicales et subtropicales, mais les forêts montagneuses des tropiques situées à haute altitude seront elles aussi menacées. Tout changement des conditions de croissance provoquera des changements tant au niveau des forêts tropicales qu'à celui des forêts tempérées et boréales. La capacité de survie d'un grand nombre d'essences s'en trouvera compromise, particulièrement là où leur croissance est déjà entravée par des conditions marginales. Du côté positif, la hausse de la température, de la précipitation et du taux de gaz carbonique favorisera la croissance et l'expansion de certaines forêts (John, 2001).

### **1.3.9. Le changement climatique à l'échelle de la méditerranée**

Le changement climatique touche aussi les océans et les mers notamment la mer méditerranée. Des changements au niveau de la circulation marine, de la faune et la flore, de l'oxygène et de la production biologique.

Planton et al. (2015) mentionnent que divers aspects peuvent être rappelés:

- L'élévation du niveau de la mer (envisageable mais modeste par rapport à ce qu'a connu le monde méditerranéen au cours des dernières phases glaciaires, notamment la dernière où il a largement dépassé les 100 m).
- L'augmentation des températures, qui devrait entraîner des modifications notables, en particulier au nord de la méditerranée où une augmentation annuelle moyenne de 3°C déterminerait un décalage d'un étage de végétation.
- Les variations de précipitations, avec des prévisions très délicates à interpréter. La plupart des spécialistes admettent que les moyennes annuelles ne devraient pas varier beaucoup, sauf augmenter légèrement en raison de l'élévation des phénomènes d'évaporation liés à l'élévation des températures.
- Les autres phénomènes climatiques, encore plus délicats à évaluer: accroissement de la force des vents, modification des courants océaniques.

L'accroissement de l'évaporation devrait augmenter localement la pluviosité hivernale, sauf dans les pays méditerranéens qui verraient la sécheresse s'accroître (IPCC, 2007).

La répartition des précipitations s'est modifiée au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Elles diminuaient au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du Sud. D'autres experts estiment toutefois les données actuelles trop rares et incomplètes pour qu'une tendance à la hausse

ou à la baisse des précipitations puisse se dégager sur des zones de cette ampleur (D'Aleo et al., 2007),

Une anticipation des dates clefs du développement végétal (bourgeonnement, floraison, récolte) a été observée pour l'ensemble des cultures, sous les climats tempérés et méditerranéens. Ainsi, pour le blé, la sortie des épis a lieu 8 à 10 jours plus tôt qu'il y a vingt ans (Debaeke et al., 2014). Dans de nombreux cas, les dates de vendanges sont régulièrement avancées, comme en Bourgogne (Ladurie, 2004).

Il y a Divers signatures d'évolutions du climat et de l'environnement qui ne sont pas encore vraiment perceptibles à l'échelle locale des mesures terrestres ou marines. Comme les changements apparus dans les caractéristiques températures et salinité des eaux profondes du bassin occidental.

Les évolutions des concentrations en métaux-traces et en éléments nutritifs donnent également des exemples d'état non-stationnaire des cycles géochimiques par suite des changements de l'environnement.

Dans l'écosystème biologique, les migrateurs lessepsiens, les faunes et flores opportunistes, les proliférations algales ou marées rouges...sont les signatures de changements rapides induits par les activités humaines (conséquences du canal de suez, du barrage d'Assouan, de l'importation de naissain du japon, de l'engouement pour l'aquariologie, de l'eutrophication côtière...) et par un probable changement climatique. Aujourd'hui, la plupart de ces changements biologiques concernent les poissons et les proliférations de plancton spécifique avec des conséquences socio-économiques (pêche et tourisme). Suite à une demande de l'agence STOA du parlement européen, un rapport «pollution de la mer méditerranée» fut rédigé pour montrer les récents changements environnementaux et le bien-fondé de la préoccupation des autorités européens pour l'avenir de la méditerranée (Briand, 1993).

#### **1.3.9.1. Changements des régimes thermiques et hydrologiques «impact sur les hydro systèmes continentaux et leur peuplement»**

D'après Picon (2000), les changements climatiques devraient se traduire par:

- l'élévation de la température moyenne.
- l'augmentation du volume des précipitations annuelles.
- l'accentuation des contrastes saisonniers: une saison des pluies marquée par des averses et des orages brutaux, une saison sèche plus longue et plus rigoureuse. On peut s'attendre à une évolution saisonnière très marquée de la superficie et du volume des biotopes aquatiques. La réponse des peuplements aquatiques aux stress hydriques et thermiques se

traduira par des changements adaptatifs de la biologie, de la dynamique et de la répartition des populations, de la composition et de la richesse taxonomiques des communautés.

#### **1.3.9.1.1. Le changement thermique**

Le changement thermique aura pour conséquences :

- Températures maximales plus élevées.
- Plus de journées chaudes et de vagues de chaleur sur presque toutes les terres émergées (très probable).
- Températures minimales plus élevées.
- Moins de journées froides, de jours de gel et de vagues de froid sur presque toutes les terres émergées (très probable).
- Assèchement estival plus accentué à l'intérieur de la plupart des continents aux latitudes moyennes et risque de sécheresse (probable) (Ahmad et al., 2001).

#### **1.3.9.1.2. Le changement hydraulique**

Le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (barrage, retenue ...) doivent prendre en considération les changements climatiques envisagés. Pour étudier les impacts du changement climatique sur les débits d'écoulement et qualité des eaux, des scénarios climatiques doivent être utilisés. Ils sont basés sur des modèles de circulation générale (General Circulation Models "GCMs", Hadley Centre Coupled Model version 3 "HadCM3"<sup>1</sup>). Cependant, Kleinen dans une étude sur les risques d'inondations (Kleinen et Petschel-Held, 2007), mentionne que les GCMs peuvent fournir le changement de la température globale moyenne, ce qui n'est pas suffisant pour les conditions plus locales. Le calcul du changement de la température moyenne doit se faire selon des caractéristiques locales. La procédure du "DownScaling" en est un exemple.

#### **1.3.9.2. Conséquences possibles des changements climatiques sur la flore et la végétation du bassin méditerranéen**

On peut se questionner sur les modifications éventuelles qui pourraient être induites sur la flore et la végétation en région méditerranéenne par le biais de «changements globaux».

---

<sup>1</sup> Coupled atmosphere-ocean general circulation model (AOGCM) développé au Centre Hadley (UK).

### 1.3.9.2.1. L'influence des "changements globaux"

Il est difficile de se faire une idée précise de l'impact que pourraient avoir ces transformations sur la flore et la végétation dans un siècle, période relativement brève à l'échelle de la restructuration éventuelle des paysages végétaux, en particulier autour de la méditerranée. Du point de vue thermique, les fourchettes envisagées se situent entre une élévation de 1 et 2 à 2,5 °C sur une trentaine d'années, voire 4 à 5 °C au cours de ce siècle, qui pourrait se solder, dans la deuxième situation, par une extension notable de l'étage thermo-méditerranéen vers le nord de la région méditerranéenne (Roland, 2000).

Il existe encore assez peu d'études spécifiques sur les conséquences pour les végétaux d'ornement et les couverts urbains. Ce sont donc celles, beaucoup plus documentées, sur les espèces cultivées (en agriculture) ou gérées (en sylviculture) qui peuvent nous donner les indications les plus complètes pour avoir une idée des grandes lignes des impacts attendus (Seguin, 2012).

En prenant le cas de la France, au niveau des grandes cultures, les résultats des simulations effectuées à l'INRA avec les modèles de culture sur le blé et le maïs permettent de conclure à des effets légèrement positifs sur le premier, avec des augmentations de rendement allant de 2,5% à 5,7%, et des effets plus variables sur le maïs (+10% à -16% dans le cas d'une culture irriguée dans le Sud-Est) (Delecolle et al., 1999).

Pour les cultures pérennes, essentiellement arbres fruitiers et vigne, les hivers doux risquent de créer des troubles physiologiques (chute de bourgeons, fruits avortés). Ensuite, l'action de la chaleur reprendra vite le dessus et l'avancée de la date de floraison peut conduire paradoxalement à augmenter le risque de gel, et à envisager des conditions climatiques moins favorables pour la fécondation et la pollinisation, en dépit du réchauffement des températures (Seguin et al, 2006). Pour la vigne, la période de la maturation sera décalée, ce qui a pour effet de 'démultiplier' le réchauffement, en ajoutant au seul effet climatique un effet lié à l'avancée du calendrier, avec des conséquences certaines sur la qualité de la vendange, plus chargée en sucre (et donc en degré alcoolique) et moins en acide (Lebon, 2002).

Une remontée des cultures est envisageable, à l'instar de ce qui pourrait se passer pour les espèces forestières, dont les cartes de potentialité bioclimatique seront profondément bouleversées: un réchauffement de 1° C équivaut à environ 180 km vers le Nord. En zones de montagne, où 1° C correspond à 150 m en altitude, de nouvelles potentialités pourraient apparaître (Badeau et al., 2007).

En raison des phénomènes de résilience caractéristiques du capital biologique méditerranéen, les transformations des paysages resteront longtemps minimes. Elles ont peut-être déjà commencé. Dans les portions méridionales de la région méditerranéenne, où ces phénomènes

seraient susceptibles de présenter un impact écologique plus intense, avec en particulier une remontée vers le nord du climat saharien et des espèces qui lui sont liées, les phénomènes de modification du paysage, comme la disparition des paysages arborés, seront beaucoup plus dépendants des impacts anthropiques que d'éventuelles modifications climatiques (Roland, 2000).

#### **1.3.9.2.2. Les maladies émergentes consécutives au réchauffement et à l'extension des zones humides**

Comme Les maladies virales à vecteurs ou arboviroses sont transmises par des arthropodes (moustiques, tiques, phlébotomes), toute modification de leurs aires de distribution entrainera une modification des cartes des maladies à l'échelle mondiale.

Les facteurs environnementaux jouent un rôle majeur dans l'apparition d'une arbovirose. Le cycle biologique du vecteur est très dépendant de la température, au même titre que le cycle de multiplication du virus chez ce vecteur. Les zones humides favorisent le développement des populations de vecteurs. Les modifications des aires de répartition de vecteurs compétents favorisent l'émergence de telle ou telle arbovirose. De même, les activités de l'homme modifient l'environnement, créant des situations favorables à l'émergence d'arboviroses. Par contre, les modifications climatiques enregistrées avec une phase d'augmentation des températures atmosphériques ne sont pas un phénomène récent qui, schématiquement, pourrait faciliter la transmission de certains virus via des vecteurs (Hervé, 2000).

#### **1.4. Le changement climatique aux pays du Maghreb**

Le climat de la zone méditerranéenne se situe dans une zone climatique de transition entre deux autres régimes bien plus réguliers (tempéré et tropical).

Dans la zone méditerranéenne, l'année se divise en deux saisons. Compte tenu de la latitude, la température varie dans l'année. Il existe donc une saison froide et une saison chaude.

En Afrique du Nord, les pays du Maghreb se trouvent dans une région aride à semi-aride avec un climat saharien dans la partie sud, océanique dans la partie Ouest et méditerranéen dans la partie Nord. Les changements climatiques, pour cette partie du Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie) très peu émettrice de gaz à effet de serre (entre 1.5 et 3.5 teC /Hab/an), représentent une véritable menace pour son développement socio-économique et pour la vie des populations. Cette vulnérabilité extrême et le besoin de stratégies d'adaptation de secteurs clés de l'économie de la région aux impacts possibles de ces changements climatiques représentent de vrais enjeux pour le développement durable de ces pays (Agoumi, 2003).

### 1. 5. Le changement climatique en l'Algérie

L'Algérie est située au nord-ouest de l'Afrique en bordure de la méditerranée. Bordiers de la Méditerranée et du désert le plus chaud du monde, elle ne bénéficie du climat méditerranéen subhumide que sur une étroite frange littorale alors que les deux-tiers du territoire est exposé aux climats semi-aride et aride. Cette situation influe sur les précipitations qui sont marquées par leurs fortes variabilités spatio-temporelles. Par ailleurs, la pénurie d'eau s'intensifie sous l'effet de la poussée démographique, de l'urbanisation accélérée et du développement économique, notamment dans le domaine agricole.

Les pluies annuelles croissent du sud au nord et de l'ouest à l'est. Les valeurs plus élevées des pluies en altitude, à proximité du littoral, sont liées aux masses d'air humide venues du Nord. Au Nord-Est, les pluies dépassent 850 mm et diminuent vers le sud jusqu'à des valeurs de l'ordre de 100 mm/an. On constate aussi des valeurs de pluies plus élevées sur les Monts de l'Oursenis, de Tiaret, de Tlemcen et de l'Atlas Blidéen. Les précipitations d'hiver concernent plutôt la partie Nord-Est. Les vents du Nord-Ouest se vident de leur humidité sur le littoral et sur les massifs montagneux. La pluviométrie est toujours en étroite relation avec les flux du Nord-Est dominants et avec les vents de direction Nord-Ouest. En été, la pluviométrie chute considérablement. Les pluies de cette saison ont un caractère orageux. Elles croissent d'Ouest en Est et sont plus importantes sur les sommets de l'Est. La longitude est ici le principal facteur d'explication de la répartition spatiale des pluies (Meddi, 1992).

Les pluies d'automne croissent du Sud au Nord et d'Ouest en Est. Les vents responsables de ces pluies sont de direction Nord, Nord-Ouest. Les régions qui reçoivent les pluies les plus importantes sont les mêmes qu'en hiver et qu'au printemps. La diminution des pluies constatée durant les trente dernières années, qui a touché l'ensemble de l'Algérie mais surtout l'Ouest, se chiffre à (Meddi et al, 2002):

- 30 à 40% à l'échelle annuelle et plus de 40% en hiver et au printemps dans la région de Mascara;
- 20 à 30% sur le littoral allant du centre à l'ouest du pays;
- 20% à l'échelle annuelle et 25% en hiver au centre du pays.

Les sécheresses pluriannuelles posent un problème crucial pour l'économie des pays maghrébins. 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. En moyenne, 190km<sup>3</sup>/an sont disponible dont 175km<sup>3</sup>/an sont évapo-transpiré. Le reste est répartie en eau de surface (11km<sup>3</sup>/an) et en eau souterraine (4km<sup>3</sup>/an) (Tableau 1.2).

**Tableau 1.2** : Bilan et potentiel en eau renouvelable en km<sup>3</sup>/an (moyenne 1981-2010) (Mutin, 2011; FAO, 2010)

	<b>P</b>	<b>ETR</b>	<b>ER/ surface</b>	<b>ER/ souterraines</b>
<b>Algérie</b>	190,00	175,00	11,00	4,00

P: Précipitations; ETR: évapotranspiration réelle; ER/surface: Eaux renouvelables de surface; ER/souterraines: Eaux renouvelables souterraines.

D'après le Tableau 1.2, les ressources renouvelables de l'Algérie sont de l'ordre de 15km<sup>3</sup> dont plus de 73% sont représentés par les eaux de surface.

Les données climatiques relevées dans la région durant le XX<sup>ème</sup> siècle indiquent un réchauffement durant ce siècle estimé à plus de 1°C avec une tendance accentuée les 40 dernières années (Agoumi, 2003).

En plus, le suivi de l'envasement des retenues, a permis d'évaluer à près de 32 million de m<sup>3</sup> la capacité perdue par envasement en moyenne chaque année (Remini et Remini, 2003). Ceci vient aggraver la situation du déficit hydrique.

L'augmentation de la température et l'accroissement de l'évapotranspiration ont induit un déficit hydrique notable du sol avec des conséquences graves sur l'environnement et une tendance à l'aridification et à l'accélération du processus de désertification. Remini (2005) constate que durant la période 1992-2002, la quantité d'eau évaporée représente la moitié du volume consommé par l'irrigation, l'alimentation en eau potable et l'industrie, ce qui est considérable. La moyenne annuelle de l'évaporation (pour la période 1992-2002) est de 250 millions de m<sup>3</sup> pour 39 barrages ayant une capacité totale de 3,8 milliards de m<sup>3</sup>, soit une perte moyenne annuelle de 6,5 % de la capacité totale. Le volume total d'eau perdue durant dix années d'exploitations (1992-2002) avoisine la valeur de 2,5 milliards de m<sup>3</sup>.

Les augmentations de températures et les réductions des précipitations prévues par les scénarios de changement climatiques induiront:

- Réduction de la durée des cycles végétatifs de cultures (degrés jours).
- Risque de non hibernation de certaines espèces arboricoles (degrés froids).
- Baisse des rendements en régime de cultures pluviales.
- Diminution des ressources en eau d'où une limitation à l'extension de l'irrigué par rapport aux potentialités recensées.
- Accroissement des besoins et de la demande en eau pour irrigation.
- Affectation des zones agricoles côtières par l'élévation des niveaux de la mer: salinité des sols et des nappes côtières (IPCC, 2013).

En Algérie, de par la variabilité naturelle du climat et même si durant la dernière vingtaine d'années, la sévérité de la sécheresse en intensité et durée a été plus importante en particulier pour l'Ouest du pays, notre pays a déjà connu des périodes similaires dans le proche et le lointain passé et en connaîtra certainement dans le futur. A titre d'exemple, durant les trois dernières décennies, le Nord de l'Algérie a subi de sévères sécheresses durant les saisons 1965-1966; 1970-1971; 1977-1978; 1981-1984; 1987-1990 et 1993-1994.

L'Algérie connaît depuis l'année 1975 une baisse graduelle de la pluviométrie. Le changement climatique augmente et continuera d'augmenter les risques de désertification dans les régions sèches.

Les données montrent aussi une augmentation nette de la fréquence des sécheresses et inondations. Ainsi on est passé d'une sécheresse tous les dix ans au début du siècle à cinq à six années de sécheresses en dix ans actuellement. Cette nouvelle situation est accentuée par la nature excessive des rares années humides avec une pluviométrie très forte et répartie sur une courte période de l'année: on voit ainsi des centaines de millimètres d'eau tomber dans des régions arides en quelques jours et rien pour le reste de l'année. Un sol aride, une érosion forte, un ruissellement excessif, sont des caractéristiques de l'Algérie qui favorisent des catastrophes naturelles en relation avec ces fortes précipitations et ces inondations (Agoumi, 2003).

La région éco-géographique de l'Algérie est constituée de pays en développement où la productivité des terres arables demeure encore très faible. C'est une région classée dans la catégorie des zones socialement vulnérables où l'on rencontre surtout des populations à faibles revenus et faisant face à des déficits alimentaires répétés. L'importance du climat se fait sentir sur pratiquement tous les aspects de la vie socio-économique que ce soit sur les rendements céréaliers, la disponibilité des ressources en eau, la santé humaine et animale, pour ne citer que ces trois secteurs. Il faut souligner que la récurrence des crises alimentaires n'est pas seulement liée au seul climat, des facteurs comme les invasions acridiennes (au nombre de quatre ces 20 dernières années) peuvent provoquer d'importants dégâts aux productions agro-sylvo-pastorales et des perturbations socio-économiques et environnementales importantes (Glossaire du GIEC sur le Changement Climatique, 2006).

**«Les pays en développement sont les plus vulnérables, à cause de leur manque de moyens financiers, techniques et organisationnels pour s'adapter»**, soulignent les scientifiques du groupe intergouvernemental sur le changement climatique (IPCC, 2007).

Outre le risque de sécheresse, et comparée aux autres pays du monde, le passif de l'Algérie a été marqué par de nombreuses inondations. Les inondations en Algérie sont les plus meurtrières de celles survenues dans les pays du bassin méditerranéen:

- 10-11 novembre 2001 (Bab El Oued– Alger): pluies diluviennes, 733 victimes, 30 000 de sans-abris et importants dégâts matériels.
  - 22 octobre 2000 (Ouest algérien): plus de 24 décès.
  - Octobre 1994 (plusieurs régions du pays): 60 décès et des dizaines de disparus au cours de dix jours d'inondations.
- 20 octobre 1993 (Ouest algérien): 22 décès et 14 blessés à Qued Rhiou (Boulghobra, 2003).

## II. Chapitre 2 : Les modèles climatiques

### 2.1 Introduction

Les simulations climatiques, tout comme la prévision du temps, doivent leur essor au développement spectaculaire des ordinateurs au cours du XX<sup>e</sup> siècle. C'est le traité de l'Anglais Richardson (1922) "Weather Prediction by Numerical Process", qui le premier expose comment les tendances des variables atmosphériques (température, vents...) peuvent être calculées en différents points répartis dans l'espace, en substituant aux équations différentielles décrivant la circulation atmosphérique un jeu d'équations basées sur des différences algébriques. Mais, d'après lui, 64 000 personnes auraient été nécessaires pour effectuer ces calculs! Richardson, pensait que c'était impossible de faire de pareille calcul et que c'était seulement un rêve. Voici ces propos dans son livre: «Peut-être un jour à l'avenir sombre, il sera possible de faire avancer les calculs plus rapides que le temps et à un coût inférieur à la sauvegarde de l'humanité en raison de l'information obtenue. Mais cela est un rêve».

Il fallut attendre 1950 pour Charney, Fjortoft et von Neumann réalisent la première prévision numérique avec un modèle d'atmosphère simplifié (Bouyssel, 2015). Dans les années soixante, la prévision du temps devient petit à petit opérationnelle dans de nombreux pays. Depuis, les simulations climatiques n'ont cessé de prendre de l'ampleur. Dans les années soixante-dix des modèles d'atmosphère ont été développés par plusieurs centres de recherches. A partir des années quatre-vingt-dix, les modèles considéraient en plus de l'atmosphère, les couplages avec les autres composantes du système climatique. Ce qui donnera naissance aux modèles climatiques couplés.

Les modèles couplés travaillent en mode couplé. Mode par lequel au moins deux modèles s'échangent des données à leur interface en cours de simulation afin de s'influencer mutuellement (ex. modèle atmosphérique couplé avec un modèle océanique). Par opposition, en mode non couplé (off-line), les sorties d'un modèle servent d'intrants à un autre modèle sans possibilité de rétroactions entre les deux (OMM, 1992).

La tendance actuelle quand on étudie le climat global de la planète est de coupler les modèles atmosphériques à des modèles représentant les autres parties du système terre: l'océan, la végétation, les fleuves, la bio-géochimie marine, la chimie atmosphérique, les calottes polaires, le cycle du carbone.

En 1988, le souci climatique émerge des laboratoires des sciences du climat. L'élévation des teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre (GES) ne fait plus de doute. Les premiers calculs montrent que le changement climatique provoqué par le doublement de la teneur en CO<sub>2</sub> serait proche de celui qui sépare une ère glaciaire d'une ère chaude. Plusieurs organismes et agences font

pression sur l'ONU pour diriger une expertise climatique. Afin d'empêcher une agence de l'ONU, soupçonnée de militantisme écologique, de mettre la main sur le dossier climatique, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) (en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change "IPCC") a été créé en novembre 1988, à la demande du G7 (Etats-Unis, Japon, Allemagne, France, Grande-Bretagne, Canada, Italie), par deux organismes de l'ONU: l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). La décision du G7 avait été prise sous la pression de Ronald Reagan et Margaret Thatcher (Huet, 2014).

Le météorologiste suédois Bert Bolin a joué un rôle important lors de sa création et l'a dirigé de 1988 à 1997. Les autres membres fondateurs sont le canadien Maurice Strong (qui s'est exilé en Chine à la suite de son implication dans le scandale du détournement de fonds dans le cadre du programme "Pétrole contre nourriture" de l'ONU en Irak et décédé le 28 novembre 2015) et le britannique John T. Houghton (Connor, 2010).

Le GIEC a pour mandat d'évaluer, sans parti pris et de manière méthodique, claire et objective, les informations scientifiques, techniques et socio-économiques disponibles en rapport avec la question du changement du climat. Le GIEC travaille à rendre compte des différents points de vue et des incertitudes, tout en dégagant clairement les éléments 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 gaz à effet de serre. L'une des principales activités du GIEC consiste à procéder, à intervalles réguliers (1990, 1995, 2001, 2007, 2014) à une évaluation de l'état des connaissances (Badin et al., 2013).

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.

## **2.2. Modèles climatiques**

Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, le GIEC utilise les modèles du système climatique et des études économiques et démographiques, qui composent un large éventail d'évolutions possibles du climat. Les simulations climatiques sont réalisées à partir de modèles numériques appelés Modèles de Circulations Générale (MCG). Pour simuler au mieux l'évolution du climat, de nombreux forçages doivent être pris en compte, qu'ils soient naturels (éruptions volcaniques, activité solaire, ...) ou anthropiques (émissions de gaz à effet de serre, aérosols,...). Si pour le climat passé récent l'ensemble des forçages peuvent être déterminés

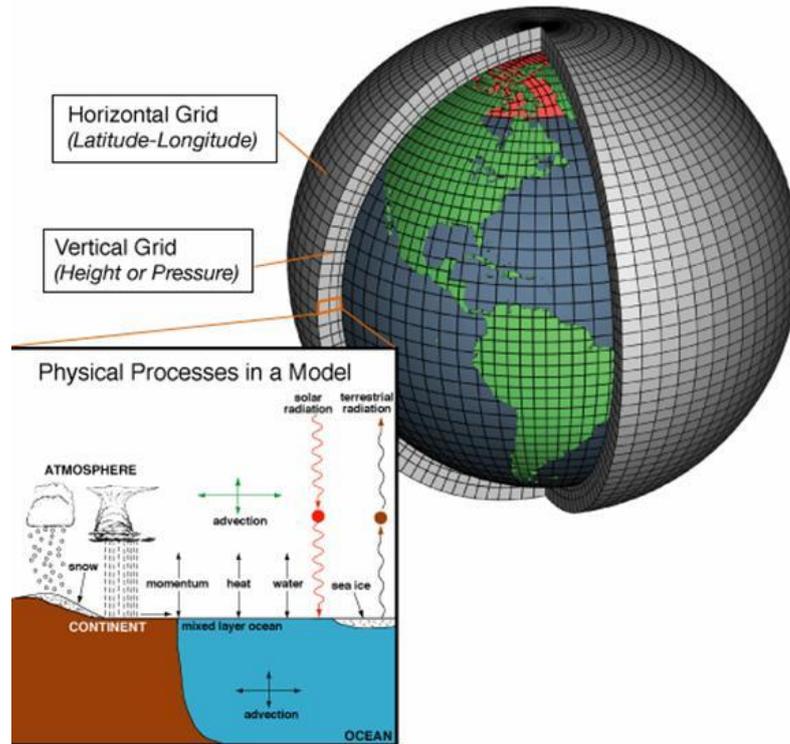
à partir d'observations, pour les simulations du climat futur, seul les forçages anthropiques sont déterminés au travers de scénarios d'émissions (Ouzeau et al., 2014).

Un modèle climatique n'est rien d'autre qu'un logiciel très complexe, dont le but est de reproduire aussi fidèlement que possible le comportement du climat terrestre. Il s'agit donc d'un ensemble de programmes construit de la manière suivante:

- On établit un maillage artificiel de la surface géographique : on découpe virtuellement la zone géographique en carré de plusieurs kilomètres de côté. La taille de la maille conditionnera le temps de calcul informatique.
- On prend en compte le volume atmosphérique concerné en créant des "boîtes à chaussures" le long de la verticale, avec quelques dizaines de niveaux de "boîtes" en tout.
- 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.
- On exprime ensuite les relations physiques entre chaque paramètre et chaque "boîtes à chaussures" sous la forme de relations mathématiques unissant la température de surface à l'évaporation, ou encore les équations auxquelles l'atmosphère doit obéir en permanence.
- On programme l'ensemble de ce modèle mathématique, en langage informatique.

Au bout de ce processus, on teste le modèle par rapport aux observations de terrains, ce qui finalement, améliore le modèle précédent (Adam et al., 2013).

Le maillage des modèles climatiques découpe la Terre en horizontale et en verticale (Figure 2.1). Les dimensions du maillage d'un modèle est en générale quelques centaines de km de côté. Cette dimension est à chaque fois réduites selon la puissance informatique disponible (Figure 2.2).



**Figure 2.1** : Exemple d'un maillage horizontal et vertical (Spencer and Braswell, 2008)

La résolution des modèles climatiques globaux au cours du temps a évolué. Avant le premier rapport d'évaluation du GIEC (FAR pour First Assessment Report, décennie 1980), la taille de la maille était typiquement de 500 km de côté. A cette époque, la France ne comptait que pour 4 mailles dans un modèle. Certains modèles dits régionaux utilisaient des mailles plus petites - de l'ordre de 50 km - au-dessus d'une région particulière mais alors les mailles pour le reste du monde pouvaient mesurer jusqu'à 1000 km de côté. Au moment du 2<sup>ème</sup> rapport d'évaluation (SAR pour Second Assessment Report; 1995) la taille de la maille avait été divisée par 2, et 10 ans plus tard (au moment de l'AR4, pour 4<sup>th</sup> Assessment Report, publié en 2007) elle a encore été divisée par 2 par rapport à la décennie 1980 (Figure 2.2). A cet effet, les modèles climatiques deviennent de plus en plus précis (IPCC, 2007).

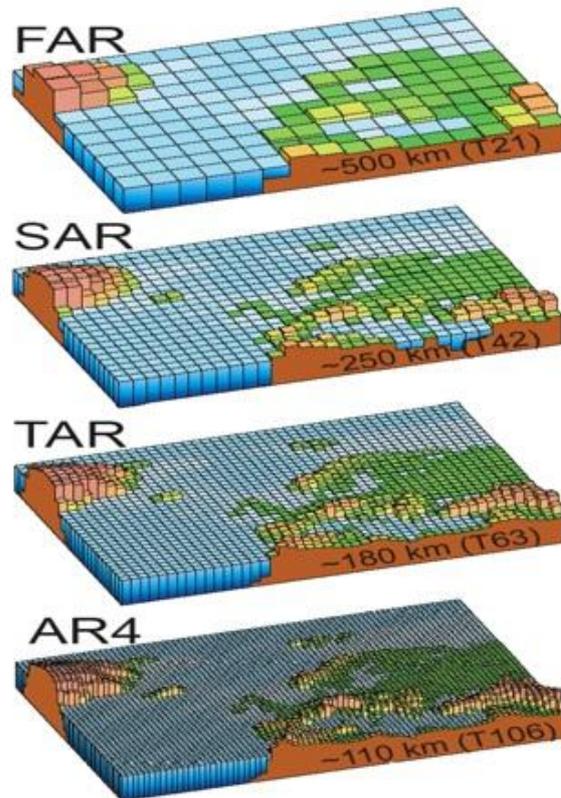


Figure 2.2 : Comparaison des modèles climatiques par leurs dimensions de maille (IPCC, 2007)

### 2.3. Principe de fonctionnement d'un modèle climatique

Puisque toutes les prédictions du climat futur reposent sur les sorties des modèles climatiques, il est important de comprendre les bases de ces modèles, comment ils fonctionnent et quelles en sont les limites.

Un Modèle de Circulation Générale de l'Atmosphère calcule l'évolution temporelle de diverses variables, essentiellement le vent, la Température et l'humidité, en différents points d'un "maillage" 3D qui couvre l'ensemble de l'atmosphère (chacun contient plusieurs niveaux verticaux). A partir d'un état initial, le modèle calcule l'évolution de ces variables, pas de temps après pas de temps.

- A un instant  $t$  on connaît la variable,  $X_t$ , en tout point de l'atmosphère ( $X$  peut-être  $u$  "vitesse du vent en  $m/s$ ",  $T$  "température en  $^{\circ}C$ ", ou  $p_s$  "la conservation de masse").
- Calcul:
  - On calcule alors son évolution due à l'advection<sup>1</sup> ( $u, v, T$ ), les forces de pression et la force de Coriolis ( $u, v$ ) ou la conservation de la masse ( $p_s$ ).  
C'est à dire tous les termes explicitement représentés par les équations de la

<sup>1</sup> L'advection est le transport (ou le déplacement) d'une quantité telle que la chaleur, l'énergie interne, un élément chimique arbitraire, les charges électriques par le mouvement (et donc la vitesse) du milieu environnant (eau ou air). Exemple: advection des masses d'eau chaude par le Gulf Stream.

dynamique du fluide. On appelle cette évolution, la tendance dynamique de X:  $(\partial_t X)_{dyn}$ .

- On calcule aussi son évolution due aux échanges turbulents avec le sol (u, v, T) et dont les mouvements sont de trop petites échelles pour être représentés par la dynamique résolue par la grille du modèle. On calcul aussi l'évolution de la température liée aux forçages radiatifs Infrarouge venant du sol, et visible venant du soleil et de la réflexion par le Sol. On appelle cette évolution la tendance physique de X:  $(\partial_t X)_{phys}$  (Lott et Guez, 2007).

- Au pas de temps suivant,  $t+dt$ , on calcul  $X_{t+dt}$  fonction de  $X_t$  et des tendances, c'est l'intégration des variables dans le temps.
- $X_{t+\delta t} = X_t + (\partial_t X)_{dyn} \delta t + (\partial_t X)_{phys} \delta t$

L'un des avantages de ces modèles est qu'ils peuvent facilement permettre une comparaison "virtuelle" de deux évolutions du monde. Il est ainsi possible de faire des prévisions pour différents scénarios. Pour prendre en compte une perturbation humaine qui évolue au cours du temps, par exemple l'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre, il suffit de rajouter une équation dans la liste, ou d'imposer une valeur donnée à un paramètre donné.

La modélisation est une discipline qui ne date pas d'hier: les premiers modèles - purement atmosphériques - datent des années 60 (le premier modèle atmosphérique date même de 1950, et a été testé sur le premier ordinateur existant, l'ENIAC). Cette discipline a eu un essor rapide grâce à l'augmentation de la puissance informatique disponible et l'avènement des satellites (qui fournissent une pléthore de données d'observation qui ont pu être confrontées aux sorties de modélisation). Les premières "alertes" sur le réchauffement climatique datent de la fin des années 1960.

L'augmentation de la puissance informatique permet d'utiliser des mailles de petite taille (donc plus nombreuses) et de permettre ainsi de couvrir de plus en plus de régions.

#### 2.4. Liste des modèles de circulation atmosphérique

Le Tableau 2.1 donne la liste des modèles de circulation atmosphérique ayant une collaboration avec le GIEC (IPCC, 2013).

**Tableau 2.1** : Liste des modèles de circulation atmosphérique

Agency	Model name
Beijing Climate Center, National Climate Center, China Meteorological Administration, No.46, S.Road, Zhongguancun Str., Beijing 100081, <b>China</b>	BCC-CM1
Bjerknes Centre for Climate Research (BCCR), Univ. of Bergen, <b>Norway</b>	Bergen Climate Model (BCM) Version 2
<b>Canadian</b> Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Coupled Global Climate Model (CGCM3)
<b>Canadian</b> Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Coupled Global Climate Model (CGCM3)
Centre National de Recherches Meteorologiques, Meteo France, <b>France</b>	CNRM-CM3
Meteorological Institute of the University of Bonn ( <b>Germany</b> ), Institute of KMA (Korea), and Model and Data Group.	ECHO-G = ECHAM4 + HOPE-G
<b>CSIRO, Australia</b>	CSIRO Mark 3.0
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA ( <b>USA</b> )	CM2.0 - AOGCM
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA ( <b>USA</b> )	CM2.1 - AOGCM
Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science, <b>Russia.</b>	INMCM3.0
Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), <b>France</b>	PSL-CM4
LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 9804, Beijing 100029, <b>P.R. China</b>	FGOALS1.0_g
Max Planck Institute for Meteorology, <b>Germany</b>	ECHAM5/MPI-OM
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, <b>Japan</b>	MRI-CGCM2.3.2
NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS), <b>USA</b>	AOM 4x3
Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA, <b>USA</b>	GISS ModelE-H and GISS ModelE-R (which differ only in ocean component)
Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA, <b>USA</b>	GISS ModelE-H and GISS ModelE-R (which differ only in ocean component)
National Center for Atmospheric Research (NCAR), ( <b>USA</b> )	Community Climate System Model, version 3.0 et 4.0 (CCSM3 et CCSM4)
National Center for Atmospheric Research (NCAR), NSF (a primary sponsor), DOE (a primary sponsor), NASA, and NOAA ( <b>USA</b> )	Parallel Climate Model (PCM)
CCSR/NIES/FRCGC, <b>Japan</b>	MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)
CCSR/NIES/FRCGC, <b>Japan</b>	MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)
Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, <b>United Kingdom</b>	HadCM3
Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office <b>United Kingdom</b>	Hadley Centre Global Environmental Model, version 1 (HadGEM1)

## 2.5. Scénarios climatiques

Un scénario de changement climatique correspond à une représentation vraisemblable du climat futur, fondée sur un ensemble cohérent et intrinsèquement homogène (Parry et Carter, 1998); et est généralement destiné à servir explicitement d'entrée pour l'étude des répercussions potentielles des changements climatiques anthropogéniques (IPCC, 2001).

Un scénario de changement climatique ne correspond pas à une prévision du climat futur mais sert plutôt à:

- fournir des données utiles à l'évaluation des vulnérabilités, des répercussions et des adaptations.

- être utilisés pour la planification stratégique et l'élaboration de directives.
- être utilisés afin de déterminer les différents types de futurs vraisemblables.
- Permettre d'analyser les implications des décisions prises en matière de directives.

Les scénarios climatiques ont les avantages suivants:

- Ils sont simples à élaborer, interpréter et appliquer.
- Ils fournissent suffisamment de renseignements pour les évaluations des vulnérabilités, des répercussions et des adaptations.
- Ils sont vraisemblables d'un point de vue physique et spatial.
- Ils sont cohérents avec la large gamme de projections sur le réchauffement climatique.
- Ils reflètent l'étendue potentielle des changements climatiques régionaux futurs, c'est-à-dire qu'ils sont représentatifs de l'étendue des incertitudes concernant ces projections (RCSCC, 2015).

Il ne faut surtout pas confondre entre scénario climatique et scénario de changements climatiques.

Un scénario de changements climatiques est un climat futur vraisemblable. Il s'agit d'une représentation correspondant à la différence entre un climat futur vraisemblable et le climat actuel, ou un climat de référence (tel que généralement représenté dans les modèles climatiques, c'est-à-dire représentations mensuelles, saisonnières et annuelles). Ce concept peut être considéré comme une étape intermédiaire menant à l'élaboration d'un scénario climatique. Cependant, un scénario climatique résulte de la combinaison d'un scénario de changements climatiques et de la description du climat actuel, tel que représenté par des observations climatiques (c'est-à-dire, grâce à l'analyse scrupuleuse du régime climatique) (IPCC, 2001).

**SCÉNARIO CLIMATIQUE=CLIMAT ACTUEL+SCÉNARIO DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

### **2.5.1. Les scénarios du GIEC**

La modélisation climatique s'appuie sur des hypothèses d'évolution des émissions des principaux gaz à effet de serre (GES) - gaz carbonique: CO<sub>2</sub>; méthane: CH<sub>4</sub>; protoxyde d'azote: N<sub>2</sub>O; etc. - et d'aérosols (sulfatés ou carbonés) pour les prochaines années. Ces hypothèses sont réalisées à partir de scénarios socio-économiques, décrits dans le SRES (Special Report on Emissions Scenarios) et produits par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC). Ces scénarios prennent en compte plusieurs facteurs tels que l'évolution démographique, le développement social et économique, le progrès technologique, l'utilisation des

ressources et la lutte contre la pollution, afin de caractériser l'évolution des émissions de GES de la planète (MEDDTL, 2007). Cependant, ils ne considèrent pas les éventuelles initiatives futures en matière d'atténuation, telles que la mise en œuvre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou la réalisation des objectifs d'émissions du Protocole de Kyoto (IPCC, 2001). Les scénarios SRES sont regroupés en 4 familles (A1, A2, B1 et B2), chacune représentant une évolution différente au plan démographique, social, économique, technologique et environnemental.

### 2.5.1.1. Scénarios SRES (Special Report on Emission Scenarios)

Lors du 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation publié en 2007, la stratégie suivie était séquentielle. Le point de départ était une synthèse des travaux de modélisation économique qui conduisit à définir un ensemble de scénarios d'évolution possible de nos sociétés et modes de vie, prenant en compte des choix en matière d'énergie et de rapports à la mondialisation. Ces scénarios sont appelés SRES (du nom du rapport spécial publié en 2000 pour les présenter, SRES, 2000). Ces derniers sont utilisés dans les études sur le changement climatique. Ils ont été construits pour explorer les évolutions futures de l'environnement mondial avec une référence particulière à la production de gaz à effet de serre et les émissions de précurseurs d'aérosol. Le rapport spécial (SRES, 2000) a adopté la terminologie suivante:

Storyline: une description narrative d'un scénario (ou une famille de scénarios), mettant en évidence les principales caractéristiques et dynamiques des scénarios, et les relations entre les principales forces motrices.

Scénario: projections d'un potentiel futur, basées sur une logique claire et un storyline quantifié.

Famille de scénario: un ou plusieurs scénarios qui ont le même storyline démographique, socio-politique, économique et technologique (Guivarch, 2015).

L'équipe SRES a défini quatre storyline narratifs, marqués A1, A2, B1 et B2, décrivant les relations entre les forces motrices de gaz à effet de serre et les émissions d'aérosols et de leur évolution au cours du 21<sup>ème</sup> siècle pour les grandes régions du monde et d'une manière globale. Chaque storyline représente différentes évolutions démographiques, sociales, économiques, technologiques et environnementales qui divergent de façon de plus en plus irréversibles.

Les quatre scénarios combinent deux ensembles de tendances divergentes: un ensemble variant entre de fortes valeurs économiques et de fortes valeurs environnementales, l'autre jeu entre l'augmentation de la mondialisation et l'augmentation de la régionalisation. Les quatre familles de

scénarios proposées par le GIEC (A1, A2, B1 et B2) (Tableau 2.2) ont comme résultats de sortie des prévisions sur les émissions de gaz à effet de serre. Ces évolutions d'émissions de GES étaient alors utilisées par les climatologues comme données d'entrée des modèles de projections climatiques. Enfin, les projections climatiques alimentent les modèles d'impact (Alley et al., 2007).

**Tableau 2.2 :** Les quatre familles de scénarios du quatrième rapport et les prévisions des hausses de températures globales moyennes en 2100 (IPCC, 2001)

AR4	Objectifs plus économiques	Objectifs plus environnementaux
Globalisation (Monde homogène)	A1 Croissance économique rapide (trois groupes: A1T/A1B/A1FI) 1.4 - 6.4 °C	B1 Durabilité environnementale globale 1.1 - 2.9 °C
Régionalisation (Monde hétérogène)	A2 Développement économique avec une orientation régionale 2.0 - 5.4 °C	B2 Durabilité environnementale locale 1.4 - 3.8 °C

**A1:** La famille de scénarios A1 décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. On distingue 3 groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique : A1FI (forte intensité de combustibles fossiles), A1T (sources d'énergie autres que fossiles) et A1B (équilibre entre les sources).

**A2 (dit pessimiste):** La famille de scénarios A2 décrit un monde très hétérogène. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres familles.

**B1:** La famille de scénarios B1 décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans A1. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

**B2 (dit optimiste):** La famille de scénarios B2 décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2. Les

scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

A ces scénarios socio-économiques correspond donc l'évolution des émissions de GES pour le siècle à venir (Figure 2.3).

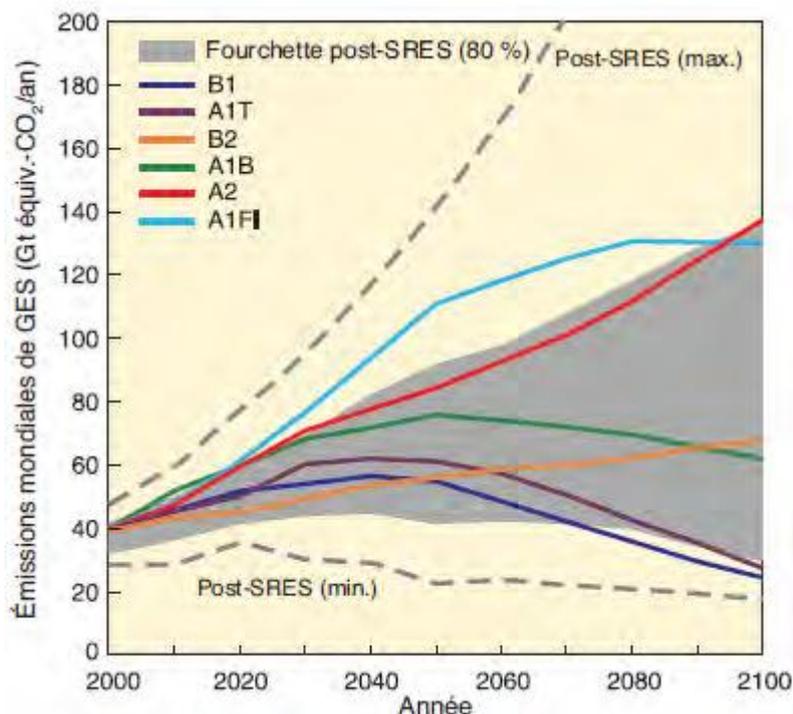
Le Tableau 2.3 résume, pour chaque scénario, les valeurs attendues des concentrations du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), du changement global de la température (par rapport à l'année 1990) et des augmentations des niveaux des mers par rapport au développement démographique et économique.

**Tableau 2.3 :** Estimation des impacts liés au développement démographique et économique (Carter, 2007)

Scénarios des émissions	Population globale (billions)	PIB global (10 <sup>12</sup> US\$/an)	EDT/PD <sup>1</sup>	Concentration CO <sub>2</sub> (ppm)	ΔT Globale (°C)	Aug. Globale des niveaux des mers (cm)
<b>1990</b>	5.3	21	16.1	354	0	0
<b>2000</b>	6.1-6.23	25-283	12.3-14.23	367.4	0.2	2
<b>2050</b>						
SRES A1FI	8.7	164	2.8	573	1.9	17
SRESA1B	8.7	181	2.8	536	1.6	17
SRES A1T	8.7	187	2.8	502	1.7	18
SRESA2	11.3	82	6.6	536	1.4	16
SRESB1	8.7	136	3.6	491	1.2	15
SRESB2	9.3	110	4.0	478	1.4	16
IS92a	10.0	92	9.6	512	1.0	–
SRES-min	8.4	59	2.4	463	0.8	2
SRES-max	11.3	187	8.2	623	2.6	29
<b>2100</b>						
SRES A1FI	7.1	525	1.5	976	4.5	49
SRESA1B	7.1	529	1.6	711	2.9	39
SRES A1T	7.1	550	1.6	569	2.5	37
SRESA2	15.1	243	4.2	857	3.8	42
SRESB1	7.0	328	1.8	538	2.0	31
SRESB2	10.4	235	3.0	615	2.7	36
IS92a	11.3	243	4.8	721	2.4	–
SRES-min	7.0	197	1.4	478	1.4	14
SRES-max	15.1	550	6.3	1099	5.8	80

La Figure 2.3 représente les prévisions des Émissions mondiales de GES (en Gt équiv.-CO<sub>2</sub>) en l'absence de politiques climatiques: six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes colorées).

<sup>1</sup> Rapport entre les pays et les économies développées en transition (EDT) et les pays en développement (PD)



**Figure 2.3 :** Émissions mondiales de GES (en Gt équiv.-CO<sub>2</sub>) (IPCC, 2007)

La Figure 2.3 montre les émissions de GES selon six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes colorées). La partie ombrée (post-SRES) est l'intervalle au 80<sup>ème</sup> percentile des scénarios publiés depuis le SRES. Les lignes en pointillés délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. Les GES sont le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, le N<sub>2</sub>O et les gaz fluorés (IPCC, 2007).

### 2.5.1.2. Nécessité de définir des nouveaux scénarios (scénarios RCP)

Jusqu'au 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC, les projections climatiques étaient fondées sur les scénarios SRES, proposant plusieurs évolutions socio-économiques (A1, A2, B1, B2, A1B, ...). Ces scénarios socio-économiques consistent à faire diverses hypothèses sur le développement économique futur et ses conséquences sur l'environnement. Ils sont fournis par des modèles d'évaluation intégrée qui prennent en compte l'évolution de la population, l'économie, le développement industriel et agricole, ainsi que la chimie atmosphérique et le changement climatique. Ces modèles d'évaluation intégrée fournissent des scénarios d'évolution des gaz à effet de serre et des aérosols, qui sont introduits comme forçage dans les simulations climatiques. Cependant, ces scénarios ne prennent pas en compte l'effet des nouvelles politiques climatiques sur la réduction d'émission de gaz, et le contexte socio-économique mondial a évolué depuis la mise en place des scénarios SRES à la fin des années 1990 (Ouzeau et al., 2014).

Dans la perspective de l'élaboration du cinquième rapport d'évaluation du GIEC, les experts de ce dernier ont défini quatre scénarios de référence (sur la base de plusieurs centaines de scénarios

publiés), qualifiés de profils représentatifs d'évolution des concentrations (RCP, pour Representative Concentration Pathways) de gaz à effet de serre (GES), d'ozone et de précurseurs des aérosols pour le XXI<sup>e</sup> siècle et au-delà. Ces scénarios, peuvent correspondre à des efforts plus ou moins grands de réduction des émissions de GES au niveau mondial. Pour chacun de ces quatre «profils représentatifs», les climatologues déduisent les conditions climatiques et les impacts du changement climatique associés. En parallèle, les sociologues et les économistes travaillent sur des scénarios présentant diverses caractéristiques de développements socio-économiques et diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation. Cinq familles de scénarios, nommés SSP (pour Shared Socioeconomic Pathways), ont ainsi été définies. Une telle approche permet un travail en parallèle et en cohérence des climatologues et des économistes (Mondon et Imbard, 2013).

La publication du 5<sup>e</sup> Rapport d'évaluation (AR5, assessment report #5) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), composé de trois volumes et d'un rapport de synthèse, s'étend entre septembre 2013 et octobre 2014. Il s'agit d'un bilan mondial des connaissances scientifiques sur le changement climatique concernant:

- changements climatiques 2013: les éléments scientifiques, Volume 1 (publié le 27/09/2013);
- les impacts, les vulnérabilités et l'adaptation, Volume 2 (mars 2014);
- l'atténuation du changement climatique, Volume 3 (avril 2014);
- le rapport de synthèse de l'ensemble des Volumes (octobre 2014) (Pachauri and Meyer, 2014).

Les scénarios SRES ont été définis par le GIEC à la fin des années 1990 et utilisés jusqu'au 4<sup>e</sup> rapport (2007). Depuis, le contexte socio-économique mondial a sensiblement changé. Les déterminants socio-économiques tels que l'économie, les technologies, les politiques publiques, et la connaissance du système climatique ont évolué. Par exemple, il n'avait pas été envisagé à l'époque la possibilité d'un développement aussi rapide des pays émergents. Dans le même temps, les projections démographiques globales ont été revues à la baisse, de 14 milliards d'humains à 10 milliards à l'horizon 2100. Ces quinze dernières années ont aussi vu, à l'échelle mondiale, l'adoption de politiques climatiques dont il est désormais nécessaire d'intégrer les effets sur la réduction des émissions de gaz et les rétroactions en terme d'impacts et d'adaptation pour les systèmes considérés. Ces mécanismes n'étaient pas inclus dans les scénarios précédents. Il est aujourd'hui aussi envisagé d'avoir des évolutions des émissions globales de gaz à effet de serre qui diminueraient après une phase de croissance au XXI<sup>e</sup> siècle ce qui oblige certains scénarios à être prolongés au-delà de 2100. Le GIEC a décidé de définir des nouveaux scénarios pour mieux prendre en compte ce

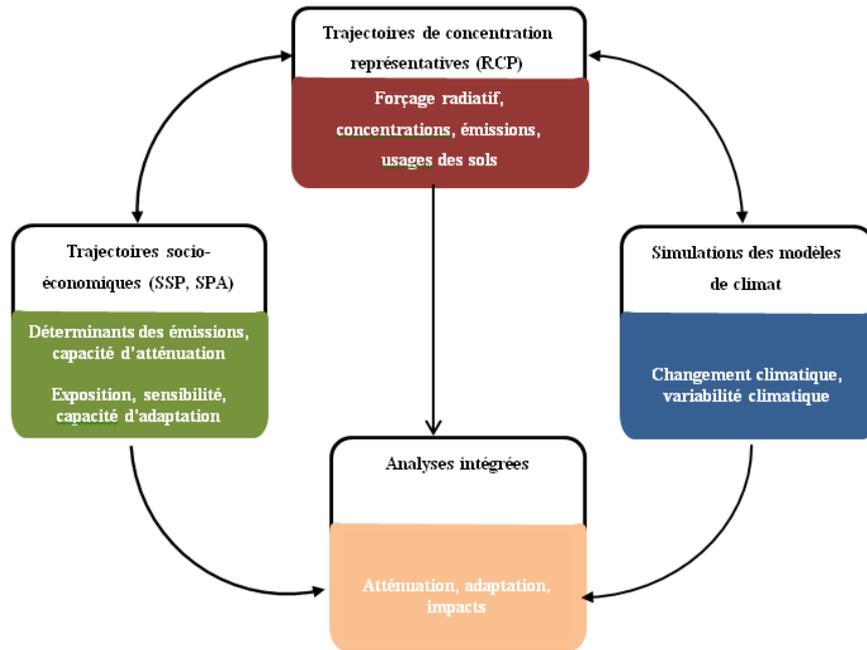
nouveau contexte et permettre aux économistes et aux climatologues de ne plus travailler de manière séquentielle mais parallèle. Enfin, contrairement aux scénarios SRES, ces nouveaux scénarios ne sont pas définis par le GIEC lui-même, mais ont été établis par la communauté scientifique pour répondre aux besoins du GIEC (Mondon et Imbard, 2013).

Depuis 2007, le GIEC a changé d'approche, pour mieux prendre en compte ce nouveau contexte. Auparavant, l'analyse était menée en suivant une logique séquentielle alors qu'actuellement le processus est parallèle. Les scientifiques ont défini au préalable des profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effet de serre, d'ozone et de précurseurs des aérosols représentatives d'un accroissement du bilan énergétique: les RCP (Representative concentration pathways). Les RCP ont été produits par le Consortium de modélisation d'évaluation intégrée (Integrated Assessment Modeling Consortium, IAMC<sup>1</sup>). Pour développer cette nouvelle génération de scénarios, la communauté scientifique a mis en place une méthode différente, un processus en parallèle, pour gagner en rapidité et permettre une meilleure intégration interdisciplinaire. Ce processus doit se dérouler en trois phases (Figure 2.4):

1. Une phase préparatoire où ont été sélectionnés quatre scénarios d'évolution des concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère (RCP). Des experts des trois groupes du GIEC ont participé à cette phase.
2. Une phase «parallèle» où les équipes travaillent simultanément à partir des scénarios RCP: les climatologues (groupe I du GIEC) produisent des projections climatiques utilisant les RCP comme entrée, tandis que les socio-économistes (groupe III du GIEC) élaborent des scénarios socio-économiques débouchant sur des scénarios d'émissions correspondant aux RCP.
3. Une phase d'intégration, dans laquelle les résultats des modèles physiques de climat et les scénarios socio-économiques sont rassemblés pour permettre une évaluation intégrée de l'atténuation, de l'adaptation et des impacts du changement climatique. Cette phase mobilisera à nouveau des experts des trois groupes du GIEC (Moss et al., 2010).

---

<sup>1</sup> L'IAMC a été créé en novembre 2006.



**Figure 2.4 :** Élaboration en parallèle des scénarios climatique (O’Neill et Schweizer, 2011)

Les scénarios RCP sont quatre relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Un scénario RCP permet de modéliser le climat futur. Dans l'AR5, sur la base de quatre hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100 et pour certain jusqu'à 2300), chaque scénario RCP donne une variante jugée probable du climat qui résultera du niveau d'émission choisi comme hypothèse de travail. Les quatre scénarios sont nommés d'après la gamme de forçage radiatif ainsi obtenue pour l'année 2100 (le scénario RCP2.6 correspond à un forçage de +2,6 W/m<sup>2</sup>, le scénario RCP4.5 à +4,5 W/m<sup>2</sup>, et de même pour les scénarios RCP6 et RCP8.5) (Weyant et al., 2009) (Tableau 2.4). Les experts du GIEC ont retenu un scénario de stabilisation (ou de référence) à 750ppm de CO<sub>2</sub> (Soussana, 2013). Il faut souligner qu'une stabilisation à 750 ppm n'évitera pas les effets les plus dangereux, tandis qu'une stabilisation à 550 ppm en évite quelques-uns mais pas tous (Juvanon du Vachat, 2005).

**Tableau 2.4 :** Les quatre scénarios RCP retenue par le GIEC (Moss et al, 2008)

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP8.5	>8,5Wm <sup>-2</sup> en 2100	>1370 eq-CO2 en 2100	Croissante
RCP6.0	~6Wm <sup>-2</sup> au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	~4.5Wm <sup>-2</sup> au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.5	Pic ~3Wm <sup>-2</sup> avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO2 avant 2100 puis déclin.	Pic puis déclin

Les scientifiques du monde se sont réunis en groupe pour créer des Modèles d'évaluation intégrée (Integrated Assessment Models (IAMs)). Ces IAMs intègrent des représentations quantitatives des processus physiques, biologiques, économiques et sociales, et rendent possible l'analyse quantitative des interactions entre ces composants dans un cadre cohérent pour évaluer l'état et les conséquences du changement de l'environnement et les réponses politiques à ces changements.

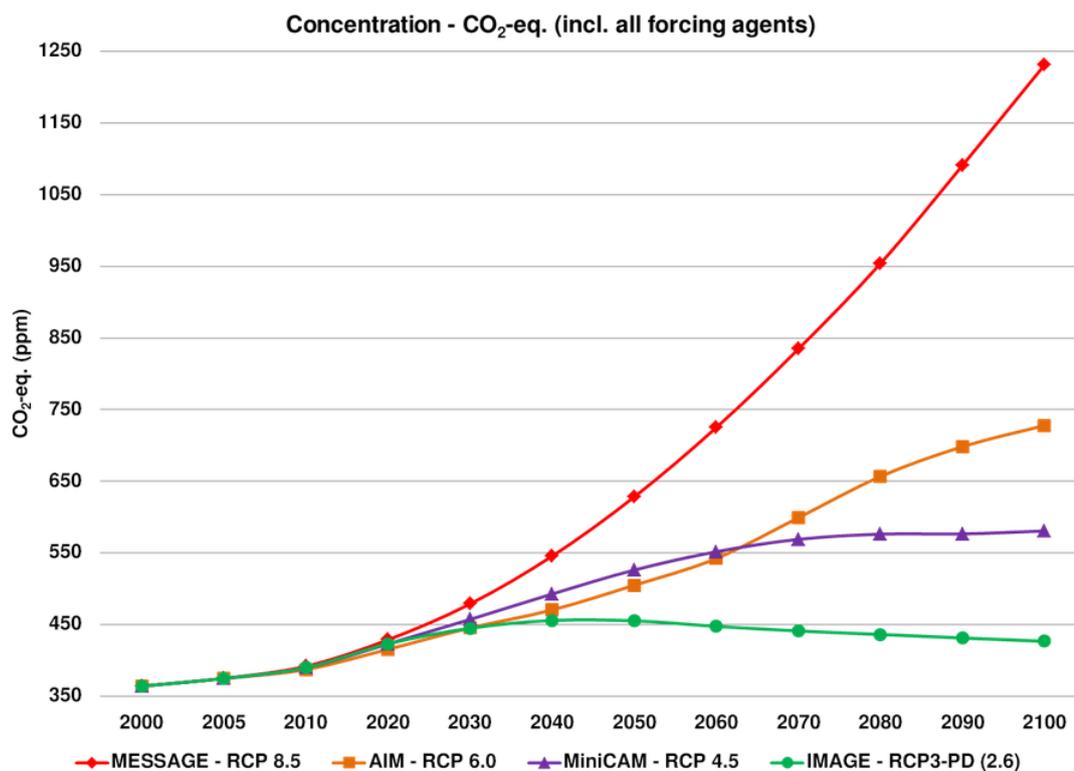
L'IAMC est formé pour aider à coordonner ce travail à travers les équipes IAM et entre eux et les autres communautés impliquées dans la recherche sur le changement global. Le Comité directeur du GIEC a demandé que l'IAMC forme un comité d'évaluation pour assurer que le scénario est scientifiquement utilisable comme un RCP. Le comité a accepté certains candidats et compare leurs résultats (Moss et al, 2008). Le Tableau 2.5 présente une liste non exhaustive des modèles acceptés.

**Tableau 2.5 :** Les modèles respectant les RCP et retenus par le GIEC (Moss et al, 2008)

<b>Abréviation du modèle</b>	<b>Description</b>
AIM	Asia-Pacific Integrated Model
NIES	National Institute for Environmental Studies
GRAPE	Global Relationship to Protect the Environment
IAE	Institute of Applied Energy
IGSM	Integrated Global System Model
MIT	Massachusetts Institute of Technology
IMAGE	Integrated Model to Assess the Global Environment
MNP	Netherlands Environmental Assessment Agency
IPAC	Integrated Policy Assessment Model for China
ERI	Energy Resource Institute
MESSAGE	Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact
MiniCAM	Mini-Climate Assessment Model
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory.

Sur la base des quatre RCP retenues, les IAM ont simulé la concentration des gaz à effet de serre en utilisant l'unité standard eq CO<sub>2</sub> en ppm<sup>1</sup> (partie par million). La Figure 2.5 présente un exemple de simulation pour quatre IAM (chacun pour un RCP donné).

<sup>1</sup> ppm signifie: partie par million, qui correspond à un rapport de 10<sup>-6</sup> (ex : 1 mg par kg).



**Figure 2.5 :** Représentation de tous les agents équivalent-CO<sub>2</sub> du forçage atmosphérique, selon quatre scénarios RCP (en ppm) (IPCC, 2013).

La Figure 2.5 montre qu'à partir de l'année 2020 la différence commence à se sentir entre les simulations des quatre RCP. C'est l'activité humaine qui tranchera sur le chemin qu'entreprendra le climat futur. Le RCP8.5 est le plus pessimiste, il prévoit une activité économique intense.

Lors d'une réunion, en septembre 2008, auprès de 20 groupes de modélisation du climat du monde entier, le Groupe de travail dans le Programme mondial de recherches sur le climat (en anglais *World Climate Research Programme, WCRP*), en travaillant étroitement avec le GIEC, ont convenu de promouvoir une nouvelle série d'expériences de modèles climatiques coordonnés. A cette date, le projet d'intercomparaison de modèles climatiques CMIP-5 (Coupled Model Intercomparison Project) a vu le jour.

Le projet CMIP-5 fournit un cadre de travail précis aux équipes développant les modèles de climat et réalisant les simulations climatiques. Il vise à:

- évaluer le réalisme des modèles dans la simulation du récent passé,
- fournir des projections de changement climatique futur sur deux échelles de temps, à court terme (sur environ 2035) et long terme (sur 2100 et au-delà),

- comprendre certains des facteurs responsables des différences dans les projections de modèles, y compris la quantification de certaines évaluations clés tels que ceux impliquant le cycle du carbone et les nuages (Dacher, 2012).

Le CMIP5 coordonne entre les différents centres de modélisation pour qu'ils utilisent les mêmes termes dans les archives qui vont être mis à la disposition des utilisateurs. La syntaxe de référence des données (Data reference Syntaxe, DRS) devrait être suffisamment souple pour couvrir tous les services que les archives pourraient souhaiter offrir.

Les données doivent être enregistrées (ou archivées) sous forme de fichiers. Ces derniers doivent avoir la forme d'un ensemble de données atomique (atomic dataset). Cette définition exige d'archiver les données d'une manière structurée. Chaque champ représente une variable représentée par une valeur dans le domaine spatio-temporel (heure et lieu) (Karl, 2012). Le format souvent utilisé par les équipes CMIP5 est NetCDF (Network Common Data Form) et l'extension utilisée est nc.

Parce que les utilisateurs vont télécharger des données dans un système de fichier qui sera habituellement différent de la structure de répertoire d'archivage, le nom du fichier devrait inclure un certain contenu de la syntaxe de référence des données (DRS). Les noms des fichiers seront construits comme suit:

Nom de fichier= <Nom variable>\_<table MIP>\_<model>\_<expérience>\_  
<membre de l'ensemble>[<sous ensemble temporaire>][\_<info géographique>].nc

Exemple : cl\_Amon\_bcc-csm1-1-m\_rcp26\_r1i1p1\_200601-203512.nc

Ou tas\_Amon\_HADCM3\_historical\_r1i1p1\_185001-200512.nc

Où

cl (tas) représente le nuage (température de surface).

Amon le nom de la table.

Bcc-csm1-1-m (HADCM3) est le nom du modèle.

Rcp26 (historical) le scenario utilisé.

r1i1p1: ou d'une manière générale (rN, iM, pL), où :

r est le numéro de réalisation (realization number) d'une simulation par un modèle unique (les variables indépendantes du temps ont "r0").

i: le numéro de la condition initiale (les variables indépendantes du temps ont "i0").

p: la version du modèle.

Par exemple, r3i1p78 est la troisième réalisation de la première condition initiale de la soixante-dix-huitième version du modèle.

200601-203512 (185001-200512): c'est un membre [< sous ensemble temporaire >] optionnel. Il indique d'une manière générale le temps ou la période. Pour notre exemple de janvier 2006 à décembre 2035 (ou historique "historical" de janvier 1850 à décembre 2005).

## 2.6. Incertitudes

Tous les Modèles de Circulation Générale "MCG" (en anglais GCM pour General Circulation Model) existants ont pour fonction de simuler aussi exactement que possible l'atmosphère ou l'océan. Cependant, tous ont des défauts.

En dépit des progrès dans la puissance de calcul qui ont permis d'augmenter nettement la résolution des MCG depuis quelques années, les résultats des modèles climatiques manquent toujours de précision aux échelles régionales pour être utilisés directement dans le cadre des études sur les impacts (Mearns et al., 1997).

Une des grandes sources d'incertitude pour l'atmosphère, sur laquelle les MCGA (MCG Atmosphériques) divergent, est la modélisation des nuages et de leur rôle dans le bilan hydrique et radiatif de la planète. Le traitement de la convection<sup>1</sup> "humide" (avec changement de phase de l'eau et éventuellement précipitation) est également un problème complexe suscitant beaucoup de recherche sur les MCG.

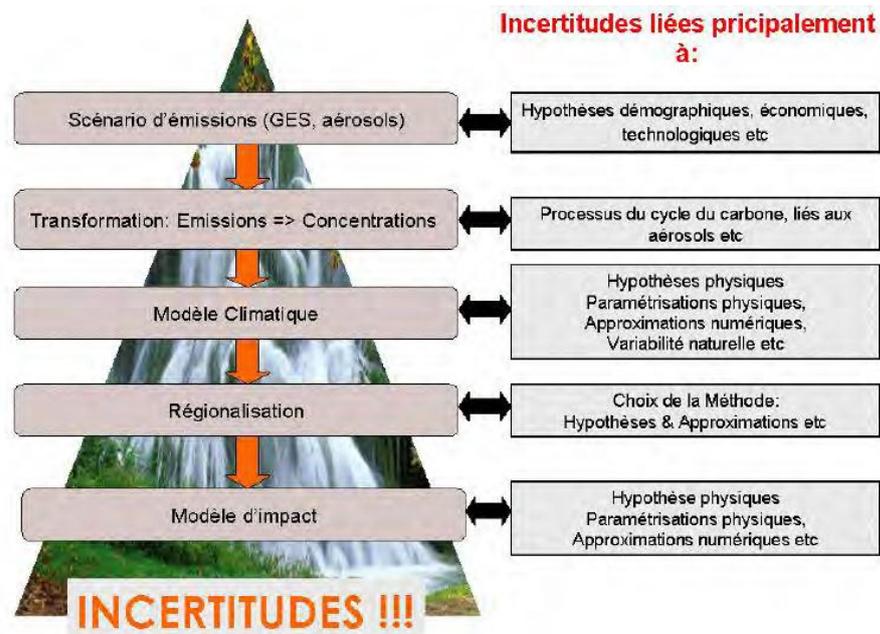
Et puis certaines régions sont moins étudiées que d'autres. En général, les MCG sont extensivement utilisés pour étudier les moyennes latitudes (surtout du Nord pour les MCG de notre hémisphère) et les tropiques. Les hautes latitudes et les régions polaires ont, jusqu'à assez récemment, motivé moins d'effort, probablement parce que l'impact direct et à court terme sur l'activité humaine y est plus réduit, et aussi parce que les observations nécessaires y sont comparativement peu nombreuses. Il en résulte que des MCG ayant de bonnes performances en régions tropical et tempérée se révèlent franchement mauvais à haute latitudes. Cette situation est en train de changer à mesure que l'on réalise l'importance des régions polaires dans le système climatique global. C'est là que se font des couplages importants entre les composantes du système climatique, à commencer par le couplage de l'océan et de l'atmosphère et l'initiation de la circulation profonde océanique. C'est là que l'on attend une réponse particulièrement importante à un changement climatique globale. Enfin, c'est là que se trouve les calottes de glace majeures,

---

<sup>1</sup> Mouvement vertical de l'air, ascendant ou descendant, par opposition à l'advection, qui désigne les mouvements horizontaux. Transfert de chaleur accompagné d'un transport de matière à l'état de fluide.

l'Antarctique et le Groenland, dont toute perturbation du bilan de masse résulte en changement du niveau global des mers (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, 2003).

La plus grosse difficulté dans l'étude des impacts du changement climatique est la prise en compte des nombreuses incertitudes qui en découlent. En effet à chaque étape de l'étude, des scénarios socio-économiques aux modèles d'impact, les incertitudes s'accumulent, on peut alors parler de cascade d'incertitudes (Figure 2.6; Boé, 2007). De plus, le climat varie à toutes les échelles de temps, y compris à l'échelle d'une ou plusieurs dizaines d'années, ce qui constitue l'une des principales sources d'incertitude pour l'étude de l'évolution du climat des prochaines années et correspond à la limite de notre propre compréhension du climat (Jouzel, 2011). Il est donc nécessaire d'estimer au mieux cette incertitude.



**Figure 2.6 :** La cascade des incertitudes caractéristique d'une étude des impacts du changement climatique (Boé, 2007)

### 2.6.1. Causes d'incertitudes

D'après Boé (2007), les incertitudes liées aux modèles climatiques sont au nombre de 5.

#### 2.6.1.1. Scénarios d'émission

La 1<sup>ère</sup> cause d'incertitude provient des hypothèses de scénarios socio-économiques à l'échelle mondiale qu'il faudrait réajuster. Ces hypothèses reflètent des évolutions de développement économique impossibles à vérifier puisqu'elles traitent du futur. C'est pourquoi, un certain nombre de scénarios ont été développés afin de tenir compte de cette grande source d'incertitude.

### **2.6.1.2. Transformation : émissions concentrations**

Suite aux hypothèses précédentes sont calculées des émissions de GES et leur concentration dans l'atmosphère. Les modèles effectuant ces calculs comportent également des incertitudes liées à leur conception même (équations utilisées, traitement de ces équations, absence de représentation de certains processus) (Jouzel, 2011). Ces modèles projettent pour 2100 une concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique comprise entre 540 et 970 ppm selon les scénarios SRES, la fourchette d'incertitude inhérente étant importante et comprise entre 490 et 1260 ppm (IPCC, 2001).

### **2.6.1.3. Modèle climatique**

Il existe ensuite des incertitudes liées aux modèles climatiques. Bien que des progrès aient été réalisés, avec des modèles de plus en plus complexes, les paramètres d'entrée des modèles ainsi que la conception de ces modèles ajoutent une certaine incertitude à la lecture des résultats qui divergent. C'est pourquoi le GIEC a utilisé 23 modèles différents dans son dernier rapport afin de les croiser pour une meilleure analyse de sensibilité (IPCC, 2007; Jouzel, 2011).

Aux horizons proches (2030, 2050), la variabilité naturelle du climat est difficilement captée, se traduisant par le fait qu'un même modèle partant de deux états climatiques très proches, peut calculer deux évolutions climatiques différentes (Braconnot et al., 2007). De plus, les paramètres d'entrée ne sont pas tous bien calculés par les modèles, ce qui entraîne un biais de plus. Les extrêmes climatiques ainsi que l'évolution des précipitations, de par leur forte variabilité, sont difficiles à prévoir et à quantifier (Jouzel, 2011).

### **2.6.1.4. Régionalisation ou réduction d'échelle (RE)**

On retrouve une incertitude à chaque étape de la RE à une maille régionale, tant sur le choix de la méthode (dynamique/statique) que sur les hypothèses posées. La méthode de correction des biais présente elle aussi quelques limites, liées à la courte durée (environ 30 ans) de disponibilité des données d'observations (Boé, 2007). De plus, les modèles ne peuvent pas prendre en compte les futures valeurs du climat qui peuvent dépasser les valeurs observées.

### **2.6.1.5. Modèles d'impacts**

Enfin, les modèles d'impacts présentent des biais par exemple au niveau des effets de seuils (thermiques, hydriques) selon les espèces, au niveau des interactions avec les changements atmosphériques et océaniques et des interactions selon les pratiques de gestion (Roussel et al., 2012).

Les résolutions des modèles ne permettent pas de fournir des données assez précises (spatialement) pour toutes les études d'impact du changement climatique. Exemple: impact du changement climatique sur les glaciers, sur un fleuve particulier, sur les maladies tropicales, sur l'océan côtier, ... Ces domaines ont besoin de simulations à plus haute résolution spatiale. Le dernier inconvénient des modèles globaux est leur faible capacité à simuler les événements extrêmes (vents violents, précipitations intenses) qui sont souvent liés à des phénomènes ou à des forçages de petites échelles. Pour ces raisons, la communauté scientifique du climat a développé la notion de régionalisation climatique (CNRS, 2006).

Pour pouvoir avoir des données plus fiable et plus précise dans les études d'impacts et pour prendre en considération les changements futurs possibles, la réduction d'échelle (RE, en anglais DownScaling) est nécessaire et indispensable.

### **2.7. Techniques de réduction d'échelle (RE)**

Pour des raisons de limitation de la puissance de calcul des ordinateurs disponibles, les modèles possèdent généralement une résolution spatiale de l'ordre de quelques centaines de kilomètres. Cette résolution ne permet pas de résoudre certains processus et phénomènes physiques régionaux qui influencent le climat d'une région particulière du globe (îles, relief complexe, vents régionaux, structure spatiale des précipitations, circulation océanique de petite échelle).

Une meilleure représentation des processus qui se déroulent dans l'atmosphère et à la surface de la Terre ainsi que l'élargissement des capacités de calcul ont permis des améliorations certaines, notamment au cours de la dernière décennie, mais la plupart des modèles actuels offrent encore une résolution horizontale de quelques centaines de kilomètres (Meehl et al., 2007). Ils ne peuvent donc rendre compte des effets des forçages locaux (par exemple topographie complexe et caractéristiques de la surface) qui modulent le signal climatique aux échelles plus réduites.

En raison de leur faible pouvoir de résolution, les modèles mondiaux ne peuvent pas non plus décrire avec précision les phénomènes extrêmes, lesquels revêtent une importance primordiale pour les utilisateurs de l'information climatologique qui souhaitent évaluer les répercussions régionales et locales de la variabilité et de l'évolution du climat. Autrement dit, il existe un écart d'échelle spatiale entre les données climatologiques fournies par les MCGAO (Modèle du Climat Global Atmosphère Océan) et les renseignements nécessaires pour mesurer les impacts (Giorgi et al., 2009).

Pour avoir des échelles plus précises, les méthodes RE (à la fois dynamiques, c.à.d. les modèles climatiques régionaux (MCR) et statistiques) ont été conçues ces dernières années pour

obtenir des données sur les changements climatiques à plus haute résolution. Les principales méthodes de RE qui autorisent une résolution ponctuelle/spatio-temporelle élevée sont:

a. Modèles climatiques régionaux (RE dynamique):

- Avantages: données à haute résolution, reposent sur des principes physiques, nombreuses variables, meilleure représentation des phénomènes à méso-échelle et de certains extrêmes météorologiques par rapport aux MCG;
- Limites: très coûteux en terme de temps de calcul, absence de pilotage bidirectionnel (manque de rétroaction avec les forçages de grande-échelle des MCG), tributaires des biais des MCG utilisés comme forçage aux frontières du modèle, peu de scénarios disponibles.

b. Réduction d'échelle statistique (RES):

- Avantages: données à haute résolution (grille ou régions non uniformes), certaines techniques tiennent compte d'une gamme diverse de variables, les variables sont consistantes entre elles, peu coûteux en terme de temps de calcul, application rapide à partir de plusieurs MCG et de scénarios multiples;
- Limites: hypothèse de stationnarité des relations empiriques dans le futur (c.à.d. les relations statistiques élaborées pour le climat actuel restent valables dans différentes conditions de forçage des climats futurs possibles), exigent d'avoir accès à des données d'observations quotidiennes en surface et dans l'atmosphère, un nombre limité de variables est généré à l'aide de certaines techniques, tributaires des biais des MCG utilisés comme données d'entrée du modèle.

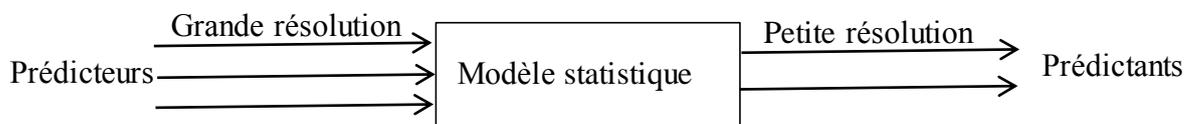
Il est donc nécessaire de transférer les informations, issues des MCG dans des échelles plus petites de sorte que les impacts du changement climatique peuvent être évalués à diverses activités humaines telles que la disponibilité des ressources en eau et de son comportement futur. Ce transfert d'échelle (d'une résolution grossière à une résolution fine) est appelé «downscaling» dans les études de recherche sur le climat, qui a été reconnu par de nombreux chercheurs (Smith and Tirpak, 1989; Cohen, 1990).

En plus des modèles climatiques globaux (MCG), les modèles climatiques régionaux à plus petite échelle (MCR) sont également mis au point à des fins de RE. Cette descente atteint seulement des dizaines de kilomètres et donne la possibilité que l'une (ou plusieurs) des surfaces de la grille contienne une station météorologique. Cela suppose que la valeur du modèle correspond à la

mesure au sol. Le biais observé laisse encore des sentiments insatisfaisants (incertitude) chez les chercheurs (Şen, 2009a).

### 2.7.1. Réduction d'échelle statistique (RES)

Les méthodes de conversion les plus rapides de la résolution grossière vers la fine sont la méthode de changement de facteur (Local Intensity scaling factor, LOCI) et la méthode de RES (Statistical Downscaling, SD). La première est utilisée dans l'application des projections des changements climatiques à petite résolution vers le climat observé de référence à haute résolution. Tandis que la seconde propose une modélisation statistique pour la procédure de mise à l'échelle. La procédure de RES modélise les gradients prédicteurs (variables issues de MCG) et prédicteurs (variables locales climatiques à prédire). Le mécanisme statistique combine ces deux gradients de la meilleure manière possible grâce à un modèle statistique (Figure 2.7).



**Figure 2.7** : La structure du modèle de réduction d'échelle statistique

D'une manière générale, la forme la plus commune d'une procédure de RE d'un prédicteur  $p$ , fonction de prédicteur(s),  $P$ , peut être exprimée sous la forme:

$$p=f(P)+e \quad (2.1)$$

Où  $e$  est l'incertitude (erreur). La fonction  $f(P)$  peut être écrite explicitement selon le but des études d'impact à travers différents modèles tels que les expressions de régression (simple, multiple), des processus stochastiques (modèles autorégressifs, processus de Markov), l'analyse en composante principale, réseaux de neurones artificiels, modèles probabilistes, géostatistique, etc (Şen et al., 2012). Les prédicteurs sont les variables climatiques à grande échelle, les sorties des modèles climatiques généraux (MCG) et les prédicteurs sont, les variables locales ou régionales ponctuelles qui sont mesurées soit sur terrain ou par des capteurs satellitaires. Par conséquent, la production à grande échelle d'une simulation d'un MCG est introduite dans le modèle statistique pour estimer les caractéristiques climatiques correspondantes régionales, locales ou ponctuelles. Les principaux avantages des modèles de RES sont:

- ils sont rapide et peu coûteux,
- ils peuvent être appliqués facilement à des sorties de MCG,
- ils peuvent être expliqués assez facilement,
- ils peuvent fournir des estimations spécifiques aux sites étudiés,

En dehors de l'équation (2.1) il est possible de rechercher des relations entre les prédicteurs et la fonction de distribution de probabilité du prédicand (Pfizenmayer et von Storch, 2001) ou de la fréquence de la valeur extrême (inondations, sécheresse) du prédicand (Katz et al, 2002).

La modélisation de RES est très utile pour décrire les prévisions des précipitations sur un site ce qui ne peut pas être obtenus directement à partir des sorties de modèles climatiques. D'autre part, la précipitation est l'une des variables les plus demandées dans les études d'impact sur le changement climatique. Par conséquent, dans de nombreux modèles de RE, la précipitation est le prédicand alors que de nombreux facteurs prédictifs (température, la pression au niveau de la mer, direction et vitesse du vent, l'humidité) peuvent être pris en considération en fonction de leur importance dans le domaine étudié.

Aucune des méthodes utilisées dans la modélisation du climat n'est intacte de certaines hypothèses restrictives, qui doivent être reconnus pour l'interprétation satisfaisante et fiable des résultats numériques. Voici une liste non exhaustive des hypothèses qui devraient être prises en considération dans toute modélisation.

1. Il est nécessaire de choisir des prédicteurs en fonction de leurs pertinences par rapport aux prédicands et si possible de manière hiérarchique. Avant cette sélection il faut être confiants quant à leurs sorties précises et fiables des modèles climatiques (globales ou régionales),
2. La relation fonctionnelle entre les prédicands et le(s) prédicteur(s) est valable dans la plage de temps de validité de ces variables climatiques. Si l'invariance du temps est supposée alors le prédicand reste valable aussi pour les périodes en dehors de la plage de base du temps. Ceci est l'un des points de resserrement dans une telle modélisation, car il n'y a pas de données pour la vérification ou la validation croisée de la validité du modèle à l'avenir. Surtout, pour les futures implications climatiques, ce point doit être soigneusement évalué et, si possible, doit être complété par d'autres preuves. Charles et al (1999) ont déclaré un moyen de contourner ce problème en validant le modèle avec les données d'observation découlant de périodes bien séparées de la période d'aménagement, à savoir représentant un régime climatique "différent". Il est également possible de mettre à jour la relation statistique disponible en modèle de simulation du climat pour les climats futurs (Gonzalez-Rouco et al., 2000).
3. Il est possible d'ajuster le modèle futur du prédicand par la vérification des performances futurs des prédicteurs obtenus à partir du modèle. Par conséquent, on peut vérifier le prédicteur par rapport à un autre pour l'ajustement du modèle pour prendre en compte les tendances futures possibles et les effets de saisonnalité.

### **2.7.1.1. Les méthodes de réduction d'échelle statistique (RES)**

En général, il existe trois méthodes de modélisation de RE distinctives qui sont couramment utilisés dans la pratique. Ce sont les méthodes de classification synoptique (météorologique), les générateurs de conditions météorologiques et les modèles de régression.

#### **2.7.1.1.1. Les méthodes de régression linéaire**

Les modèles de régression sont simples de calculs et ils peuvent donner des relations linéaires ou non linéaires entre prédicteur(s) et prédicteur(s) de la variable du changement climatique atmosphérique à grande échelle. Les méthodes de RES basées sur la technique de régression linéaire sont les suivantes: la régression linéaire multiple, les réseaux de neurones, l'analyse de corrélation canonique et le krigeage.

##### **2.7.1.1.1.1. La régression linéaire multiple**

Pour un prédicteur donné, cette méthode permet de déterminer une relation empirique entre celui-ci et un ensemble de prédicteurs connus couvrant une période d'observation dite d'étalonnage. Les meilleurs coefficients de l'équation de régression linéaire multiple correspondent à ceux qui minimisent l'écart quadratique moyen entre prédicteur estimé et observé sur la période de référence. La variance expliquée permet de mesurer la qualité de la relation prédicteur-prédicteur établie. La période d'étalonnage est généralement 1961-1990 ou 1961-1975 pour la construction du modèle de régression linéaire multiple (fonction de transfert) et respectivement 1991-2000 ou 1976-1990 pour la validation du modèle.

Les avantages, inconvénients et hypothèses associés à la méthode sont les suivants:

- Avantages
  - Application par étapes clairement identifiées.
  - Utilisation du potentiel d'un ensemble de prédicteurs.
  - Logiciel disponible gratuitement.
- Inconvénients
  - Pauvre représentation de la variance.
  - Données supposées normale et/ou linéaire.
  - Pauvre représentation des extrêmes (comparativement aux échelles statistiques) et de la variance.
- Hypothèses
  - Les prédicteurs sont des variables appropriés et sont raisonnablement modélisables par le MCG.

- La fonction de transfert est valide dans le futur.
- Les prédicteurs choisis représentent pleinement le signal de changement climatique.

#### **2.7.1.1.1.2. Méthode de changement de facteur (LOCI)**

Cette méthode connue souvent sous le nom de LOCI (Local Intensity scaling factor) est basée sur la considération du champ de précipitation comme prédicteur principal. Cette variable est censée intégrer une bonne partie des prédicteurs de la circulation atmosphérique. Un rapport d'échelle défini par le rapport de l'intensité de précipitation observée à celle simulée par un MCG est calculé pour corriger celui-ci en termes de biais. Les autres variables comme la température sont calculées à partir de ce rapport d'échelle qui peut être mensuel ou quotidien (Schmidli et al., 2006).

#### **2.7.1.1.1.3. La régression canonique**

La méthode RES basée sur l'analyse de corrélation canonique (ACC) peut être perçue comme un cas général de la régression linéaire multiple. L'ACC permet d'étudier la relation entre un ensemble de variables dépendantes et un ensemble de variables indépendantes. La corrélation canonique est optimisée de façon à ce que la corrélation entre les deux ensembles de variables soit maximale. Cependant, contrairement à la régression multiple, il y a plusieurs variables dépendantes et, par conséquent, il y a plus d'une façon de relier les deux ensembles. Toutefois, chaque nouvelle représentation est non corrélée avec les précédentes. L'ACC se distingue de la régression linéaire multiple par la possibilité de considérer plusieurs prédictants simultanément (Bokoye, 2007).

#### **2.7.1.1.1.4. Le réseau de neurones artificiel**

La RES par réseau de neurones artificiel (RNA) est basée sur des modèles à l'image du fonctionnement du réseau de neurone chez l'humain. Ces modèles apparaissent comme une boîte noire permettant l'estimation d'un nombre de paramètres à partir des paramètres des prédicteurs, les deux ensembles sont reliés par des relations non-linéaires entre prédictants et prédicteurs. Les modèles de réseau de neurones ont généralement une structure de type entrée-caché-sortie (input-hidden-output). Le principal avantage du RNA en RES est que la fonction de transfert initial du système a besoin d'être choisi et par la suite tous les paramètres se déterminent à partir d'une séquence d'apprentissage sur la période d'étalonnage considéré (Coulibaly et al., 2001).

#### **2.7.1.1.2. Les méthodes de classification synoptique du temps**

La RES basée sur la circulation atmosphérique à l'échelle synoptique s'appuie sur le principe de classification synoptique du temps (CST) et l'établissement de fonction de transfert

prédicteur-prédictés pour chaque type de temps. La classification synoptique du temps (CST) ou "Weather Typing" est une méthode algorithmique qui est capable de distinguer différentes configurations météorologiques typiques. La classification est l'ensemble des techniques dont le but est de discriminer des groupes d'objets avec deux catégories principales: haute homogénéité interne (au sein de chaque classe) et haute hétérogénéité externe (entre les classes) (Brazel et al., 2007).

La similitude synoptique est le facteur clé dans la classification des phénomènes météorologiques en un nombre fini de types de temps. Il existe différents systèmes de classification tels que l'analyse de cluster (Corte-Real et al, 1999), les classifications subjectives (Jones et al., 1993) et la classification des points cumulatifs du semi-variogramme (Point Cumulative SemiVariogram "PCSV") (Şen et Habib, 2000).

### 2.7.1.1.3. Les générateurs stochastiques de conditions météorologiques

Un générateur stochastique de conditions météorologiques ou "Weather Generator (WG)" est un modèle qui reproduit les attributs statistiques (moyenne et variance) d'une variable climatique considérée à l'échelle locale (Wilby et al., 2002). La variable de sortie de ce type de modèle est une série chronologique artificielle de données météorologiques à très haute résolution temporelle à la limite des ressources informatiques. Il existe deux types de générateurs stochastiques. Le type «Richardson» ou WGEN et le type «en série» ou LARS-WG. WGEN se caractérise par la modélisation de la variable considérée à l'aide de chaîne de Markov<sup>1</sup> qui décrit généralement deux états comme sec ou humide pour la précipitation (Racsko et al., 1991).

Cette méthode utilise la méthode de Markov qui fournit de l'information sur les probabilités conditionnelles de passage d'un état à l'autre (par exemple dans le cas de la précipitation c'est la probabilité qu'un jour humide suive un jour sec ou sur la probabilité qu'un jour humide suive un jour humide) calculées à partir des données d'observation de la station.

Il est également possible de relier l'état actuel à l'état précédent de la même variable climatologique et donc faire la prédiction pour le prédicteur. Dans cette méthode de RE, une approche efficace est la classification du régime pluviométrique spatiale en utilisant différentes méthodes telles que les modèles de Markov cachés (Hughes et al., 1999) et l'utilisation de PCSV.

Les générateurs météorologiques comme les méthodes de RE sont adoptées par le conditionnement de leurs paramètres sur les prédicteurs atmosphériques à grande échelle, les états météorologiques ou les caractéristiques des précipitations (Wilks, 1999). Dans ces modèles, il est important de prendre soin de la variabilité temporelle et la persistance des précipitations en plus des

<sup>1</sup> Principe des: probabilité d'occurrence d'un état dépend uniquement de l'état précédent.

$$P(S_{ik} | S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{ik-1}) = P(S_{ik} | S_{ik-1})$$

paramètres statistiques de base. Dans le domaine des scénarios climatiques et de la RES, les générateurs stochastiques de conditions météorologiques sont utilisés pour générer des chroniques météorologiques à l'échelle quotidienne pour répondre aux besoins des études d'impact et d'adaptation au climat (Wilks and Wilby, 1999).

Les paramètres du modèle du générateur stochastique sont déterminés sur une période d'entraînement à partir des observations. Le modèle ainsi défini est ensuite validé sur une autre fenêtre temporelle des observations. Les limites associées aux générateurs stochastiques de conditions météorologiques relativement à la RES restent l'ajustement arbitraire des paramètres pris en compte pour le climat futur et l'incidence des paramètres de modélisation de l'occurrence des précipitations sur les autres variables comme la température.

#### **2.7.1.1.4. La méthode des deltas**

La méthode des deltas reste encore la procédure la plus populaire pour générer des scénarios climatiques à l'échelle locale ou pour une région d'intérêt. On considère d'abord une climatologie de référence pour le site ou la région d'intérêt. Selon l'application considérée, cette climatologie peut être représentative de moyenne à long-terme (1961-1990) ou les enregistrements météorologiques à l'échelle quotidienne. Le changement moyen ou delta correspondant à un point de grille du MCG proche du site d'intérêt est ensuite calculé en considérant la différence des moyennes (généralement sur une base mensuelle) des valeurs de la variable considérée entre une projection future et la climatologie de référence. Cette différence est ensuite ajoutée aux observations quotidiennes du mois considéré à la station considérée et sur la période de référence.

En l'occurrence, le scénario du climat futur s'obtient tout simplement en rajustant les observations de base selon les changements des variables ou de la différence (ou rapport) entre les résultats moyens pour la période future concernée issus des expériences du MCG et du MCR (généralement des périodes de 30 ans) et les moyennes correspondantes pour la période de référence simulée par le MCG ou le MCR (par exemple 1961-1990). Les différences sont généralement appliquées aux variations de températures (par exemple 2040-2069 moins 1961-1990) alors que les rapports pour les variations de précipitations (par exemple 2040-2069 divisé par 1961-1990) sont couramment utilisés, même si l'on peut préférer les différences dans certains cas. L'une des limites de cette méthode tient au fait qu'elle ne présume aucun changement dans la variabilité à l'avenir, vu que cette variabilité est un héritage du régime climatique actuel. Elle présume par ailleurs que tous les biais dans la simulation du climat d'aujourd'hui sont les mêmes que dans la simulation du climat futur (Environnement Canada, 2014).

La méthode des deltas intègre aussi bien des détails de la climatologie de la station considérée que le changement régional moyen spécifique à la variable considérée et le point de grille du MCG considéré. Il convient de noter que pour le champ de précipitation, le champ d'observation considéré au niveau local est multiplié par le rapport des moyennes mensuelles du climat futur et de référence. Les avantages et les inconvénients associés à la méthode sont les suivantes:

- **Avantages:**

- Mise en œuvre relativement rapide du fait de la disponibilité des données de simulations (modèle climatique + scénarios d'émission) associés à plusieurs MCGs.
- Méthode opérationnelle à Ouranos<sup>1</sup>.
- Possibilité de générer des scénarios sur de longues périodes de l'ordre de 100 ans.

- **Faiblesses:**

- L'hypothèse selon laquelle les biais du MCG calculé pour la période de référence sont les mêmes que pour le futur.
- La distribution spatiale du climat de référence est supposée constante dans le futur.
- La variabilité climatique et la distribution statistique de la variable considérée restent inchangées (i.e. identiques à la période de référence).

## 2.8. Conclusion

Les prévisions des MCG (CMIP5) sont sous forme de matrices multidimensionnels (souvent en 3D: longitude, latitude et temps). L'intersection de chaque longitude avec latitude (pour un temps donné) représente une valeur de la variable étudiée. La distance entre deux points voisins horizontalement ou verticalement dépend de la résolution utilisée (environ 111km : distance entre deux latitudes successives pour la même longitude ou inversement). Cependant, la distance entre deux stations météorologiques est de quelques dizaines de kilomètre. La relation entre données observées au niveau des stations météorologiques et données issues des MCG est bidirectionnelle. Dans une première étape, les données des MCG sont corrigées par les données mesurées puis les données des MCG sont utilisées pour avoir les prévisions à l'échelle des stations en utilisant la méthode de réduction d'échelle.

Dans le chapitre de la prévision des précipitations, nous appliquerons la méthode de réduction d'échelle statistique pour avoir des données pour l'horizon 2100.

---

<sup>1</sup> Ouranos: est un organisme à but non lucratif qui développe des projets collaboratifs impliquant un réseau de 450 chercheurs, experts, praticiens et décideurs issus de différentes disciplines et organisations (Québec, Canada).

### III. Chapitre 3 : Zone d'étude

#### 3.1. Présentation géographique

##### 3.1.1. La situation géographique

Le bassin versant de la Macta, situé au Nord-Ouest du territoire algérien, appartient à l'ensemble de l'Oranie - Tafna - Chott Cherguie -Cheliff (Figure 3.1).

Le bassin de la Macta s'étend sur une superficie de 14389 Km<sup>2</sup>. Il est limité au Nord-Ouest par les chaînes montagneuses du Tessala, au Sud par les hauts plateaux de Maalif, à l'Ouest par les plateaux de Telagh et à l'Est par les monts de Saida (Djediai, 1997) (**Figure 3.2**).

Ce bassin s'étend sur la majorité des wilayas de Mascara, Sidi Bel Abbes et Saida et une partie des wilayas de Tlemcen et Mostaganem.

Globalement, le bassin versant est drainé par deux principaux cours d'eau l'oued Mebtouh (nommé l'oued Mekera dans sa partie supérieure), à l'ouest, et l'oued El-Hammam à l'est.

Le bassin versant de la Macta associe :

- Une basse plaine littorale : Elle est séparée de la mer par un cordon dunaire et présente des altitudes le plus souvent inférieures à 9 m, ce qui favorise la présence de plans d'eau, de marais et de steppes plus ou moins humides. Vers l'amont, elle se prolonge au sud-est par les vallées des oueds Sig et Habra.
- Des massifs, orientés Sud Ouest-Nord Est, qui confèrent un caractère montagneux à la plus grande partie du bassin versant : Les monts de Tessala (point culminant à 1061 m) bordent le bassin versant à l'ouest et au nord-ouest. Ils sont traversés par l'oued Mebtouh avant qu'il ne rejoigne la basse plaine inférieure. Au sud-ouest, ils sont relayés par la partie orientale des monts de Tlemcen (1412 m au djebel Ouargla). Les monts de Beni Chougrane (932 m) occupent une bonne partie de la zone moyenne du bassin versant. Celui-ci remonte, à l'est, jusqu'aux monts de Saïda (1201 m au djebel Tiffrit) et, au sud, jusqu'aux monts de Dhaya (1455 m au djebel Mezioud) et jusqu'aux hauteurs de la bordure septentrionale des hauts plateaux (1415 m au djebel Beghira) qui séparent le terrain d'étude de la dépression du Chott Ech Chergui.
- Enfin, de larges plaines alluviales insérées dans les massifs montagneux : Celle de Sidi Bel Abbès, de direction Sud-Nord, est associée à l'oued Mekerra (nom donné à l'oued Mebtouh dans sa partie supérieure). Le bassin de l'oued El-Hammam, de son

côté, renferme la plaine de Ghriss-Mascara, qui est orientée Ouest-Sud Ouest et Est-Nord Est, et qui est drainée par l'oued Ain Fekane (Meddi et al., 2009).

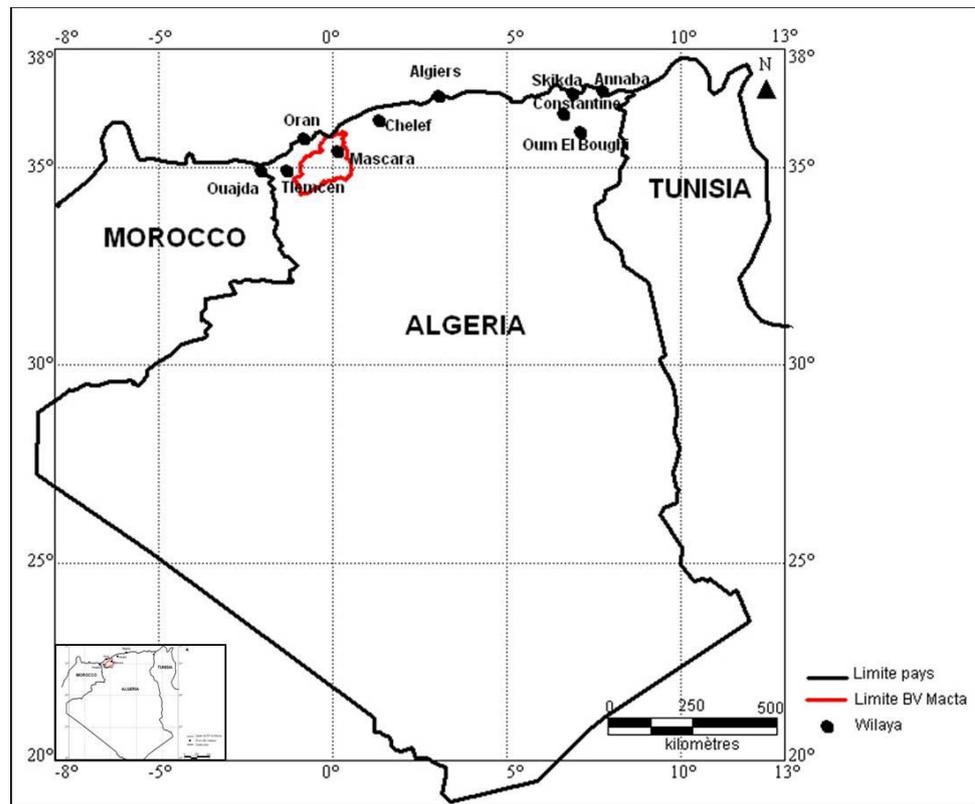


Figure 3.1 : Situation géographique du bassin versant de la Macta

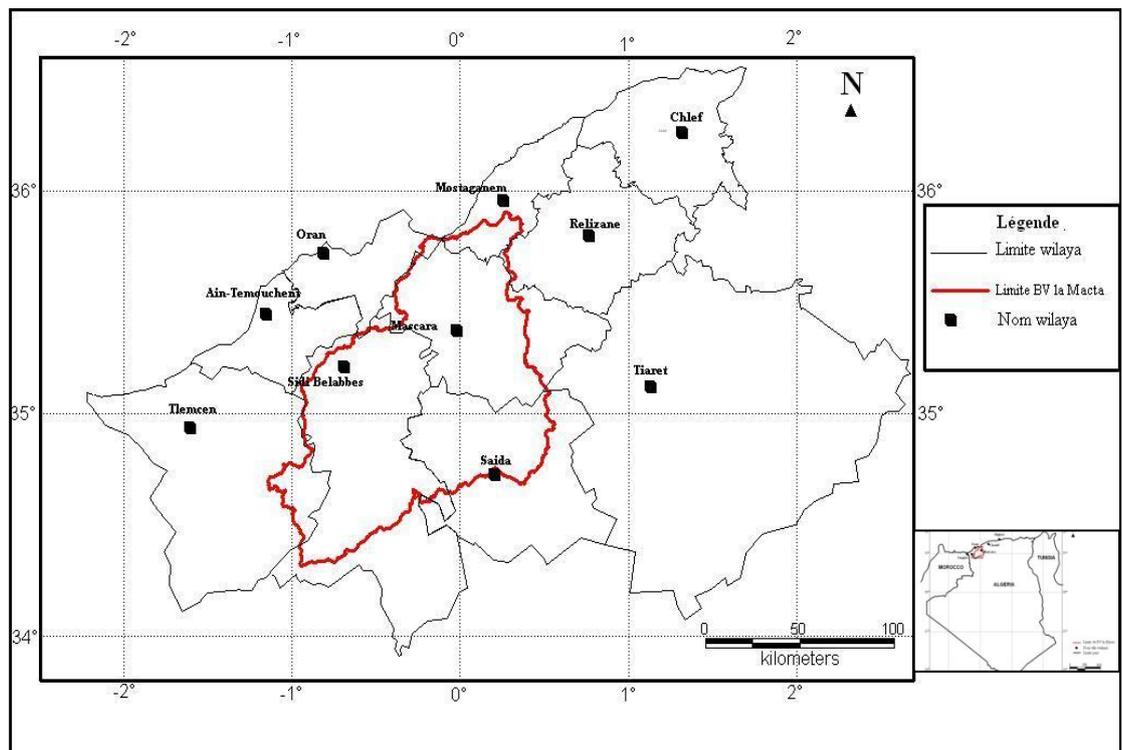


Figure 3.2 : Localisation du bassin de la Macta dans le contexte administratif

## 3.2. Caractéristique des rivières

### 3.2.1. Oued El-Hammam

Le bassin versant de l'oued El-Hammam fait partie du grand bassin versant de la Macta. Il est limité par :

- le grand bassin du bas Chellif à l'Est ;
- l'Oued mebtouh à l'Ouest ;
- la plaine de l'Habra au Nord ;
- Chott Chergui au sud ;

Il s'étend sur une superficie de 7550 Km<sup>2</sup>, d'une longueur de 150 m, est drainé par quatre (4) principaux affluents dans les bassins élémentaires sont Fekan (1200 Km<sup>2</sup>), Sahouet (2200 Km<sup>2</sup>), Houent (2630 Km<sup>2</sup>) et Malrir (1520 Km<sup>2</sup>) pris dans leur ensemble, convergent pour former l'oued El-Hammam. (Djediai, 1997).

L'oued El-Hammam se situe dans le versant nord des hautes plaines oranaises entre 800 et 1200 m d'altitude de l'oued principal, il prend sa source à 16Km au sud-ouest de Ras-El-Ma, à une altitude de 1200 Km suivant une direction sud-est (Benzater, 1996).

Le bassin versant de l'Oued El Hammam, un sous bassin de l'Oued Macta situé dans une zone caractérisée par un climat agressif qui s'applique à des terrains particulièrement érodables (Morsli et al., 2004).

### 3.2.2. Oued Mékerra

Situé dans le Nord-Ouest de l'Algérie, le bassin-versant de l'oued Mekerra fait partie du bassin de la Macta. Il prend son origine dans les hautes vallées de la steppe au sud de la localité de Ras El Ma à une cote de 1 412 m. Le bassin de forme particulièrement allongée et d'une superficie de 3 046 km<sup>2</sup>, est drainé par l'oued Mekerra d'une longueur de 120km. Sa superficie est à 50% située à une cote dépassant les 1000m avec une pente moyenne de l'oued jusqu'à Sidi Ali Benyoub d'environ 2%. Cette dernière n'est plus que de 5‰ entre Boukhanéfis et Sidi Bel Abbès. Le réseau hydrographique du bassin est très développé, mais représenté fréquemment par des cours d'eau temporaires. Les oueds sont alimentés par des précipitations et par des sources dont la plus importante est Ain-Skhouna à Sidi Ali Benyoub (débit d'environ 100 L/s) (Hallouche et al., 2010).

Du point de vue pluviométrique, la quantité moyenne interannuelle des précipitations est de l'ordre de 390 à 400 mm, mais elle peut diminuer jusqu'à 110 mm/an pour les années particulièrement sèches, d'où la variation annuelle des apports liquides de l'oued Mekerra. À titre

indicatif, ce cours d'eau a véhiculé 13 millions de mètres cubes durant l'année hydrologique 1960-1961 et 92 millions de mètres cubes durant l'année 1950-1951, ce qui constitue un apport exceptionnel par rapport à la moyenne interannuelle estimée à 57 millions de mètres cubes (SPI, 2001).

Le bassin de Oued Mékerra se divise en deux :

- **Haute Mékerra** : La haute Mékerra est comprise entre Ras-El-Ma et sidi Ali ben Youb suivant une direction à peu près nord-est, ce partie alimentée par les principaux affluents du bassin versant sont: O. Samar, O. Sekhana, O. Tadjmout.O. Mzi.
- **Moyenne Mékerra** : La moyenne Mékerra se dirige vers le nord. Elle traverse les villages de sidi Ali Ben Youb, Tabia, Boukhanifis, passe au près de Sidi Khaled, puis prend une direction (Sud-ouest, Nord-est). En fin elle passe à proximité des villages de Sidi Lahcen et Sidi Hamadouche. Elle est Alimenté par O. Lamtar (Zegdou, 2003).

### 3.2.3. Oued Saida

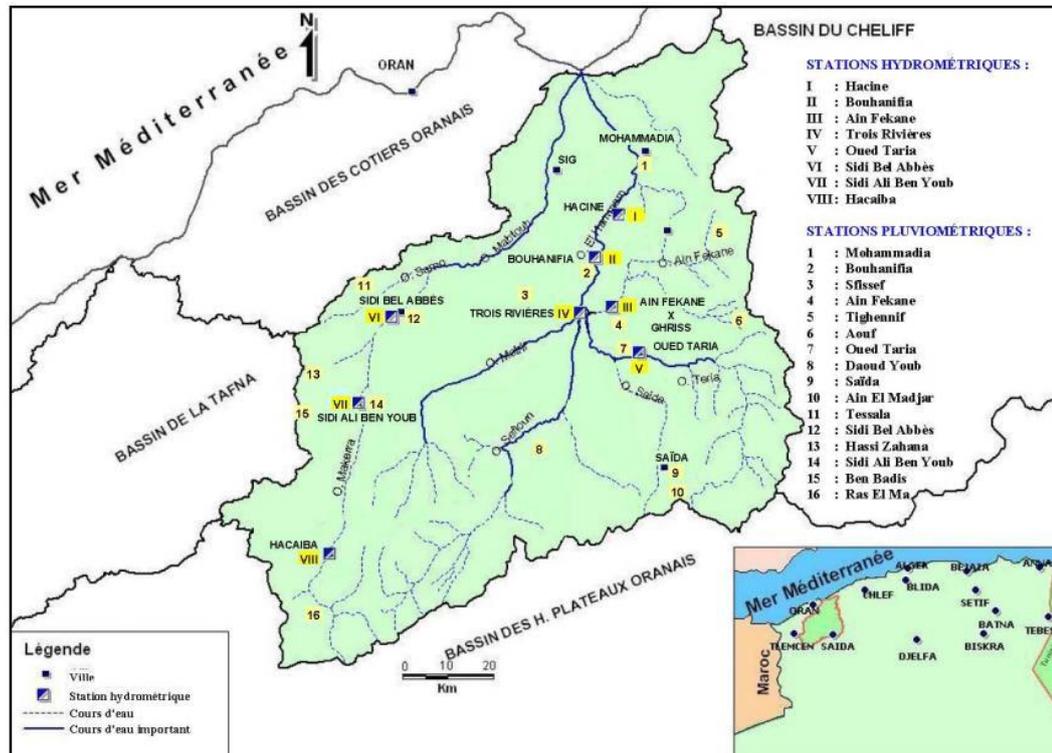
Le grand bassin des Monts de Saïda est drainé par un réseau hydrographique bien structuré et bien hiérarchisé formé principalement par les trois (03) grandes rivières ; Oued Tiffrit, Oued Sidi Mimoune et Oued Saïda qui conserve sa pérennité relative durant presque toute l'année. Les débits de ces oueds sont jaugés par des stations hydrométriques installées sur chaque rivière (Khaldi, 2005).

Le sous bassin versant de l'Oued Saïda se présente comme un bassin montagneux dominé. Il s'étend dans les Monts de Daïa et les Mont de Saïda, au Sud comme à l'Est, par les hautes crêtes séparant de grand bassin du Cheliff. Au Nord et à l'Ouest, par le Djebel Abdelkrim (1203m) et à l'Est par Djebel de Guemroud (1157m), dans les prolongements des Monts de Saïda. Le sous bassin, présentant une forme circulaire légèrement allongée, est orienté vers le Nord géographique. Il couvre une superficie globale de 621,20 Km<sup>2</sup> pour un périmètre de 131,2 Km (Anteur, 2014).

### 3.3. Esquisse hydrologique

Appartenant à un ensemble géographique assez homogène, le bassin de la Macta, s'étend sur une superficie de 14389 Km<sup>2</sup> et est composé de seize (16) sous bassin versants dont le plus grand est celui de la basse Macta (1998 Km<sup>2</sup>). Par sa forme très allongée, ce bassin se caractérise par un écoulement violent dans la partie amont ou le chevelu hydrographique est dense. Cet écoulement s'affaiblit, en aval, par les pertes de charge du ruissellement le long de la cour d'eau, et faute d'existence d'affluents assez important.

Le bassin est drainé par deux cours d'eau principaux, à l'ouest, l'oued Mebtouh, et à l'est, l'oued El-Hammam, qui se rejoignent non loin de la côte méditerranéenne pour former la Macta (Figure 3.3). Son régime hydrologique est marqué par une forte irrégularité d'écoulement tant saisonnière qu'annuelle. Les crues sont rapides, souvent violentes (inondation catastrophique de la région de Sidi bel Abbès). Les apports liquides sont relativement faibles compte tenu du déficit pluviométrique très sensible que subit l'Oranie ces deux dernières décennies (40% en moyenne) (Dakiche, 1996).



**Figure 3.3 :** Réseau hydrographique du bassin versant de la Macta (Meddi et al., 2009)

Les transports solides sont considérables. Les grandes exportations sont liées aux ruissellements exceptionnels qui sont enregistrés en automne ou les conditions optimales du ruissellement sont réunies (pluies abondantes et relativement intenses, sol nu, croute de battance). Ces ruissellements, qui génèrent beaucoup de griffes et de rigoles surtout les sols argileux, sont à l'origine de dégradations spectaculaires qui marquent souvent le paysage pour plusieurs années (Labani 2014 in Anteur, 2014).

Les crêtes montagneuses se relayent du Sud-Ouest au Nord-Est, pouvant atteindre localement 1400 m d'altitude. Au Sud, les limites du bassin constituent un véritable seuil naturel climatique séparant deux régimes pluviométriques opposés : continental saharien pour les flancs Sud et méditerranéenne humide pour les flancs Nord. L'altitude maximale est située aux environs de Daya, estimée à 457 m (Elouissi, 2004).

Généralement envahi par les masses d'air d'origine polaire, le bassin subit, au Nord, l'invasion des masses d'air marines, très chargées en humidité, engendrant le plus souvent, des précipitations abondantes en saison froide. Au Sud, un régime continental mixte, ou la pluviométrie, sous l'influence des masses d'air chaud et sec (Sirocco) est en nette décroissance (Khaldi, 2005).

Les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble sont des variables très aléatoires dans le temps et dans l'espace; de même, ils permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large.

Seize postes pluviométriques fournissent des données remontant jusqu'en 1930 (Figure 3.3). En considérant les années climatiques (du 1er septembre au 31 août), les précipitations annuelles moyennes sur la période 1930-2002 varient de 230 mm à Ras El Ma (dans la partie sud du bassin) à 559 mm à Aouf (au pied des montagnes de Beni Chougrane). Sur la période septembre 1930 - août 2004, les précipitations annuelles ont dépassé 800 mm en deux points d'observation seulement : Aouf (sept fois) et Ben Badis (une fois). À Aouf, la valeur annuelle de 800 mm a une période de retour d'une douzaine d'années (loi de GAUSS) et les précipitations ont atteint 991 mm en 1943-44 (période de retour : 149 ans) (Meddi et al., 2009).

La pluviométrie annuelle décroît du Nord vers le Sud et varie en moyenne de 300 à 500 mm. Localement, elle peut atteindre 600, voire 700 mm sur les crêtes des monts de Saida, à Aouf. Concernant les moyennes mensuelles, le mois de janvier est généralement le plus humide et le mois de juillet est le plus sec.

Quant à l'écoulement superficiel, les potentialités en eau sont évaluées à plus de 260 Hm<sup>3</sup> qui se répartissent respectivement entre 70 Hm<sup>3</sup> dans la Mékerra et 190 Hm<sup>3</sup> dans l'oued El-Hammam qui draine la partie orientale la plus arrosée du bassin. Il est à noter que les apports liquides engendrés par les crues, constituent près de 80% du total annuel. Les crues, se présentant épisodiquement, sont généralement violentes mais peu durables (Dakiche, 1996).

### **3.3.1. Cycle hydrologique**

Les différents processus intervenant lors du cycle hydrologique sont les précipitations, l'interception, l'évapotranspiration, l'écoulement à surface libre, l'écoulement en milieu non saturé et l'écoulement en milieu saturé. Ces phénomènes naturels liés à l'eau sont complexes et nécessitent une variété d'approches différentes pour approfondir notre connaissance. Le processus de ruissellement désigne souvent les écoulements à la surface des sols et dans les rivières, ainsi que les écoulements souterrains. La complexité de ce processus a conduit à différentes représentations

telles que le ruissellement hortonien<sup>1</sup>, les écoulements sub-superficiels et le ruissellement par saturation (Moussa, 1991).

### 3.4. Le réseau hydrographique

L'inclinaison de la surface du terrain est facteur important pour déterminer l'aptitude à l'érosion du relief et du sol. Elle indique de manière significative le degré d'érosion. Il faut souligner que l'inclinaison est influencée par la roche en place, les sols, le ravinement, la distribution et la quantité des pluies. Un classement bien défini des différentes pentes était une donnée essentielle pour cette étude.

Aussi élémentaire que cela puisse paraître, il n'est pas aisé de donner une définition complète du réseau hydrographique. Les approches peuvent être très variées. Nous avons choisi de retenir ici deux définitions complémentaires provenant du même auteur (Deffontaines in Marakchi, 2000).

«Le réseau hydrographique correspond à tout écoulement linéaire concentré sur la surface topographique qu'il transforme progressivement. Il représente un état du cycle de l'eau, celui de l'écoulement qui suit le chemin le plus facile, minimisant sans cesse leur entropie».

« Le réseau hydrographique est l'ensemble des surfaces topographiques émergées, situées en contrebas de tous les points voisins, sauf généralement selon la direction d'écoulement. Ces surfaces peuvent contenir de l'eau de manière temporaire ou permanente».

Ainsi, le réseau hydrographique comporte les talwegs et les dépressions formées (endoréiques ou exoréiques).

### 3.5. Le réseau hydro-climatologique

En matière de réseau Hydro-climatologique, le bassin compte 120 stations pluviométriques dont une trentaine de pluviographes et cinq stations climatologiques complètes, mesurant les principaux paramètres météorologiques (T °c, H, P, Vent, Evaporation...). Le réseau hydrographique, moins dense, est contrôlé par une vingtaine d'hygrométries (observation limnométriques et mesures de jaugeages). Les périodes de fonctionnement de l'ensemble des postes varient selon l'objectif de la station. Nous pouvons dire que le bassin est suffisamment équipé en postes d'observation pour pouvoir contrôler le régime hydrologique tant à l'amont qu'à l'aval.

La climatologie est contrôlée par cinq stations dont la période de fonctionnement dépasse vingt (20) ans. Quant au réseau hydrométrique, il existe plus de vingt (20) stations exploitables,

---

<sup>1</sup> Le ruissellement hortonien apparaît lorsque les intensités de pluie dépassent la capacité d'infiltration des sols. Dans ce cas, l'excédent stagne à la surface du sol et peut s'écouler sous l'effet de la pente. C'est le type de ruissellement le plus naturellement compris, observé et intuitif (Horton, 1933).

toujours opérationnelles. Cinq stations possèdent des périodes supérieures à trente (30) années, sans lacunes significatives (Figure 3.3).

### **3.6. Potentialités des ressources en eau superficielle dans le bassin de la Macta**

Situé dans la zone subtropicale, versant Nord de l'Atlas Tellien, le bassin de la Macta est soumis à l'influence directe du régime Méditerranéen, au Nord, et de la vaste étendue continentale du Sahara, au Sud. Le climat est caractérisé par deux grandes saisons : un hiver froid (Octobre - Avril), dont les masses d'air humide, par effet orographique de l'Atlas, provoquent des précipitations cycloniques exceptionnelles, et un été chaud (Mai - Septembre) où l'air continental localisé dans le Nord, entraîne un anticyclone qui conditionne un temps stable et très sec. En hiver comme en été, le bassin subit les effets maritimes de modération en matière de température extrêmes saisonniers. Par sa position et son orientation géographique, le bassin est exposé aux phénomènes atmosphériques mixtes, soit une zone contact et d'opposition entre les masses d'air polaire et d'air tropical continental. Les précipitations frontales d'hiver ainsi provoquées, sont abondantes généralement, les seules, d'une intensité forte et de durée plus longue, pouvant influencer sur le ruissellement. Les pluies orageuses de convection d'été et d'automne, intéressent plutôt les hautes plaines, s'affaiblissant en perdant leur prédominance dans les massifs de l'Atlas. Elles se dégradent progressivement vers le sud, constituant alors, au passage, un véritable seuil de transition climatique, d'où changement brusque du climat semi-aride (300 -500 mm) au climat aride (150-200mm) vers les zones sahariennes.

En matière d'écoulement superficiel, les pluies génératrices des crues se produisant de temps en temps, le plus souvent dans tous les bassins, mais leur distribution varie d'un événement pluvieux à un autre. Le ruissellement des fortes averses est de l'ordre de 10 à 20 % du total annuel dont les débits de pointe varient respectivement dans les deux artères principaux (Oued Mékerra et Oued El-Hammam), de 200 à 1000 m<sup>3</sup>/s, exceptionnellement supérieurs à 2000 m<sup>3</sup>/s dans le versant oriental. A titre indicatif, la crue la plus violente du siècle passé, en 1927, estimée à plus de 5000m<sup>3</sup>/s, a provoqué la rupture du barrage de Fergoug (Monet, 1928).

Quant aux apports liquides, les potentialités annuelles, sont estimées en moyenne à 260 millions de mètres cubes dont près de la moitié est régularisé par les cinq ouvrages hydrauliques situés dans le bassin. L'écoulement, en périodes de crue, constitue en fait 80 % environ de l'apport annuel évidemment, la sécheresse qui sévit depuis plus de deux décennies dans la région avec une acuité très prononcée, réduit ces estimations de l'ordre de 30 %, compte tenu du déficit pluviométrique enregistré durant la même période (A.N.R.H., 1997).

## IV. Chapitre 4 : Climatologie

### 4.1. Introduction

Les études hydro-climatologiques plus ou moins poussées sont indispensables pour une estimation fiable et une gestion rationnelle des ressources en eau superficielle et souterraine.

L'étude climatologique a pour but d'étudier les paramètres climatiques qui déterminent en grande partie l'écoulement de surface, d'estimer les volumes d'eau mis à la disposition des nappes souterraines, et de faciliter donc leur exploitation rationnelle.

Les données climatiques récoltées fournissent des informations précieuses à beaucoup de gens. Le climat exerce donc une énorme influence sur notre vie. Toute notre vie sociale, économique et politique est influencée par le climat.

Les travaux d'aménagement, d'agriculture et les choix respectifs sont conditionnés par la connaissance des données climatiques. Toutes ces informations se trouvent dans les archives climatiques, établies à partir de plusieurs années d'observation et disponibles pour plusieurs localités.

La détermination d'un climat repose sur l'analyse statistique du temps qu'il a fait chaque jour sur une longue période, en général de l'ordre de 30 années consécutives (Matari, 2000).

Avant d'entamer l'analyse stochastique<sup>1</sup> nous donnons dans ce qui suit un bref rappel bibliographique sur la climatologie.

### 4.2. Le climat

Le mot climat vient du grec *klima*, qui fait référence à l'inclinaison des rayons solaires par rapport à la surface de la Terre.

**Le temps** c'est l'état instantané de l'atmosphère en un milieu donné (ou une région donnée). Le temps représente l'état d'une journée ou d'un mois. Mais si la période est grande (plusieurs années), on ne parle plus de temps mais du climat.

**Le climat**, c'est l'ensemble des phénomènes météorologiques observés dans le passé et qu'on s'attend d'observer encore sur une longue période. On peut le définir aussi comme «la probabilité d'occurrence de divers états de l'atmosphère dans un lieu ou une région, au cours d'une certaine période donnée» (Gibbs, 1987).

---

<sup>1</sup> Phénomène stochastique: qui est le fruit du hasard, au moins en partie (qui relève du domaine de l'aléatoire). Dont le déterminisme n'est pas absolu, et pouvant être étudiés par la statistique (opposé à déterministe). Exemple tous phénomènes dépendant du temps. À ce titre, c'est une extension de la théorie des probabilités. Le domaine d'application du calcul stochastique comprend la mécanique quantique, le traitement du signal, la chimie, les mathématiques financières, la météorologie, et même la musique. En théorie des probabilités, on dit qu'un phénomène est stochastique s'il dépend de variable(s) aléatoire(s) (Le Garff, 1975).

Contrairement à la météorologie qui étudie les variations du temps à très court terme, la climatologie s'intéresse à l'analyse quantitative à plus long terme (généralement sur une durée d'environ 30 ans), de la moyenne des paramètres requis pour caractériser les états de l'atmosphère principalement la température de l'air, la lame d'eau précipitée, la durée d'insolation, la direction et la vitesse du vent (Charveriat, 2000).

#### **4.2.1. Eléments du climat**

Le climat est l'ensemble des conditions atmosphériques au-dessus d'un lieu. Pendant que le temps est la combinaison des éléments suivant: la température, les précipitations et les vents à un moment donné. Ces éléments sont appelés éléments du climat.

##### **4.2.1.1. La température**

La température est une grandeur dont les variations créent les sensations de chaleur et de fraîcheur. La température de l'air se mesure à l'aide d'un thermomètre à mercure.

Le régime thermique d'un milieu est la variation des températures enregistrée en ce milieu. L'amplitude thermique annuelle est la différence de température entre les mois les plus chauds et les mois les plus froids au cours d'une année. La température varie avec les saisons, l'altitude, la latitude et la proximité de la mer.

##### **4.2.1.2. Les vents**

Le vent est l'air en mouvement ou l'agitation de l'air. Il est un déplacement de l'air des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Les principaux vents sont: l'alizé, le mistral, le typon, le harmattan, la mousson. La direction du vent s'observe grâce à la girouette ou un manche à air.

##### **4.2.1.3. Les précipitations**

La précipitation est la chute de l'eau contenue dans l'atmosphère au sol. Il existe plusieurs formes de précipitations:

- La forme liquide (pluie).
- La forme solide (neige).
- La forme gazeuse (brouillard, rosée).

Les pluies ont pour origine la vaporisation des eaux. La vaporisation étant la transformation de l'eau en vapeur, cette vapeur se transforme en liquide au niveau de l'atmosphère: C'est la

condensation qui est la transformation de la vapeur d'eau à l'état liquide. Quand l'atmosphère ne peut plus supporter les gouttelettes d'eau, elles tombent sous forme de pluies: C'est le cycle de l'eau qui signifie que l'eau vient de la mer.

#### **4.2.2. Les facteurs du climat**

Les facteurs du climat sont les éléments influençant le climat soit au niveau du globe terrestre soit au niveau d'une localité. Les facteurs qui influencent le climat au niveau du globe terrestre sont appelés facteurs cosmiques qui sont: les mouvements de la terre, l'inclinaison de l'axe des pôles.

Les facteurs qui influencent le climat au niveau local sont: le relief, les courants marins (chauds et froids) et la végétation.

#### **4.3. Collecte et traitement des données**

##### **4.3.1. Collecte des données**

La majorité des stations météorologiques ne fournissent que les données de la pluviométrie. C'est pourquoi toute notre étude a été faite sur ce seul paramètre climatique.

Les données (valeurs mensuelles des précipitations) ont été recueillies auprès de l'agence nationale des ressources hydrauliques (A.N.R.H.). Ces valeurs représentent des totaux pluviométriques mensuels.

##### **4.3.2 Choix des stations et de la période de l'étude**

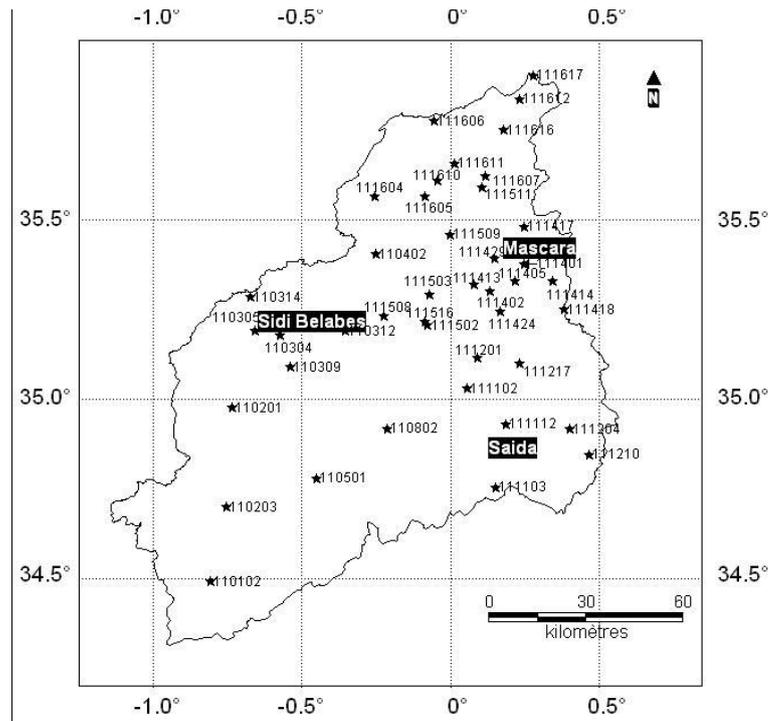
Pour un bon traitement des données recueillies, il est nécessaire et indispensable que la période de collecte soit suffisamment longue, autrement dit l'échantillon doit être suffisamment grand. Nous avons récoltés 123 stations ayant des taux de lacunes variés.

Cependant, la réalité est différente, à cause des lacunes que nous trouvons souvent dans les séries d'observation de ces stations (Azzaz, 2001). Les stations ayant un taux de lacunes supérieur à 10% ont été exclues (Meddi et Assani, 2014). Nous avons finalement retenues 42 stations (Tableau 4.1).

**Tableau 4.1** : Liste des stations météorologiques retenues

N°	Code	Nom station	Longitude	Latitude	Altitude (m)
01	110102	Ras El Ma	-0.80933	34.49474	1097
02	110201	Sid Ali Ben Youb	-0.73404	34.97825	635
03	110203	El Hacaiba	-0.75557	34.70201	950
04	110304	Sarno Bge	-0.57406	35.18035	425
05	110305	Sidi Bel Abbas	-0.65858	35.19152	485
06	110309	Hassi Daho	-0.53859	35.09111	650
07	110312	Mostefa Ben Brahim	-0.35697	35.19200	590
08	110314	Ain Trid	-0.67575	35.28576	530
09	110402	Cheurfas Bge	-0.25163	35.40440	230
10	110501	Merine	-0.45177	34.78133	970
11	110802	Daoud Youb	-0.21412	34.92048	660
12	111102	Meftah Sidi Boubekeur	0.05599	35.03100	530
13	111103	Ain El Hadjar	0.14913	34.75706	1025
14	111112	Hammam Rabi	0.18628	34.93192	710
15	111201	Oued Taria	0.09106	35.11566	501
16	111204	Ain Tifrit	0.40186	34.91782	970
17	111210	Tamesna	0.46458	34.84732	1105
18	111217	Beniane	0.23145	35.10108	630
19	111401	Maoussa	0.24820	35.37831	494
20	111402	Froha	0.13004	35.30321	467
21	111405	Matemore	0.21503	35.32982	482
22	111413	Tizi	0.07613	35.32008	453
23	111414	Sidi Kada	0.34432	35.33020	549
24	111417	Ain Fares	0.24778	35.48158	806
25	111418	Nesmoth Mf	0.38182	35.25157	930
26	111424	Ghris	0.16650	35.24627	498
27	111429	Mascara	0.14643	35.39286	550
28	111502	Sahouet Ouizert	-0.07953	35.20785	361
29	111503	Bou Hanifia Bge	-0.06981	35.29196	306
30	111508	Sfissef	-0.22602	35.23184	545
31	111509	Hacine	-0.00454	35.45988	145
32	111511	Mohammadia Grha	0.10421	35.59038	50
33	111516	Trois Rivieres	-0.08595	35.21852	315
34	111604	Oggaz	-0.25537	35.56487	73
35	111605	Bou Henni	-0.08649	35.56533	26
36	111606	Fornaka	-0.05675	35.77438	78
37	111607	Samouria	0.11532	35.62219	48
38	111610	Mocta Douz	-0.04662	35.60955	18
39	111611	Ferme Blanche	0.01306	35.65736	20
40	111612	Bled Taouria	0.23075	35.83568	118
41	111616	Marais De Sirat	0.17641	35.75067	30
42	111617	Ferme Assorain	0.27798	35.90294	222

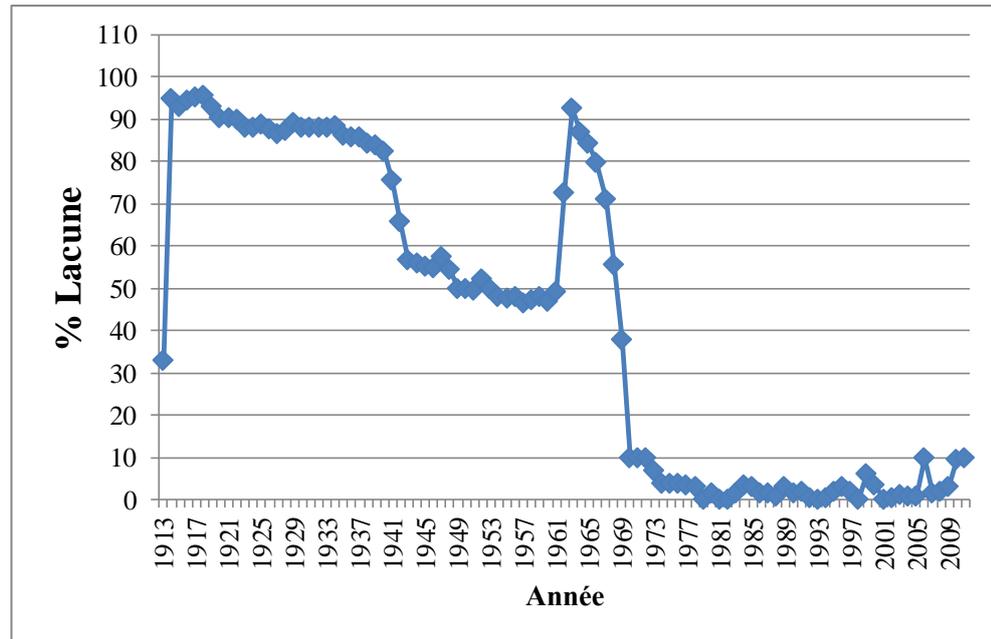
Les stations du Tableau 4.1 sont représentées sur la carte de la Figure 4.1.



**Figure 4.1:** Carte des stations retenues

Les stations retenues présentent une bonne distribution spatiale. Elles forment un réseau qui couvre l'ensemble des sites, ainsi nous pourrions distinguer des stations côtières, des stations de montagnes, des stations de collines et des stations de plaines.

Le choix de la période d'étude est une étape très importante de notre travail de thèse. Le but est de choisir une période qui présente un minimum de lacunes pour l'ensemble des stations. Pour faciliter le choix de la période d'étude nous avons calculé le taux de lacunes pour chaque année. Ces derniers sont représentés sur la Figure 4.2.



**Figure 4.2:** Pourcentage des lacunes par année

L'analyse de la Figure 4.2 montre que la période 1970-2011 présente des taux de lacunes acceptables (inférieur à 10%) et donc elle a été retenue comme période d'étude de notre travail.

#### 4.3.3. Etude de l'homogénéité

Une série de données continue et longue est indispensable pour chaque étude climatologique. Un manque de données successif provoque des discontinuités dans la chronologie d'une série et rend les interprétations difficiles.

On se propose d'étudier l'organisation des séries chronologiques dans le temps et par conséquent conclure si ces données sont organisées ou au contraire elles se succèdent d'une manière aléatoire. Une série est dite homogène si la loi de distribution d'un élément mesuré considéré comme une variable aléatoire n'a pas changé pendant une période donnée. Une série pourrait ne pas être homogène pour plusieurs raisons, citons comme exemple le déplacement de certaines stations, le changement de type d'appareils, un changement de nature anthropique comme la construction d'un barrage affectera la série de mesure des débits en aval du barrage.

Les données de la pluviométrie mensuelle s'ajustent bien à la loi racine normale (Assaba et al., 2013 ; Berolo, 2010 ; Lubès et al., 1994 ; Claire Lang Delus, 2011). L'adéquation est vérifiée par ajustement graphique des valeurs observées (en utilisant les macro-commandes d'HydroLab (2010)) (Figure 4.3).

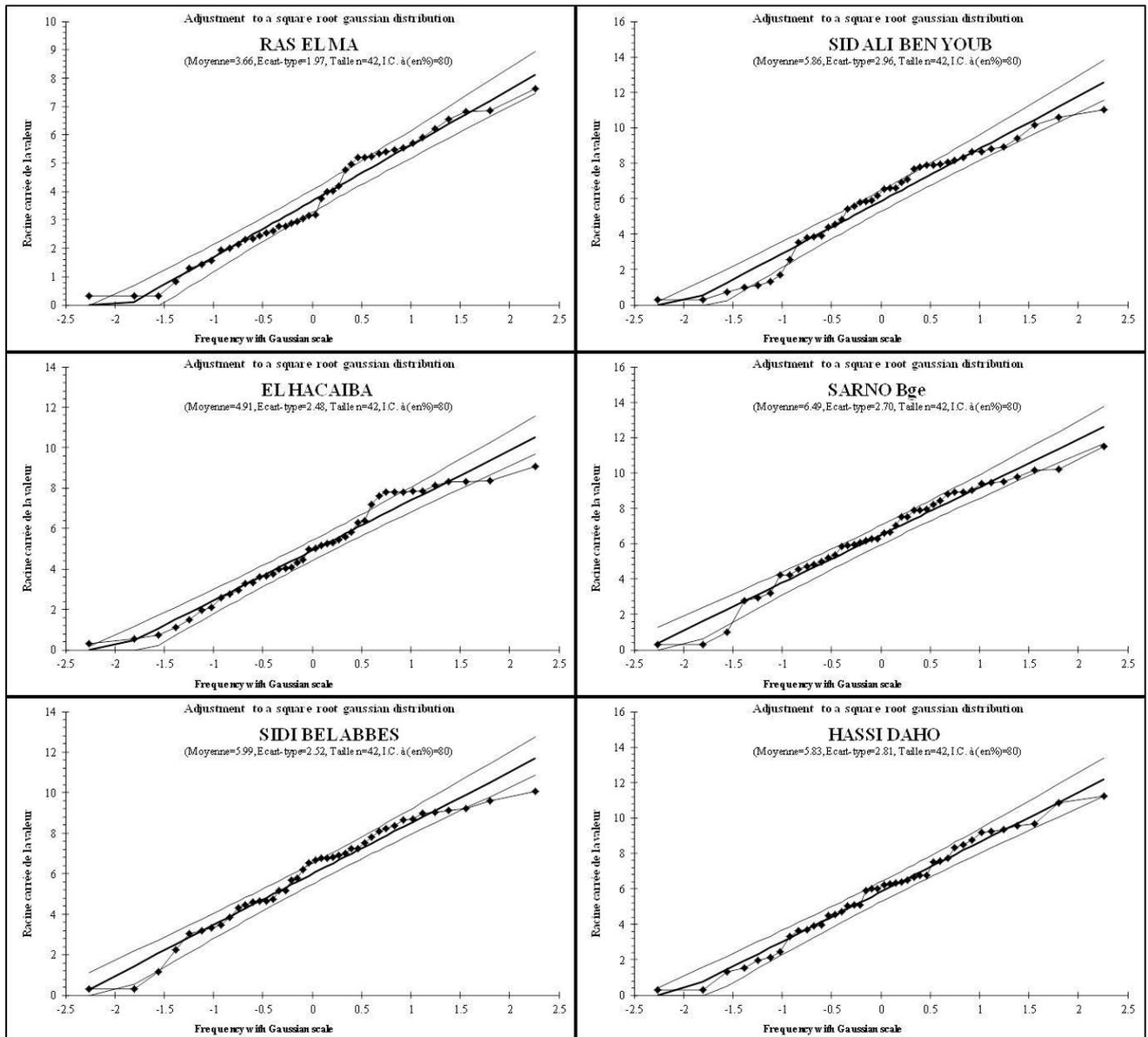


Figure 4.3: Ajustement à la loi Racine Normale de quelques stations (mois de janvier)

#### 4.3.4. Valeurs aberrantes

Quelle que soit la façon dont les données sont obtenues, il y aura toujours le risque de rencontrer des valeurs erronées. Ces erreurs peuvent être systématiques (mauvais appareillage par exemple) ou accidentelles (mauvaise lecture, erreur lors d'un report, etc.). Toute étude hydrologique devra donc commencer par une critique des données disponibles de façon à éliminer si possible les données les plus suspectes. Ces techniques ne permettent pas de déceler les erreurs ; elles permettent seulement de mettre en évidence une valeur ou des séries de valeurs "anormales" compte tenu des hypothèses que l'on a pu faire sur le comportement de la série des variables étudiées. Les anomalies dans les séries de données ayant été mises en évidence par ces techniques, c'est à l'hydrologue de "décider" si une donnée est "bonne" au "mauvaise". Ce choix s'appuie sur

des arguments statistiques plus ou moins objectifs et sur la connaissance plus ou moins subjective que l'on a du phénomène (Laborde, 2013).

Une erreur de mesure est définie comme étant la différence entre la vraie valeur (qui est l'idéal recherché, mais qui n'est en principe et malheureusement jamais connue) et la valeur mesurée. Il est commode, tant pour les présenter que pour différencier la façon de les aborder, de considérer deux types d'erreur : **les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques**.

- Les erreurs aléatoires (ou accidentelles)- Elles affectent la précision des données et sont non corrélées. Ce type d'erreur est dû à des raisons nombreuses et variées, généralement inconnues, affectant différemment chaque mesure individuelle. Généralement on considère que ces erreurs sont les réalisations d'une variable aléatoire normale centrée en 0 et de variance  $S^2$ . Ces erreurs étant inévitables, il faut en estimer l'importance afin de pouvoir en tenir compte lors de l'évaluation de l'incertitude finale. Dans la mesure du possible, la technique de mesure induisant les erreurs aléatoires les plus faibles devrait être préférée.
- Les erreurs systématiques affectent la fiabilité des données et sont totalement corrélées. On parle aussi d'inconsistance. Supposons qu'aucune erreur aléatoire n'affecte les mesures. La différence entre la vraie valeur et la valeur mesurée, si elle existe, est alors due à une erreur systématique. L'origine des erreurs systématiques peut être due aux défauts des appareils ou aux conditions de leurs fonctionnement ; comme elle peut être liée aux conditions dans lesquelles sont faites ou relevées les observations : erreur d'appareillage, changement d'observateur, appareils mal placés, erreurs de lecture ou de calcul (Estienne et Godrd, 1982).

Il est donc indispensable de comparer tous les relevés de la région pour s'assurer qu'ils ne présentent pas de discordance anormale. Si par exemple, toutes les stations de la région signalent une forte pluie non orageuse et qu'une seule ne l'indique pas, il y aura de fortes chances pour que cette dernière station ait omis le phénomène. Nous devons cependant tenir compte de la situation topographique. De même, si après une période pluvieuse de plusieurs jours, une station indique, à une certaine date une grande quantité de pluie, il est alors fort probable que l'observateur n'effectue pas régulièrement son observation quotidienne et ne relève la pluie que tous les trois ou quatre jours (Sanson, 1949).

Le phénomène des valeurs aberrantes peut entraîner des interprétations erronées au vu des résultats. Il est donc nécessaire de vérifier toute valeur douteuse par rapport aux valeurs des stations faisant partie de la même micro-région et éventuellement d'y apporter une correction (Briatte, 1982).

Les méthodes utilisées pour la détection des valeurs aberrantes peuvent être analytiques ou graphiques.

#### 4.3.4.1. Méthodes analytiques

Pour la détection des valeurs aberrantes, nous construisons un intervalle de confiance (équation 4.1) (Dagnéli, 1973). Nous considérons comme aberrantes ou extrêmes toutes données qui se situent en dehors de l'intervalle construit.

Pour la pluviométrie, l'intervalle est :

$$x \in [\bar{X} - S_x, \bar{X} + S_x] \quad (4.1)$$

Avec  $\bar{X}$  et  $S_x$  la moyenne et l'écart type de la série calculés sur le mois où la valeur aberrante apparaît.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (4.2)$$

Avec :

$X_i$  : précipitation mensuelle.

$\bar{X}$  : Précipitation moyenne de la série étudiée.

$n$  : nombre d'observation.

Cependant, cet intervalle correspond pour la distribution normale à un seuil de confiance de 68%, d'où un rejet de 32% des valeurs, c'est pourquoi il est préférable d'utiliser un nouvel intervalle exprimant un seuil de 99% (de la table de la distribution normale, nous trouvons  $U_{0,99} = 2.575$ ). Cet intervalle est comme suit :

$$x \in [\bar{X} - 2.575 * S_x, \bar{X} + 2.575 * S_x] \quad (4.3)$$

Chaque donnée sortant de l'intervalle ainsi défini est comparée aux données équivalentes des stations voisines. Si toutes les données des stations comparées sortent de l'intervalle, il s'agit d'un phénomène météorologique particulier. Cette valeur ne peut être mise en doute. Par contre si les valeurs des autres stations ne sortent pas de l'intervalle de confiance calculé, il convient de corriger la donnée aberrante (Briatte, 1982).

#### 4.3.4.2. Méthodes graphiques

##### 4.3.4.2.1. Le simple cumul

Le principe consiste à cumuler les valeurs observées et voir ensuite si ces cumuls forment une droite en fonction du temps, avec ou sans changement de pente.

D'après cette méthode une série est dite homogène si la droite obtenue ne présente pas de cassure apparente, c'est-à-dire que dans le cas contraire la série est hétérogène. Les années sont portées en abscisse et les cumules en ordonnée. L'application de cette méthode est limitée, lorsqu'il s'agit d'une série dont les valeurs varient fortement d'une année à une autre, et même s'il existe une cassure de la droite on ne peut pas différencier entre une hétérogénéité des données et une tendance climatique.

#### 4.3.4.2.2. Le double cumul (ou double masse)

L'analyse par la courbe de doubles cumuls est une méthode graphique permettant de détecter et éventuellement de corriger les irrégularités dans les relevés d'une station en comparant la tendance des observations dans le temps à celles d'autres stations.

Le principe de la méthode consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées à deux stations. L'une des stations (station X) est la station de base ou station de référence, supposée correcte. L'autre station (Y) est la station à contrôler. Un effet de lissage est obtenu en comparant, au pas de temps choisi (année, saison, mois, décade), non pas les valeurs observées, mais leur cumul. La méthode est d'un concept extrêmement simple, puisqu'il suffit de tracer un graphe des quantités :

$$X(t) = \sum_{i=0}^t x(i) \quad (4.4)$$

Et

$$Y(t) = \sum_{i=0}^t y(i) \quad (4.5)$$

Cette méthode permet de déceler graphiquement l'hétérogénéité de la série à étudier. Elle consiste à :

- Sélectionner comme station de base une ou plusieurs stations dont les observations sont fiables ;
- Faire les cumules des données (annuelles, mensuelles ou saisonnières). Dans le cas où nous travaillons avec plusieurs stations de référence, nous créons une station virtuelle formée par la moyenne arithmétique de ces totaux individuels des autres stations proposées homogènes, Nous procédons au même cumul pour la station à contrôler par rapport aux stations de base.

Si les données de la station contrôlée sont homogènes par rapport à celles de la ou des stations de base, la courbe des doubles cumuls avoisine une droite (Figure 4.4). Si elle possède une cassure à partir d'une date « D », les observations à partir de ce point sont soit fausses soit hétérogènes. Dans

le cas où l'hétérogénéité est détectée, la correction s'effectue par modification de la pente de la droite de double cumul des données antérieures à la date de la cassure. Seul le but visé par l'étude en cours peut indiquer quelle partie de la série est à corriger.

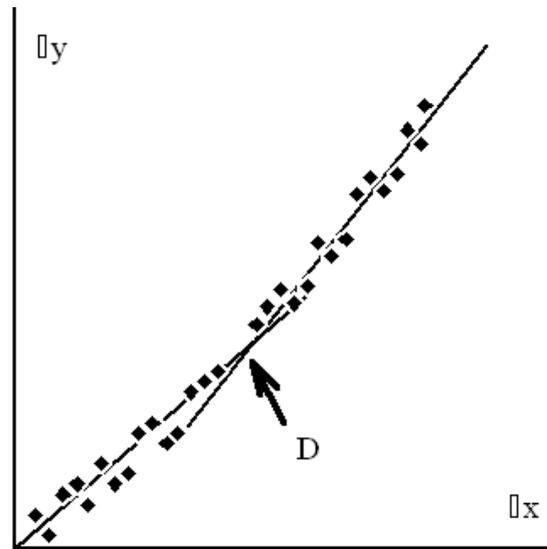


Figure 4.4: Méthode des doubles cumuls (doubles masses) (Laborde, 2013)

#### 4.3.4.2.3. Méthode du cumul des résidus

Cette méthode beaucoup plus puissante que la méthode des doubles masses, nécessite cependant des calculs un peu plus longs (Laborde, 2013). L'idée de base consiste à étudier les cumuls des résidus  $\epsilon_i$  entre les valeurs observées et les valeurs estimées par la droite de régression (Yue Rong, 2011). Ces cumuls  $Z_i$  sont calculés par la formule suivante (Equation 4.6).

$$Z_i = \sum_{j=1}^i \epsilon_j \tag{4.6}$$

$Z_i$  est une variable aléatoire ayant une moyenne nulle et un écart type  $\sigma_{Z_i}$ . Nous construisons alors, pour chaque valeur  $Z_i$ , un intervalle de confiance (pour un seuil de signification donné) pour obtenir l'équation (Equation 4.7):

$$\left[ -u_{1-\frac{\alpha}{2}} \sigma_{Z_i}, u_{1-\frac{\alpha}{2}} \sigma_{Z_i} \right] \tag{4.7}$$

Où  $u_{1-\frac{\alpha}{2}}$  est une variable réduite de Gauss lue selon un test bilatéral et  $\sigma_{Z_i}$  est calculée par l'équation 4.8:

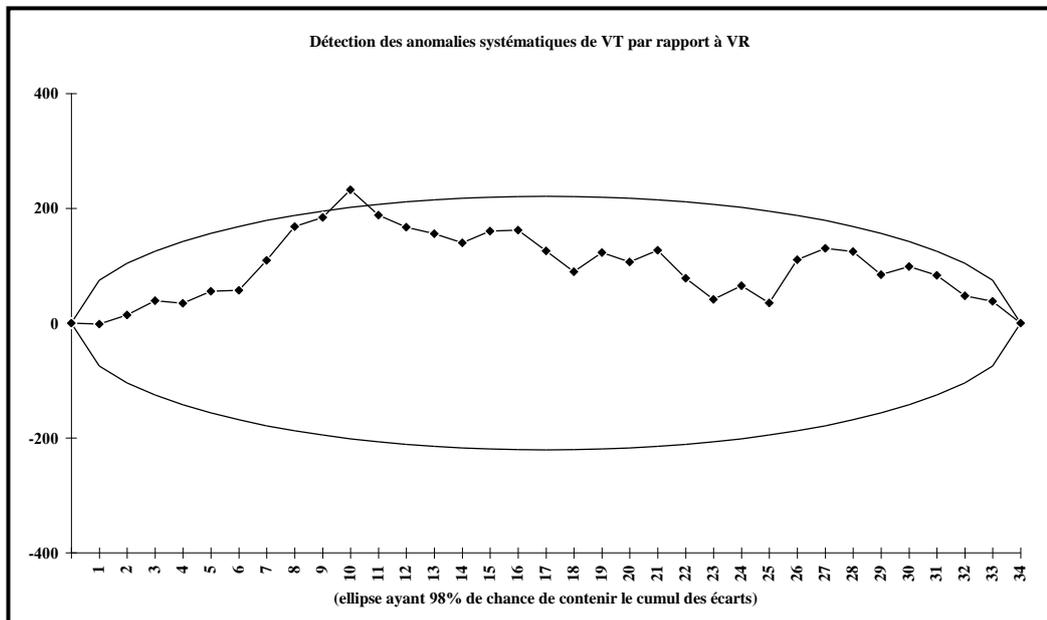
$$\sigma_{Z_i} = \sigma_{\varepsilon} \sqrt{\frac{i(n-i)}{n-1}} \quad (4.8)$$

Où n est le nombre d'observations et  $\sigma_{\varepsilon}$  est exprimé selon l'équation 4.9:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sigma_y \sqrt{1-r^2} \quad (4.9)$$

Où  $\sigma_y$  est l'écart type de la variable à tester et r est le coefficient de corrélation des deux séries étudiées.

Sur un graphique (Figure 4.5), nous portons en ordonnées les cumuls des résidus ( $Z_i$ ) et les bornes supérieures et inférieures de leurs intervalles de confiance. Ces deux dernières forment une ellipse. L'écart cumulé qui sort de l'ellipse est considérée comme valeur aberrante. Nous devons ensuite comparer cette dernière avec les autres colonnes de la matrice pour soit l'écarter soit la valider (valeur exceptionnelle).



**Figure 4.5:** Exemple de détection des valeurs aberrantes par la méthode des résidus cumulés

Dans le cadre de ce travail, des matrices sont formées où sont classées en colonnes les valeurs mensuelles. Chaque colonne contenant les valeurs d'un mois donné d'une station donnée, tandis que les lignes contiennent les valeurs des différentes stations. Ainsi, douze matrices sont formées pour chaque groupe présentant chacune les valeurs d'un mois précis. Une station de référence (supposée avoir des valeurs correctes) est désignée pour chaque groupe. Chaque couple de ces matrices est soumis à la détection des valeurs aberrantes.

Sur le plan topographique, il est nécessaire de séparer les stations en petits groupes se trouvant dans la même région et ayant (probablement) presque les mêmes conditions topographiques. Nous avons remarqué que l'ANRH a déjà fait ce travail et les quatre premiers chiffres du code de chaque station montre son appartenance à un sous bassin donné. En se basant sur le critère de l'ANRH, nous avons créé sept groupes (Tableau 4.2). Les premières stations de chaque groupe (en gras) sont considérées comme stations de références de leurs groupes.

**Tableau 4.2** Groupes de stations formées

<b>Référence groupe</b>	<b>Stations</b>
1102	<b>Sid Ali Ben Youb</b> Et El Hacaiba.
1103	<b>Sidi Bel Abbes</b> , Sarno Bge, Hassi Daho, Mostefa Ben Brahim Et Ain Trid.
1111	<b>Hammam Rabi</b> , Meftah Sidi Boubekeur Et Ain El Hadjar.
1112	<b>Ain Tifrit</b> , Oued Taria, Tamesna Et Beniane.
1114	<b>Matemore</b> , Maoussa, Froha, Tizi, Sidi Kada, Ain Fares, Nesmoth Mf, Ghris Et Mascara.
1115	<b>Bou Hanifia Bge</b> , Sahouet Ouizert, Sfissef, Hacine, Mohammadia Grha Et Trois Rivieres.
1116	<b>Fornaka</b> , Oggaz, Bou Henni, Samouria, Mocta Douz, Ferme Blanche (S.Abdelmoumen), Bled Taouria, Marais De Sirat Et Ferme Assorain.

Les stations de chaque groupe ont été soumises à la détection des valeurs aberrantes. La Figure 4.6 présente un exemple choisi de chaque groupe pour un mois donné.

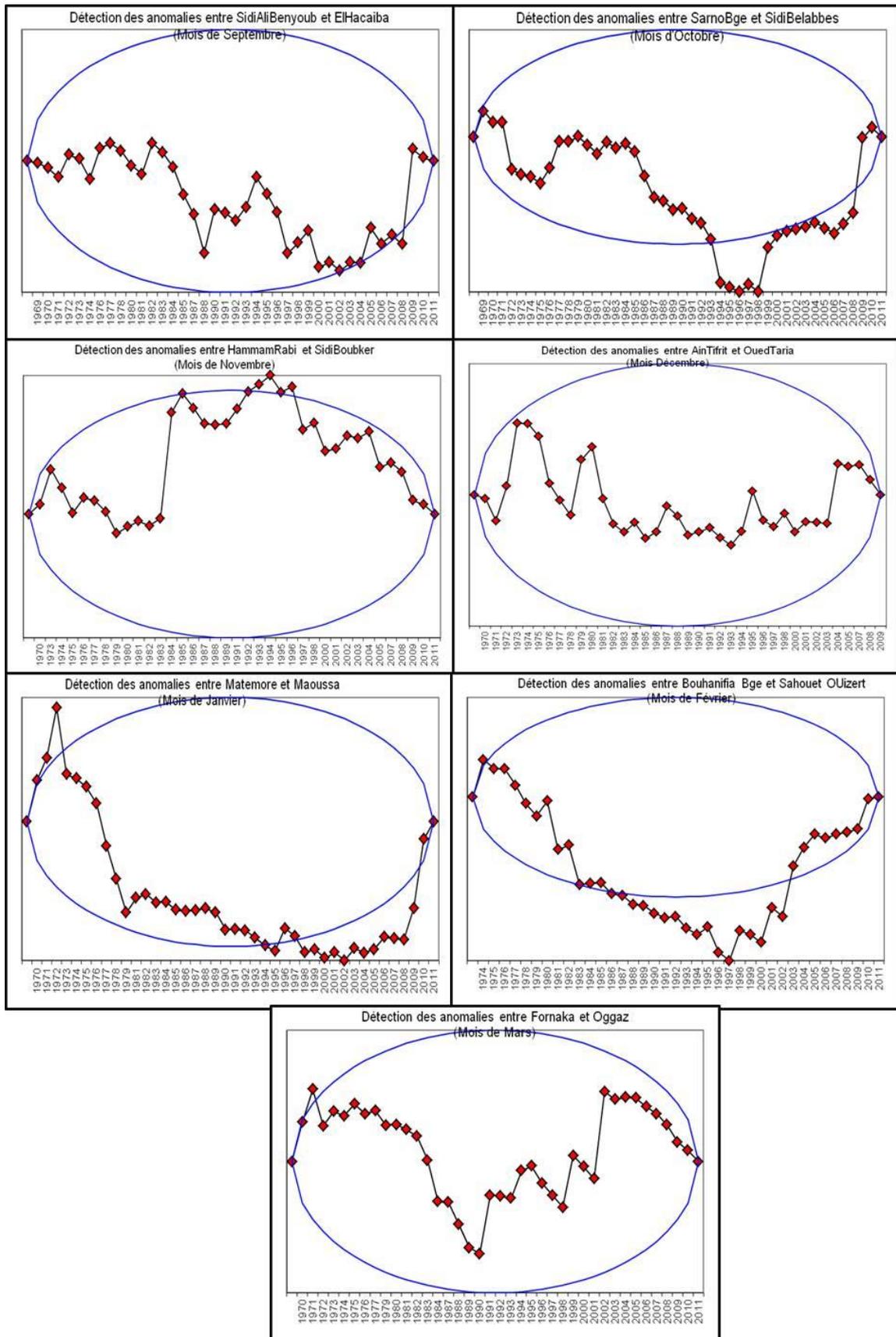


Figure 4.6: Exemple de détection des anomalies

Finalement, les valeurs aberrantes considérées comme très probablement erronées seront éliminées et nous pouvons passer à l'estimation des données manquantes.

#### **4.3.5 Estimation des données manquantes**

Lors de la préparation des données en vue d'une étude, on trouve souvent des relevés incomplets. Afin de combler les lacunes d'une série chronologique ou d'une carte, et ainsi utiliser des relevés partiels, les parties manquantes de relevés peuvent être estimées par différentes méthodes. Il faut faire preuve de jugement pour décider jusqu'où on peut aller dans l'estimation des données manquantes. Il est rarement justifié de reconstituer plus de cinq à 10 pour cent d'un relevé (OMM, 1990).

Nos séries pluviométriques contiennent des lacunes qui sont dues généralement à des facteurs de dérangement ou à l'absence plus ou moins longue de l'observateur. Il existe plusieurs méthodes pour estimer les données manquantes. Nous présentons les plus utilisées et les plus connues.

##### **4.3.5.1. Méthodes de comblement des lacunes**

L'idée fondamentale des méthodes d'estimation des données manquantes, est de trouver des valeurs numériques à insérer dans la table à la place des données manquantes. Après avoir inséré ces estimations, l'analyse des données se poursuit presque comme si aucune valeur n'était manquante (Preece, 1976).

Généralement la méthode de régression simple est utilisée pour remplacer les données manquantes d'une station par les données d'une autre plus complète, des fois nous sommes amenés à utiliser la méthode de régression multiple, si la majorité des stations présentent des données manquantes. Laborde (2013) utilise l'analyse en composante principale pour reconstituer les lacunes.

##### **4.3.5.1.1. Méthode de régression simple**

Le but de la méthode de régression simple consiste à estimer les variables inconnues de certaines stations à partir des observations d'autres stations voisines prises pour bases (Halimi, 1980). Pour combler les lacunes et extrapoler les séries discontinues, à l'échelle annuelle aussi bien qu'à l'échelle mensuelle, le modèle de régression linéaire est estimé par la méthode des moindres carrés afin de calculer une droite s'ajustant au plus près des données. Les paramètres de la droite de régression (a et b) sont estimés par les formules suivantes.

$$Y_i = ax_i + b \quad (4.10)$$

Avec

$$a = \frac{COV(XY)}{Var(x)} \quad (4.11)$$

Et

$$b = \bar{Y} - a\bar{X} \quad (4.12)$$

Le coefficient de corrélation joue un rôle important dans la mesure de l'association entre les variables X et Y (Droesbeke, 1988).

#### 4.3.5.1.2. Méthode de régression multiple

La régression multilinéaire est une méthode statistique ayant pour objectif de reconstruire une variable aléatoire Y que l'on appelle variable à expliquer à l'aide d'une fonction F de variables aléatoires  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  que l'on appelle variables explicatives.

Pour que cette méthode soit efficace, il faut que trois conditions soient vérifiées :

- La linéarité de la régression.
- Le coefficient de corrélation assez élevé.
- L'ajustement à la loi normale des résidus.

L'estimation des valeurs manquantes (variable à expliquer) Y à partir des valeurs  $X_i$  (variables explicatives) s'effectue avec l'hyper-plan de régression qui a la forme :

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$$

$a_i$  : Coefficient de l'hyper-plan de régression.

Y : Variable à expliquer.

$x_i$  : Variables explicatives.

n : Nombre de variables explicatives.

L'écart, d'un point particulier, entre la valeur observée et la valeur estimée de la variable explicative est appelé résidu. Pour que l'estimation soit meilleure, il faut minimiser la dispersion des résidus.

#### 4.3.5.1.3. Méthode de l'analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composante principale (ACP) peut être présentée comme la recherche du sous-espace qui minimise l'erreur de reconstitution d'une matrice X de dimensions I x J, c'est à dire la distance entre les individus et leur projection. Minimiser l'erreur de reconstitution revient à

chercher une matrice de rang inférieur  $K$  ( $K < J$ ) qui approche au mieux la matrice  $X$  au sens des moindres carrées. Ceci équivaut à chercher deux matrices  $F_{I \times K}$  et  $U_{J \times K}$  qui minimisent le critère suivant :

$$F = \|X - Fu\|^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (x_{ij} - \sum_{k=1}^K F_{ik} u_{jk})^2 \quad (4.13)$$

Classiquement, l'ACP est réalisée par décomposition en valeurs singulières de la matrice  $X$  mais il existe d'autres alternatives fondées sur des algorithmes itératifs.

Une solution classique pour gérer les données manquantes en ACP consiste à introduire, dans le critère à minimiser (équation 4.13), une matrice de poids  $W$  telle que  $w_{ij} = 0$  si  $x_{ij}$  est manquant. Dans le cas contraire  $w_{ij} = 1$ .

$$F = \|W * (X - Fu')\|^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (w_{ij} x_{ij} - \sum_{k=1}^K F_{ik} w_{ij} u_{jk})^2 \quad (4.14)$$

Kiers (1997) a montré qu'il était possible de minimiser le critère (4.14) par la procédure suivante :

1. initialisation  $l = 0$  :  $X^0$  est obtenu en remplaçant les valeurs manquantes par une valeur initiale, comme par exemple la moyenne de chaque variable
2. itération  $l$  :
  - a) recherche de  $(F^l, u^l)$  qui diminuent ou minimisent le critère  $\|X^{l-1} - Fu\|^2$ ;  $K$  dimensions sont retenues
  - b)  $X^l$  est obtenu en remplaçant les valeurs manquantes de  $X$  par les valeurs reconstituées  $\hat{X}^l = \hat{F}^l \hat{u}^l$ . Le nouveau tableau complété peut ainsi s'écrire  $X^l = W * X + (1 - W) * \hat{X}^l$
3. les étapes (a) et (b) sont répétées jusqu'à convergence

Cette procédure consiste ainsi à effectuer des ACP de façon itérative sur des tableaux de données complétées.

Les données manquantes de nos séries pluviométriques sont estimées à l'aide de la macro-commande «Bouche trou» de l'Hydrolab (Hydrolab, 2010). Cette dernière utilise l'ACP. Selon Laborde (2013), sept à huit itérations sont suffisantes pour stabiliser le processus. A ce stade, les données sont complètes et prêtes pour l'analyse suivante. Le Tableau 4.3 montre un exemple de l'opération d'estimation des données manquantes du mois de septembre de la station Mostefa Ben Brahim. Les lacunes de cette station ont été estimées par la station de référence de Sidi Belabbes.

Ainsi, la valeur du mois de septembre de l'année 1972 était manquante et a été reconstituée par la valeur 16.9mm. De même pour les années 1984 et 1988 qui ont été reconstituées respectivement par 12.2 et 19.4mm.

**Tableau 4.3** : Exemple de reconstitution des données manquantes  
(Station Mostefa Ben Brahim, mois de septembre)

Année	Avant reconstitution	Après reconstitution
1969	0.0	0.0
1970	7.3	7.2
1971	12.6	12.5
1972	Lac	16.9
1973	20.8	20.8
1974	6.5	6.5
1975	0.0	0.0
1976	33.6	33.6
1977	0.0	0.0
1978	0.0	0.0
1979	23.5	23.5
1980	11.0	11.0
1981	2.9	2.9
1982	5.0	5.0
1983	0.0	0.0
1984	Lac	12.2
1985	0.0	0.0
1986	49.8	49.8
1987	25.0	25.0
1988	Lac	19.4
1989	2.0	2.0
1990	0.0	0.0
1991	0.3	0.3
1992	0.0	0.0
1993	0.0	0.0
1994	47.0	47.0
1995	17.7	17.7
1996	6.0	6.0
1997	40.8	40.8
1998	1.5	1.5
1999	53.1	53.1
2000	13.0	13.0
2001	32.6	32.6
2002	0.0	0.0
2003	0.0	0.0
2004	0.0	0.0
2005	17.0	17.0
2006	0.0	0.0
2007	28.0	28.0
2008	6.9	6.9
2009	38.5	38.5
2010	10.0	10.0
2011	Lac	6.2

#### 4.4. Période de retour

On se propose de vérifier si le changement climatique a eu un effet sur la période de retour d'une pluie donnée. Pour cela, nous avons utilisé deux périodes (1970 à 1991 et 1992-2011). Nous estimons, pour chaque période et pour chaque station, les valeurs de la pluviométrie correspondantes aux périodes de retour 10, 100 et 1000 ans. Le Tableau 4.4 présente un exemple de cette estimation pour le mois de janvier.

**Tableau 4.4** Estimation des valeurs de la pluviométrie pour différentes périodes de retour (Mois de janvier)

Nom Station	1970-1991			1992-2011		
	10 ans	100 ans	1000 ans	10 ans	100 ans	1000 ans
Ras Elma	32.9	58.4	81.8	44.6	79.1	110.4
Sid Ali Benyoub	91.7	160.3	222.5	96.7	169.3	235.1
El Hacaiba	59.7	101.3	138.7	72.6	130.3	183.1
Sarno Bge	106.5	170.5	226.7	90.2	153.2	209.8
Sidi Bel Abbes	81.3	131.2	175.3	90.3	153.9	210.9
Hassi Daho	78.6	134.2	184.1	101.3	175.7	242.9
Mostefa Ben Brahim	98.9	169.6	233.3	87.6	154.9	216.3
Ain Trid	121.2	185.9	242.0	109.9	190.4	263.2
Cheurfas Bge	82.3	131.4	174.6	81.3	139.0	190.8
Merine	72.1	125.3	173.3	86.4	154.7	217.1
Daoud Youb	47.2	76.5	102.3	71.2	128.3	180.6
Meftah Sidi Boubekeur	73.4	123.8	169.0	74.1	129.4	179.6
Ain El Hadjar	87.5	142.4	191.1	107.6	191.6	268.3
Hammam Rabi	64.2	114.1	159.6	79.0	140.7	197.0
Oued Taria	83.0	148.2	207.7	70.0	120.4	165.8
Ain Tifrit	108.6	180.7	245.0	85.5	151.6	211.7
Tamesna	85.1	144.0	196.9	99.5	179.7	253.2
Beniane	79.6	141.4	197.8	122.9	220.6	310.1
Maoussa	77.9	130.8	178.1	85.1	150.4	209.8
Froha	72.7	119.8	161.7	74.4	128.5	177.3
Matemore	83.2	136.0	182.8	69.4	120.9	167.6
Tizi	101.7	170.3	231.6	92.6	161.4	223.6
Sidi Kada	85.0	132.1	173.1	96.9	172.5	241.5
Ain Fares	101.0	175.5	242.9	130.9	222.2	304.1
Nesmoth Mf	143.0	244.5	335.7	159.6	281.8	393.0
Ghris	89.4	154.6	213.6	66.9	114.3	156.9
Mascara	87.3	149.1	204.7	93.9	161.2	221.9
Sahouet Ouizert	56.1	90.8	121.5	55.5	97.1	134.9
Bou Hanifia Bge	70.2	122.0	168.8	61.2	105.7	145.8
Sfissef	95.5	157.2	212.0	91.3	168.4	239.6
Hacine	74.5	125.4	170.9	85.8	152.7	213.7
Mohammadia Grha	79.7	132.0	178.6	70.4	118.6	161.7
Trois Rivieres	51.3	98.9	143.5	52.0	91.6	127.7
Oggaz	79.4	134.9	184.6	57.8	100.8	139.8
Bou Henni	62.3	110.5	154.5	57.8	99.1	136.4
Fornaka	70.9	117.1	158.3	62.1	103.5	140.5
Samouria	79.7	137.7	190.0	77.2	135.8	189.0
Mocta Douz	75.1	135.3	190.5	79.4	132.4	179.6
Ferme Blanche	75.2	123.6	166.6	68.0	112.7	152.6
Bled Taouria	88.4	145.3	195.7	94.0	161.3	222.0
Marais De Sirat	89.7	154.1	212.1	82.1	145.6	203.5
Ferme Assorain	98.7	160.7	215.6	79.8	138.9	192.4

Nous avons calculés les proportions des différences entre les valeurs estimées des deux périodes et les valeurs estimées de la première période (Tableau 4.5). Les proportions positives (négatives) montrent une augmentation (diminution) des valeurs estimées pour une période de retour données.

**Tableau 4.5** Proportion des valeurs estimées (période1/période2) pour chaque période de retour (mois de Janvier)

Nom Station	Proportion période1/période2		
	10 ans	100 ans	1000 ans
Ras Elma	0.4	0.4	0.4
Sid Ali Benyoub	0.1	0.1	0.1
El Hacaiba	0.2	0.3	0.3
Sarno Bge	-0.2	-0.1	-0.1
Sidi Bel Abbas	0.1	0.2	0.2
Hassi Daho	0.3	0.3	0.3
Mostefa Ben Brahim	-0.1	-0.1	-0.1
Ain Trid	-0.1	0.0	0.1
Cheurfas Bge	0.0	0.1	0.1
Merine	0.2	0.2	0.3
Daoud Youb	0.5	0.7	0.8
Meftah Sidi Boubekeur	0.0	0.0	0.1
Ain El Hadjar	0.2	0.3	0.4
Hammam Rabi	0.2	0.2	0.2
Oued Taria	-0.2	-0.2	-0.2
Ain Tifrit	-0.2	-0.2	-0.1
Tamesna	0.2	0.2	0.3
Beniane	0.5	0.6	0.6
Maoussa	0.1	0.1	0.2
Froha	0.0	0.1	0.1
Matemore	-0.2	-0.1	-0.1
Tizi	-0.1	-0.1	0.0
Sidi Kada	0.1	0.3	0.4
Ain Fares	0.3	0.3	0.3
Nesmoth Mf	0.1	0.2	0.2
Ghris	-0.3	-0.3	-0.3
Mascara	0.1	0.1	0.1
Sahouet Ouizert	0.0	0.1	0.1
Bou Hanifia Bge	-0.1	-0.1	-0.1
Sfissef	0.0	0.1	0.1
Hacine	0.2	0.2	0.2
Mohammadia Grha	-0.1	-0.1	-0.1
Trois Rivieres	0.0	-0.1	-0.1
Oggaz	-0.3	-0.3	-0.2
Bou Henni	-0.1	-0.1	-0.1
Fornaka	-0.1	-0.1	-0.1
Samouria	0.0	0.0	0.0
Mocta Douz	0.1	0.0	-0.1
Ferme Blanche	-0.1	-0.1	-0.1
Bled Taouria	0.1	0.1	0.1
Marais De Sirat	-0.1	-0.1	0.0
Ferme Assorain	-0.2	-0.1	-0.1

La Figure 4.7 illustre des représentations graphiques des proportions pour les douze mois de l'année. Chaque période de retour est représentée par une couleur spécifique.

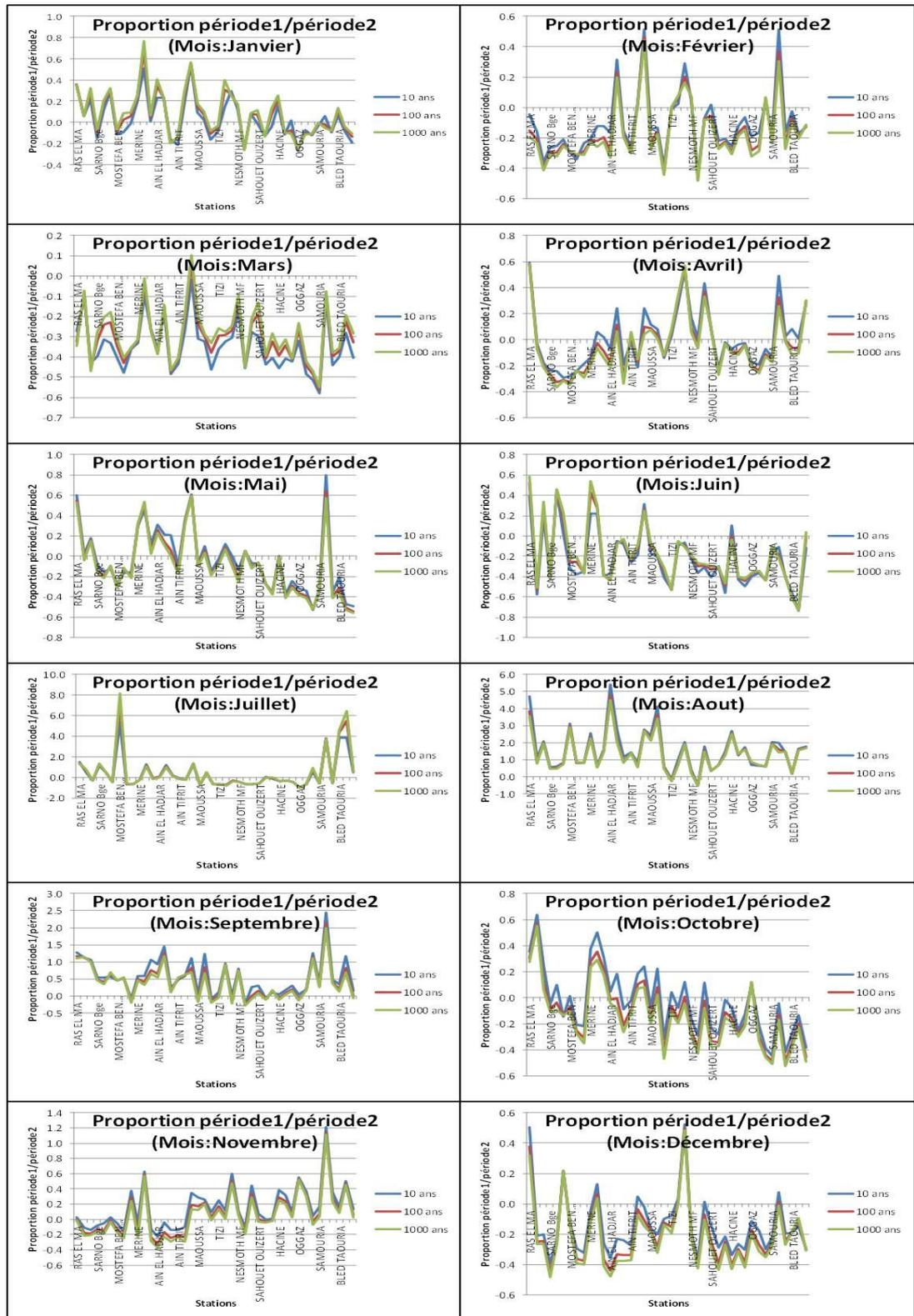
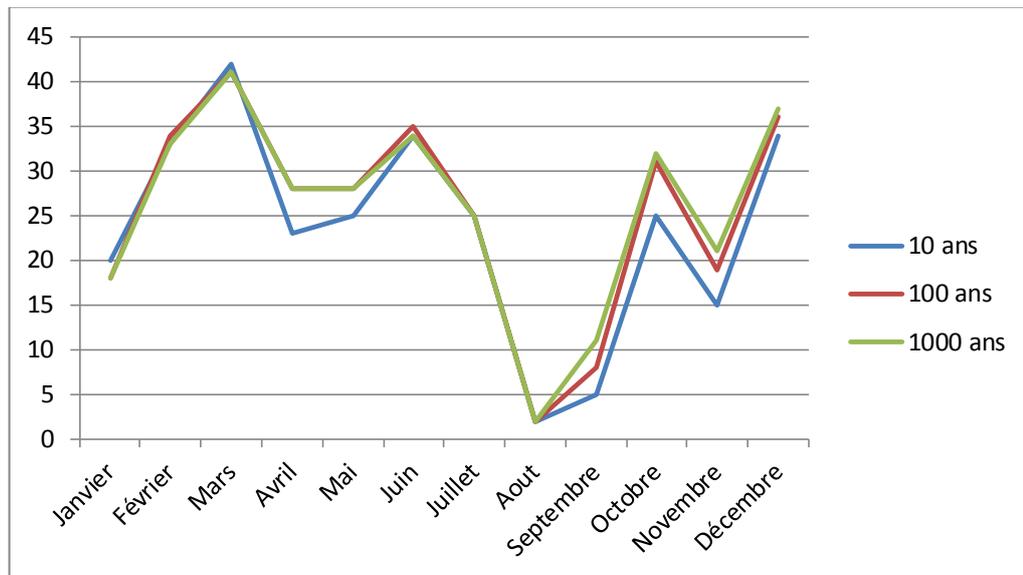


Figure 4.7: Proportions entre valeurs période de retour de la période 1970-1991 et 1992-2011

La Figure 4.7 ne permet pas globalement de préciser la nature d'un éventuel changement. Pour cela, nous avons dénombré, pour chaque mois, le nombre de stations ayant une proportion inférieur à zéro. Ces comptages sont présentés sur la Figure 4.8.



**Figure 4.8:** Nombre de stations ayant des proportions négatives

La Figure 4.8 met le point sur le mois de mars. Puisque toutes les stations ont des valeurs de la pluviométrie de la deuxième période (1992-2011) inférieure à la première (1970-1991). La majorité des stations ont des proportions négatives pour les mois de février, juin et décembre. Par contre, la presque totalité des stations ont des proportions positives pour le mois d'aout. Ceci peut se traduire par une diminution des hauteurs des précipitations prévue pour le mois de mars, février et juin. Cependant, les hauteurs des précipitations attendues pour le mois d'aout auront une augmentation pour les trois périodes de retour.

#### 4.5. Conclusion

A travers le présent chapitre nous avons pu collecter et traiter les données de la pluviométrie mensuelle. 42 stations sont choisies pour une période d'étude de 1970 à 2011. L'ajustement à loi Racine Normale est vérifié. Après avoir supprimé les valeurs aberrantes par la méthode des cumuls des résidus, nous avons estimé les données manquantes par la méthode de l'analyse en composante principale pour former ainsi des séries pluviométriques continues. Chaque série, pour une station donnée et un mois donné, a été divisé en deux périodes (1970-1991 et 1992-2011). L'estimation des valeurs de la pluviométrie pour des périodes de retour 10 ans, 100 ans et 1000 ans a été faite pour chaque station, chaque mois et chaque période. La comparaison entre les valeurs estimées a mis en évidence le mois de mars où toutes les stations ont des valeurs de la pluviométrie estimée de la deuxième période inférieure à celles de la première.

## V. Chapitre 5 : Etude de l'évolution de la pluviométrie (tendances)

### 5.1. Introduction

Le domaine de l'eau est le premier à subir les impacts du changement climatique. Le paramètre qui semble plus jouer un rôle important concernant le volet offre est la modification des précipitations. La température semblerait plus influencer la demande.

Les ressources en eau sont de première importance et leurs demandes à l'avenir augmentent de façon constante. Les changements climatiques et l'utilisation des terres peuvent causer des effets de réduction des précipitations dans de nombreux pays tels que l'Algérie. La demande de l'eau supplémentaire due à l'augmentation de la population peut aggraver le problème. Pour ces raisons, la connaissance de la tendance du changement (que ce soit de manière croissante ou décroissante) est primordiale pour toute gestion et planification des ressources en eau pour soutenir les possibilités d'échanges d'eau et d'aliment dans un contexte de développement durable d'une société.

Les éléments les plus importants dans une série de précipitation temporelle sont les variations saisonnières et systématiques à l'écart de la composante stochastique. La saisonnalité est une composante beaucoup plus connue selon l'emplacement de la zone d'étude et les caractéristiques climatologiques, mais la composante tendancielle a besoin de soins supplémentaires pour son identification (Elouissi et al., 2016). Durant les trois dernières décennies, le nombre de recherche sur les tendances dans la littérature est de plus en plus élevé. La plupart des œuvres sont basées sur l'approche de Mann-Kendal (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) pour l'identification des tendances et sa détermination.

Fatichi et al. (2013) a déclaré qu'en raison de l'impact des changements climatiques, l'identification, la détection et l'évaluation des tendances sont devenus des sujets importants dans les différentes disciplines. Les chercheurs de diverses disciplines ont obtenu des informations importantes sur la détection, l'identification et les questions d'évaluation des tendances (Gupta 2007; Novotny and Stefan 2007; Douglas and Fairbank 2011; Ehsanzadeh et al., 2011; Bao et al., 2012; Wagesho et al. 2012; Lorenzo-Lacruz et al., 2012; Sharif et al., 2012; Larsen, et al. 2013; Garbrecht et al., 2004 ; Haktanir and Citakoglu, 2014; Haan et al., 2014).

Dans un contexte de paramètres climatiques modifiés il apparaît nécessaire d'étudier la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie et de quantifier les changements observés. Le but de ce chapitre est de détecter les tendances de la pluviométrie au niveau mensuel, saisonnier et annuel. L'étude de la géographie précise des changements, tels que la frontière de l'augmentation ou de la

diminution des précipitations est très importante. L'élaboration de cartes aiderait à donner un aperçu spatial de ce changement.

Trois mesures de corrélation sont d'usage courant. Le tau de Kendall, rho de Spearman, et r de Pearson. Les deux premiers sont basés sur les rangs, et mesure toutes les relations monotones. Ils sont également résistants aux effets des valeurs aberrantes. r de Pearson, le plus couramment utilisé, est une mesure de corrélation linéaire, un type spécifique de corrélation monotone. Dans notre travail, le temps est la variable explicative.

## 5.2. Etude de la tendance (Coefficient de corrélation de Bravais-Pearson)

### 5.2.1. Introduction

L'application de la méthode de régression linéaire suppose la normalité des distributions. Cela a été vérifié au niveau du chapitre 3 où nous avons présenté des courbes d'ajustement à la loi racine normale. Dans une étude de tendance avec une loi linéaire, le test d'hypothèse le plus important est de savoir si le coefficient de corrélation (ou de pente) est significativement différent de zéro. Cette méthode est sensible à la présence de valeurs aberrantes (Helsel and Hirsch, 2002).

Le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson permet de détecter la présence ou l'absence d'une relation linéaire entre deux caractères quantitatifs continus. Dans ce qui suit, l'hypothèse d'une relation linéaire entre la pluviométrie et le temps a été supposée.

### 5.2.2. Méthodologie

Pour calculer Le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson il faut tout d'abord calculer la covariance. La covariance est la moyenne du produit des écarts à la moyenne. L'objectif de la covariance est de quantifier la liaison entre deux variables X et Y, de manière à mettre en évidence le sens de la liaison et son intensité. La covariance est la moyenne du produit des écarts à la moyenne. Elle est calculée par l'équation (5.1)

$$COV(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{N} \quad (5.1)$$

L'équation (5.1) est un estimateur biaisé de la covariance. L'estimateur sans biais de la covariance s'écrit par conséquent :

$$COV(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{N - 1} \quad (5.2)$$

Le coefficient de corrélation linéaire de deux caractères X et Y (noté r) est égal à la covariance de X et Y divisée par le produit des écarts-types de X et Y (équation 5.3).

$$r(X, Y) = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (5.3)$$

Ce coefficient varie entre -1 et +1. Son interprétation est la suivante :

- si r est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre X et Y.
- si r est proche de -1, il existe une forte relation linéaire négative entre X et Y.
- si r est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive entre X et Y.

Le signe de r indique donc le sens de la relation tandis que la valeur absolue de r révèle l'intensité de la relation c'est-à-dire la capacité à prédire les valeurs de Y en fonctions de celles de X.

### 5.2.3. Résultats et discussion

#### 5.2.3.1. Etude de la tendance mensuelle

Pour détecter un changement dans la variabilité de nos données, nous avons trié ces dernières par mois pour chaque station. Ainsi nous avons formé 504 (12\*42) tableaux présentant les 12 mois pour nos 42 stations. Le Tableau 5.1 est un exemple des tableaux formés.

**Tableau 5.1 :** Pluviométrie mensuelle des stations retenues du mois de septembre

	Code	110102	110201	110203	....	111612	111616	111617
<b>Année</b>	<b>Mois</b>							
1969	<b>Septembre</b>	10.8	10.8	11.8		20.9	14.6	21.6
1970	<b>Septembre</b>	34.0	5.8	5.8		163.3	106.9	149.9
1971	<b>Septembre</b>	49.9	33.4	23.2		89.0	14.0	87.0
1972	<b>Septembre</b>	19.3	24.3	35.7		78.2	50.5	126.5
2008	<b>Septembre</b>	67.3	70.8	49.3		16.6	21.2	22.7
2009	<b>Septembre</b>	117.1	77.6	117		3.0	1.8	2.7
2011	<b>Septembre</b>	0.0	0.0	2.8		0.0	6.0	7.7

Pour chaque tableau ainsi formé, nous avons construit une courbe représentant la pluviométrie mensuelle d'un mois et d'une station. Une droite de tendance (avec l'équation de régression linéaire) a été ajoutée à chaque courbe. Nous avons réalisé 504 courbes. Du fait du nombre important des courbes nous présentons seulement quelques stations pour différents mois (Figure 5.1).

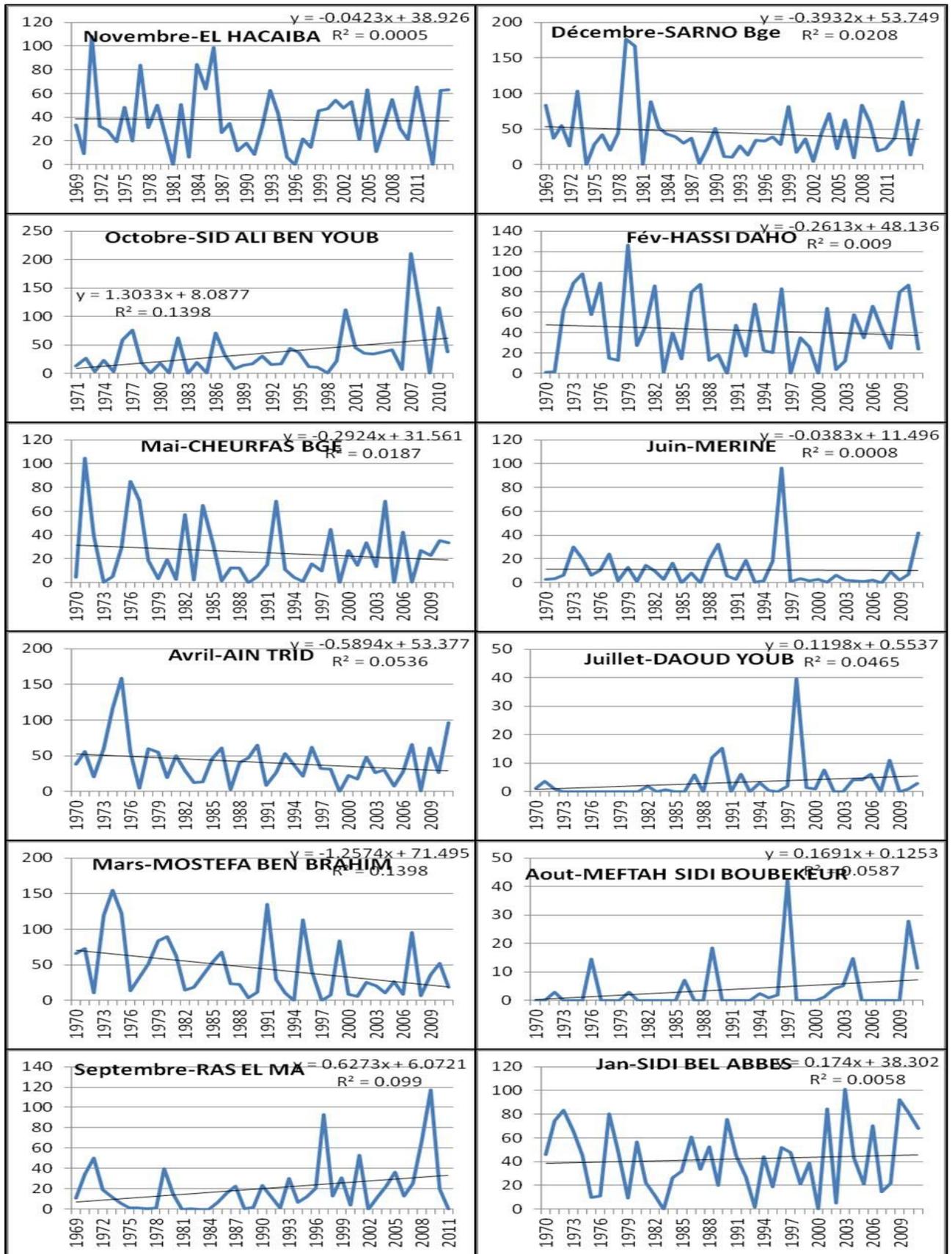


Figure 5.1 : Exemple des Courbes de la pluviométrie mensuelle avec leurs droites de tendances

Bien que la pluviométrie est une variable aléatoire mais ceci n'empêche pas la possibilité de l'existence d'une tendance générale des séries. En analysant les courbes de tendance nous

remarquons des stations, et des mois, ayant des tendances positives ou négatives. Bien sûr, certaines peuvent ne pas avoir de tendance perceptible. Puisque la valeur et le signe de la pente de chaque courbe représentent la tendance de la droite de régression, nous allons nous intéresser à ces dernières. La valeur du coefficient de corrélation permet d'apprécier la significativité de la relation. Cependant, le calcul d'un coefficient de corrélation ne constitue qu'une première étape dans l'analyse de la relation entre deux caractères. Il s'agit tout au plus d'une étape exploratoire qui doit être validée par un test de la significativité de la relation. Les coefficients de corrélation de Pearson ou de Spearman ne renseignent pas sur le degré de significativité d'une relation car celle-ci dépend également du nombre d'observation (Un  $r$  de +0.6 établi sur un échantillon de 10 individus n'est pas significatif au seuil de 5% "il peut s'agir d'un hasard", par contre un  $r$  de +0.2 établi sur un échantillon de 200 individus est significatif au seuil de 5% "la taille de l'échantillon fait que la relation, bien que faible a peu de chances d'être due au hasard") (Rakotomalala, 2015).

Pour déterminer si une relation est significative, il faut procéder à un test d'hypothèse bilatéral ( $H_0: r=0$  Vs  $H_1: r \neq 0$ ) ou unilatéral ( $H_1: r < 0$  ou  $H_1: r > 0$ ). La Statistique du test est calculée par la formule :

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \tag{5.4}$$

La région critique (rejet de l'hypothèse nulle) d'un test unilatéral au risque  $\alpha$  s'écrit :

$$|t| > t_{1-\alpha}(n-2) \tag{5.5}$$

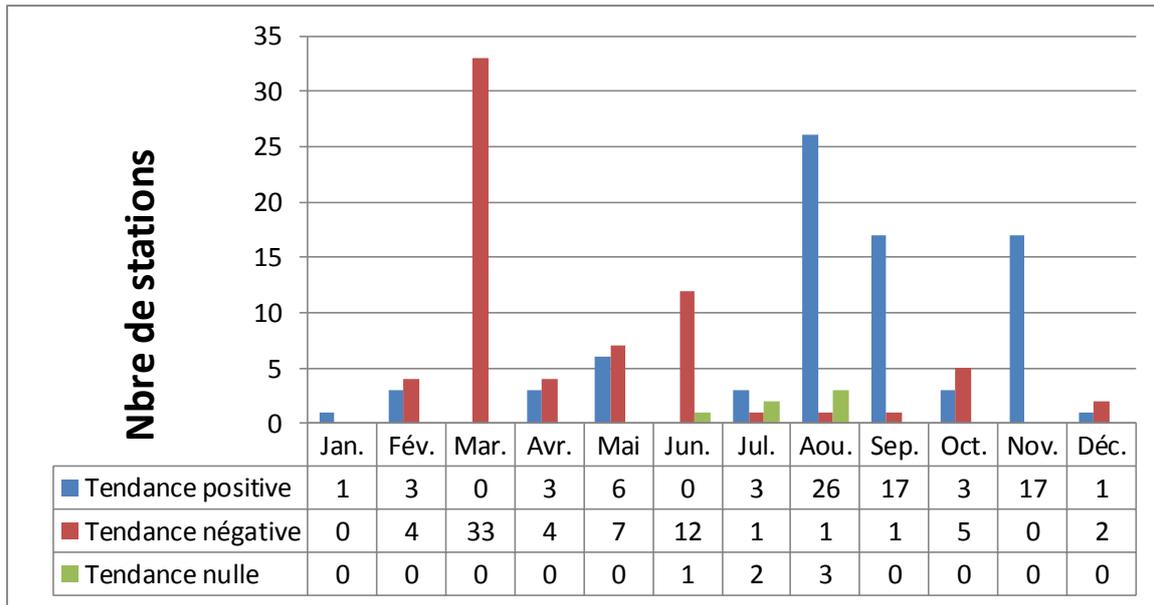
Pour chaque mois et chaque station, nous avons déterminé si son coefficient de corrélation ( $r$ ) est significatif ou non (au seuil  $\alpha=0.10$  pour un test unilatéral.).

Dans le but de marquer la tendance de chaque station (pour un mois donné), nous avons utilisé les symboles +, -, 0 et "AUCUNE" pour désigner respectivement une tendance croissante, décroissante, nulle ou absence de tendance. Le Tableau 5.2 représente les tendances de chaque mois pour chaque station.

**Tableau 5.2 : Symbole de la tendance mensuelle pour chaque station (r de Pearson)**

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
110102	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	+	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
110201	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	-	Aucune	+	+	+	Aucune	Aucune
110203	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	-	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
110304	Aucune	Aucune	-	Aucune								
110305	Aucune	Aucune	-	Aucune								
110309	Aucune	Aucune	-	-	Aucune							
110312	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
110314	Aucune	-	-	-	Aucune	Aucune	0	0	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
110402	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	Aucune
110501	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	+	Aucune	Aucune
110802	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	+	+	+	+	+	Aucune
111102	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune						
111103	Aucune	Aucune	-	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
111112	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
111201	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111204	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111210	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111217	+	+	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	+	Aucune
111401	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	Aucune
111402	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	+	Aucune
111405	Aucune	-	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune
111413	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune
111414	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
111417	Aucune	+	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	+
111418	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune							
111424	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	-
111429	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	+	Aucune
111502	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune
111503	Aucune	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune
111508	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111509	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	Aucune
111511	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	Aucune
111516	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	-	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111604	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	0	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune
111605	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune
111606	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	+	-	+	Aucune
111607	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	-	Aucune	Aucune
111610	Aucune	+	Aucune	+	+	Aucune	0	+	+	Aucune	+	Aucune
111611	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	Aucune	+	Aucune	-	+	Aucune
111612	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	-	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111616	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	Aucune	0	+	Aucune	+	Aucune
111617	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	Aucune	0	Aucune	Aucune	+	-

L'examen du Tableau 5.2 met en exergue le mois de mars où la plus part des tendances sont décroissantes. Cela montre que le mois de mars est le mois le plus touché par les changements climatiques. Le mois de juin présente aussi une la même tendance pour un nombre de stations non négligeable. Par contre la tendance du mois d'aout est majoritairement croissante. Pour avoir une vision plus claire, nous avons dénombré les stations ayant la même tendance pour chaque mois (Figure 5.2).

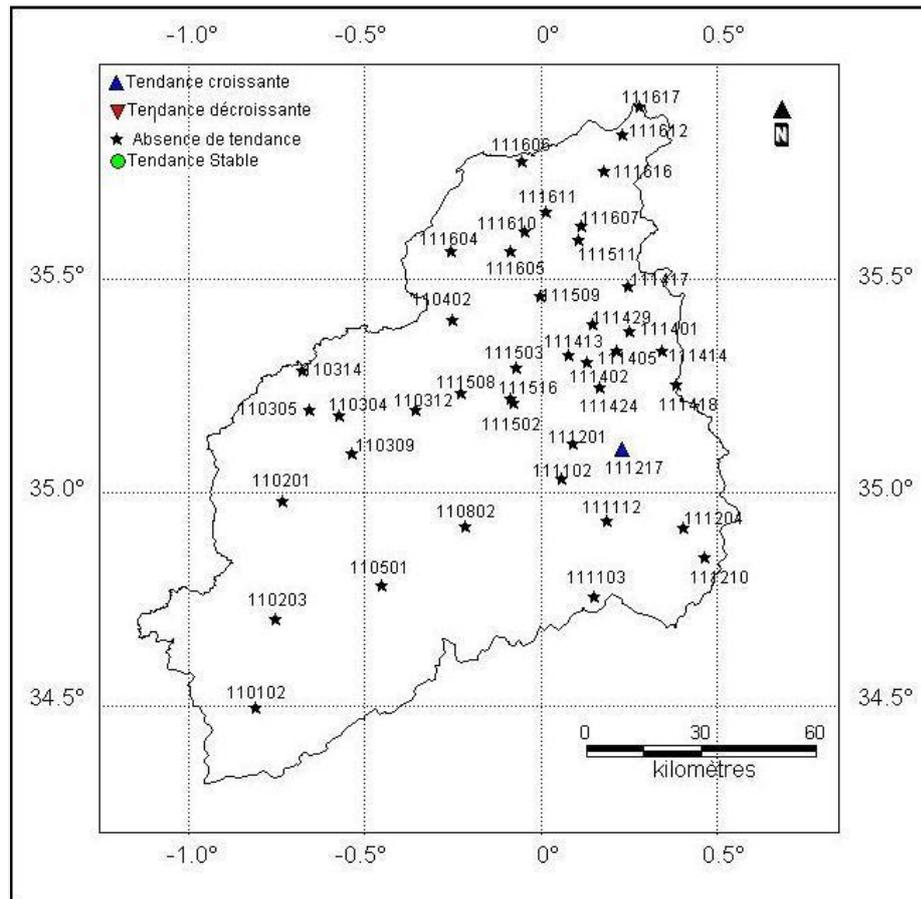


**Figure 5.2 :** Nombre de stations pour chaque type de tendance mensuelle ( $r$  de Pearson)

La Figure 5.2 montre clairement la tendance négative du mois de mars (79% des stations). Le mois de juin (29%) présente aussi un bon nombre de stations ayant cette tendance. Cependant, la tendance positive est perceptible au niveau des mois d'août (62%), septembre (41%) et novembre (41%).

Dans le but de donner une information plus claire et une vision spatiale des tendances perçues, des cartes visualisant nos stations pour les douze mois de l'année ont été établies (Figure 5.3 à Figure 5.14). Les symboles suivants sont utilisés:

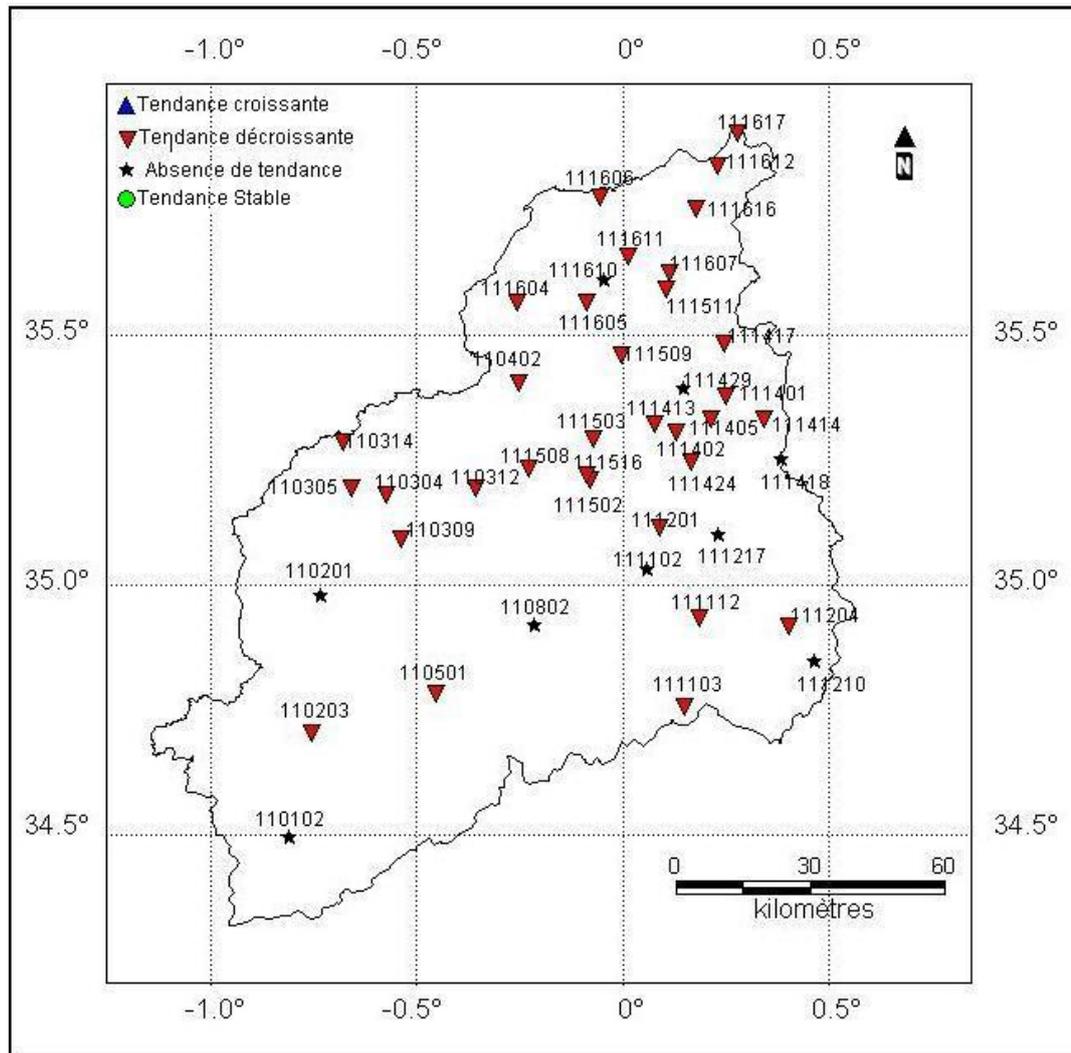
- ▲ Pour indiquer une tendance croissante.
- ▼ Pour indiquer une tendance décroissante.
- ★ Pour indiquer une absence de tendance.



**Figure 5.3 :** Carte des tendances du mois de janvier (r de Pearson)

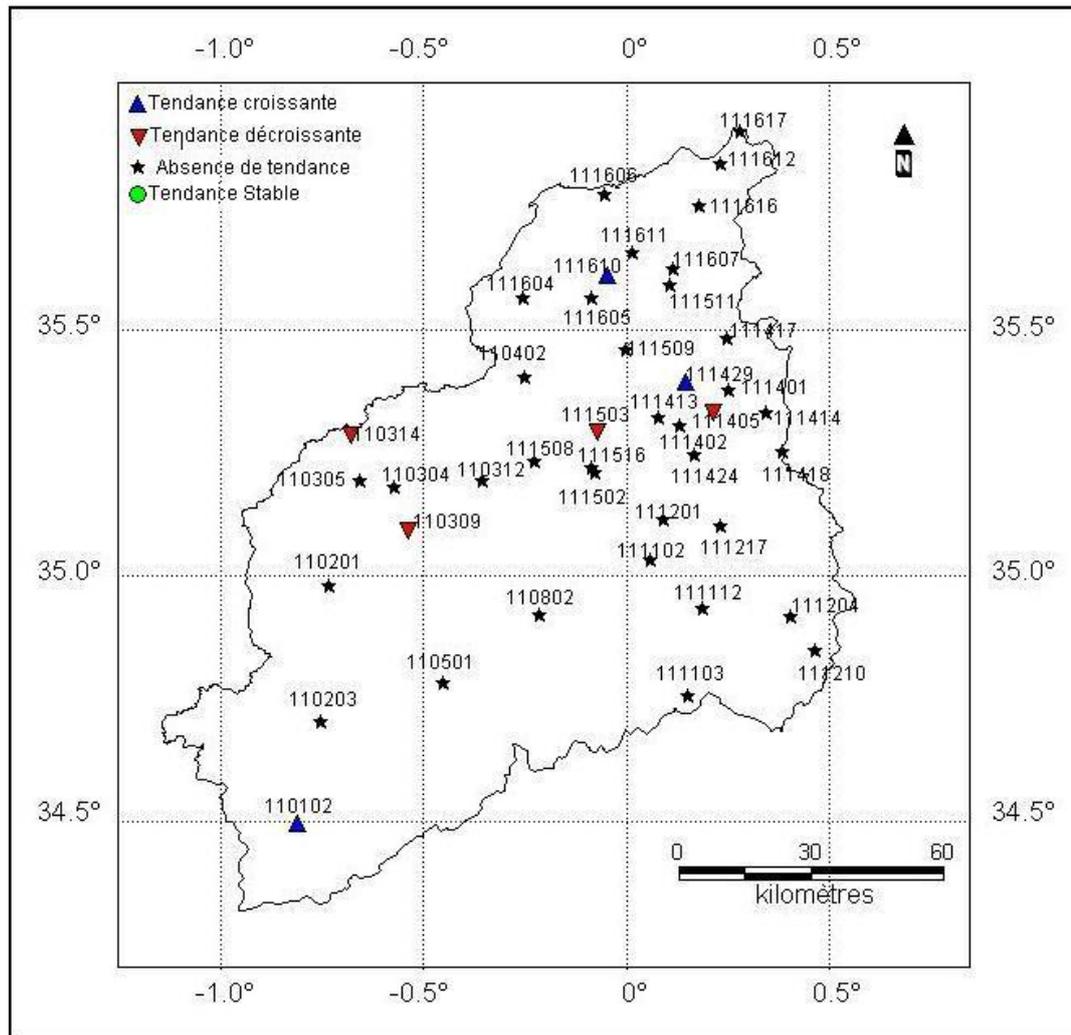
La Figure 5.3 montre une absence de tendance de toutes les stations à l'exception de la station de Hammam Rabi (111112). Cela montre la grande dispersion de la pluviométrie mensuelle du mois de janvier où on ne peut pas percevoir une tendance.





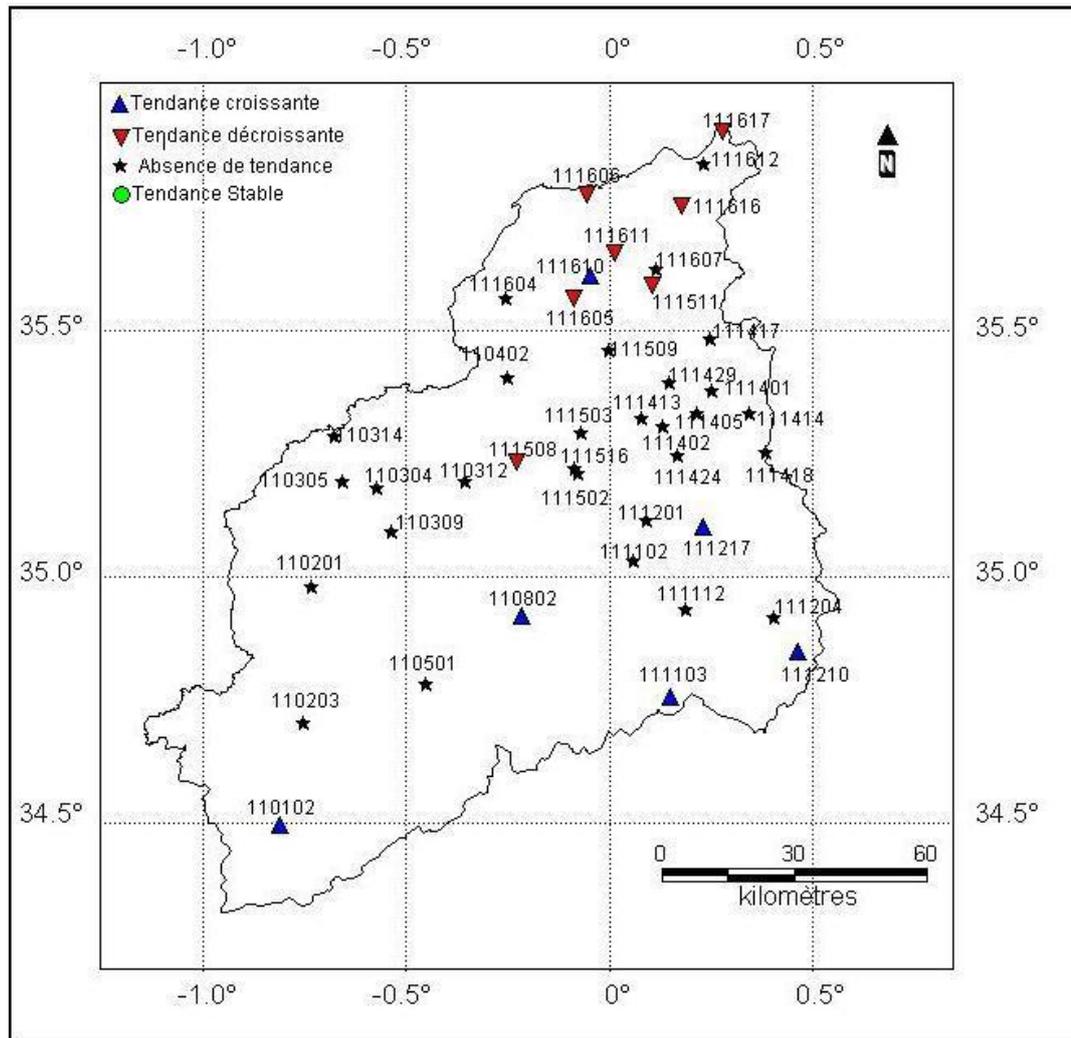
**Figure 5.5 :** Carte des tendances du mois de mars (r de Pearson)

La Figure 5.5 des tendances du mois de mars est la plus particulière parmi les cartes construites. Presque toutes les stations étudiées ont une tendance décroissante. Aussi, parmi les autres stations, aucune ne présente une autre tendance. Le mois de mars est le mois le plus touché par les changements climatiques. Toutes les régions du bassin versant ont été affectées. Cette constatation doit être prise en considération pour toute planification agricole future.



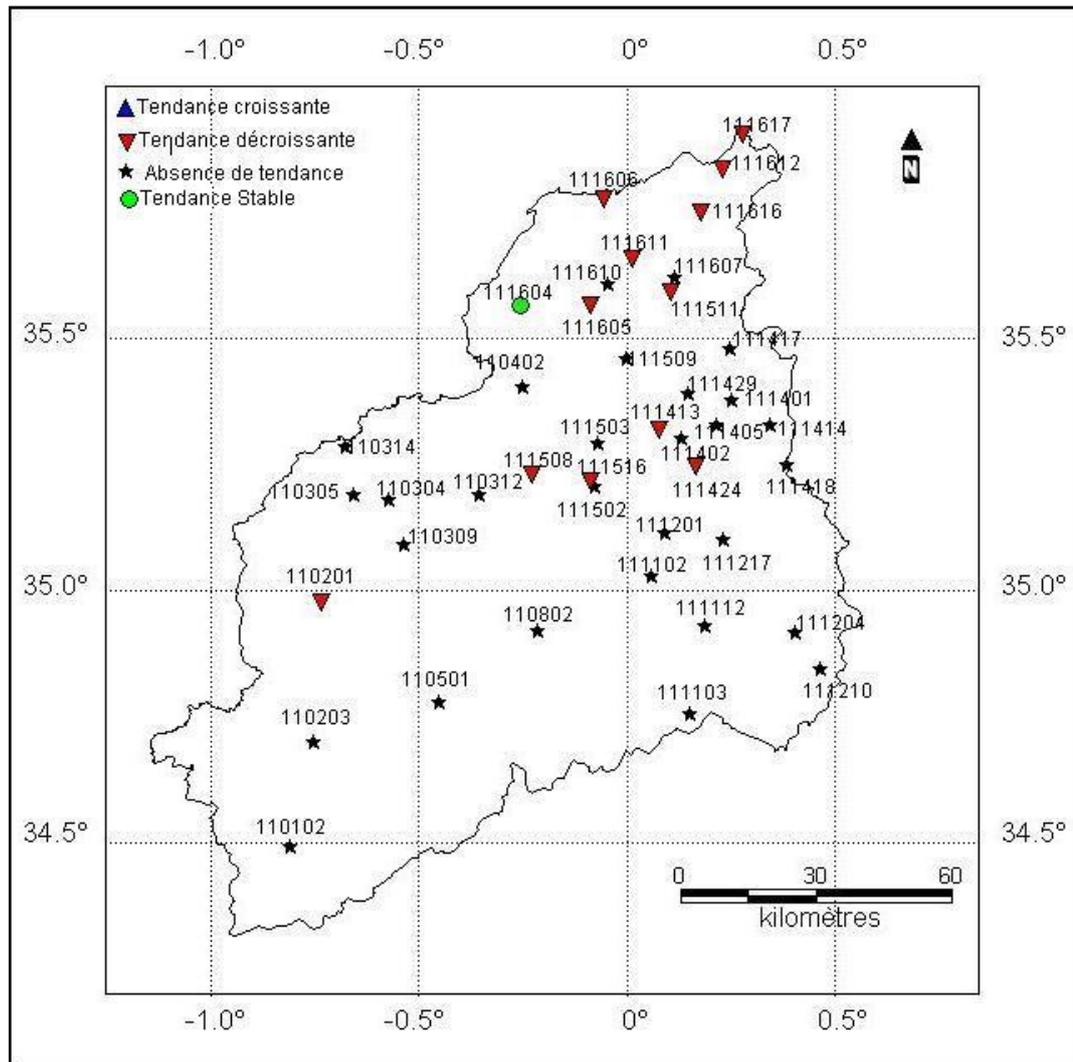
**Figure 5.6 :** Carte des tendances du mois d'avril (r de Pearson)

La Figure 5.6 décrit les tendances de la pluviométrie mensuelle du mois d'avril. Aucune constatation particulière ne peut être faite. Nous pouvons citer que les stations Hassi Daho (110309), Ain Trid (110314), Matemore (111405) et Bouhanifia BGE (111503) ont des pluviométries en diminution. De l'autre côté, les stations Ras Elma (110102), Mascara (111429) et Mocta Douz (111610) sont vers l'augmentation.



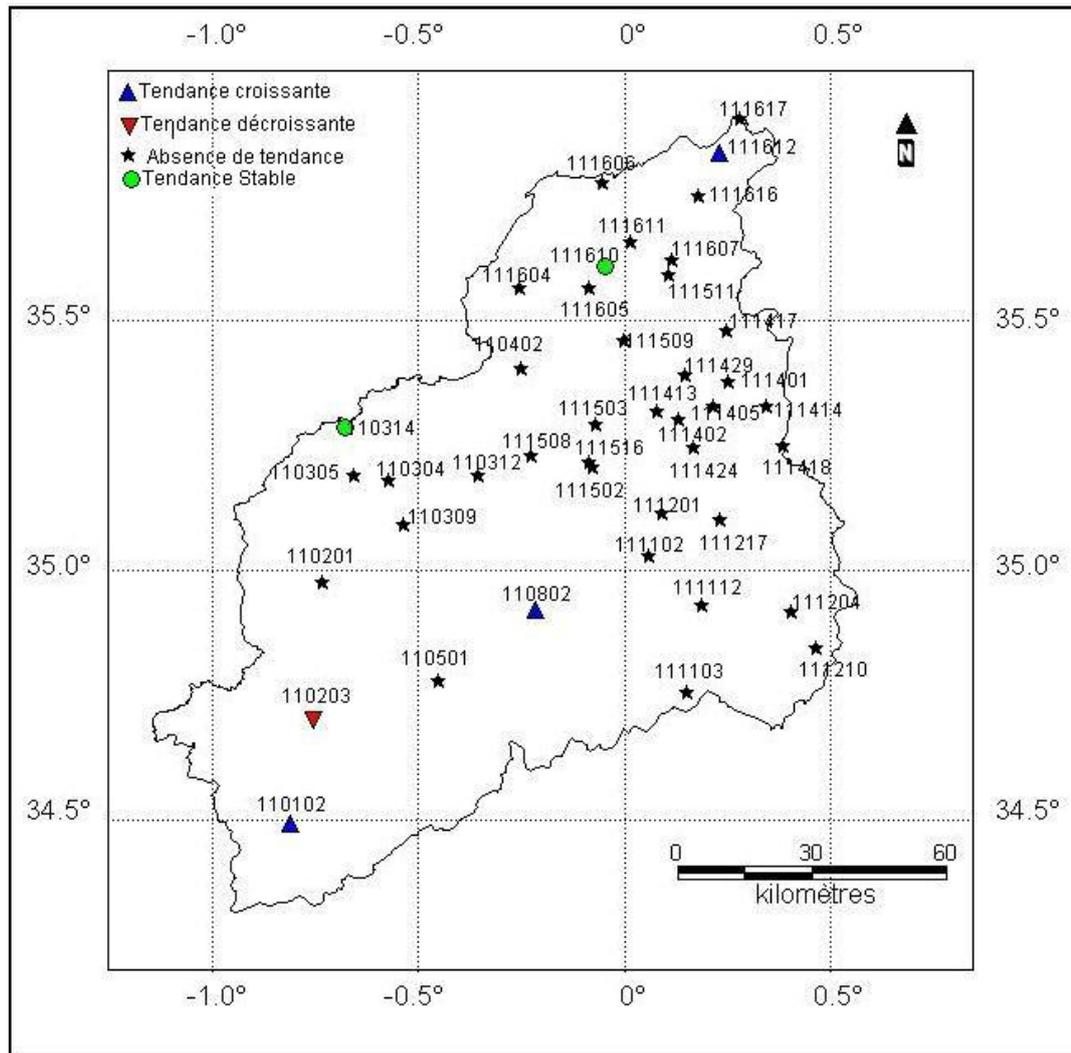
**Figure 5.7 :** Carte des tendances du mois de mai (r de Pearson)

La Figure 5.7 des tendances de la pluviométrie du mois de mai met en évidence le caractère de décroissance des stations situées au Nord du bassin (Sfissef (111508), Mohammadia GRHA (111511), Bouhenni (111605), Fornaka (111606), Ferme Blanche (111611), Marais de Sirat(111616) et Ferme Assorain (111617)). Les stations du Sud ont plutôt un caractère croissant (Ras Elma(110102), Daoud Youb (110802), Ain El Hadjar (111103), Tamesna (111210), Beniane (111217) et Mocta Douz (111610)).



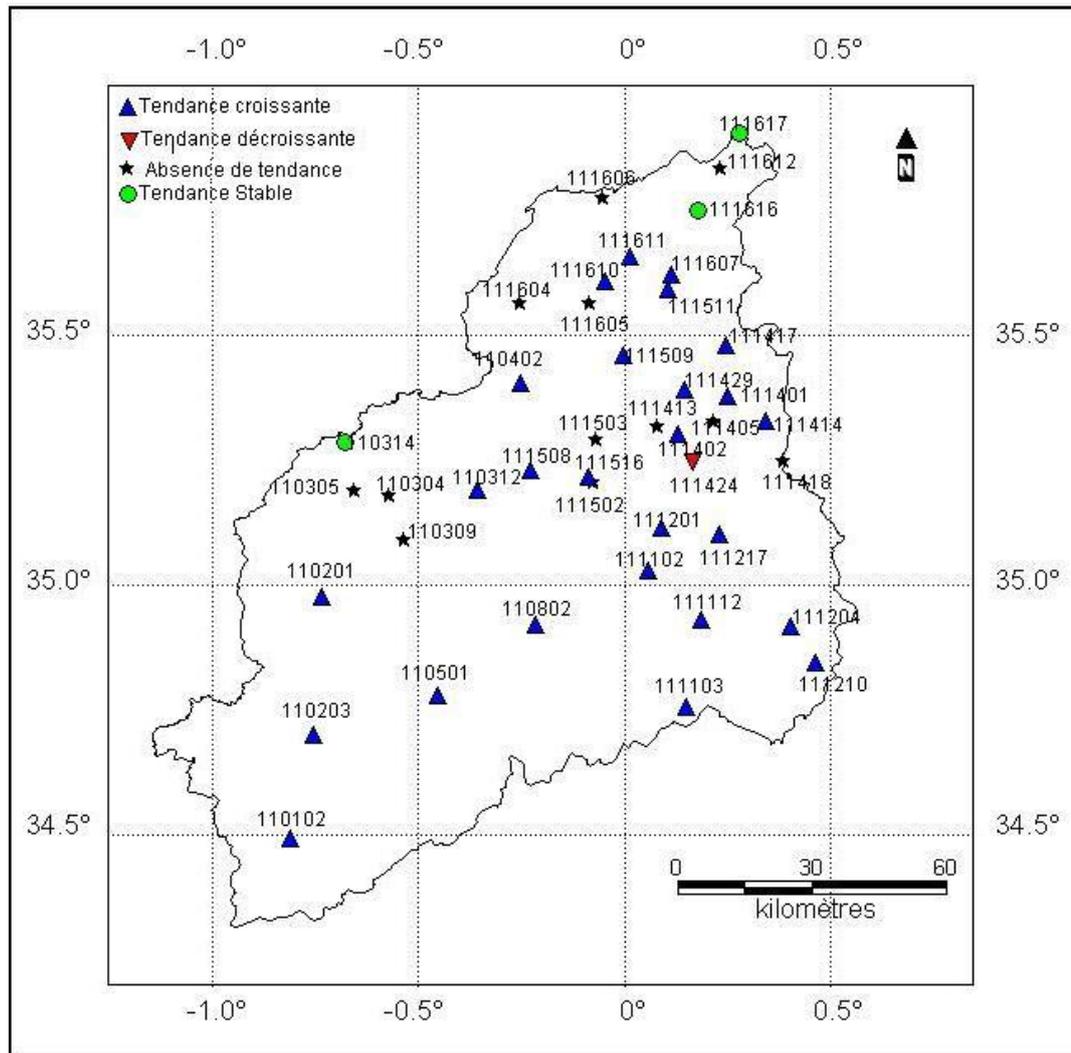
**Figure 5.8 :** Carte des tendances du mois de juin (r de Pearson)

La Figure 5.8 du mois de juin donne à peu près le même résultat que le mois de mai avec un nombre de stations plus élevées dans le sens de la réduction. Les stations Sidi Ali Benyoub (110201), Tizi (111413), Ghriss(111424), Sfisef (111508), Mohammadia GRHA (111511), Trois Rivières (111516), Bouhenni (111605), Fornaka (111606), Ferme Blanche (111611), Bled Taouria (111612), Marais de Sirat (111616) et Ferme Assorain (111617) ont des réductions de la pluviométrie. L'autre remarque importante est qu'aucune station n'a une augmentation de la pluviométrie.



**Figure 5.9 :** Carte des tendances du mois de juillet (r de Pearson)

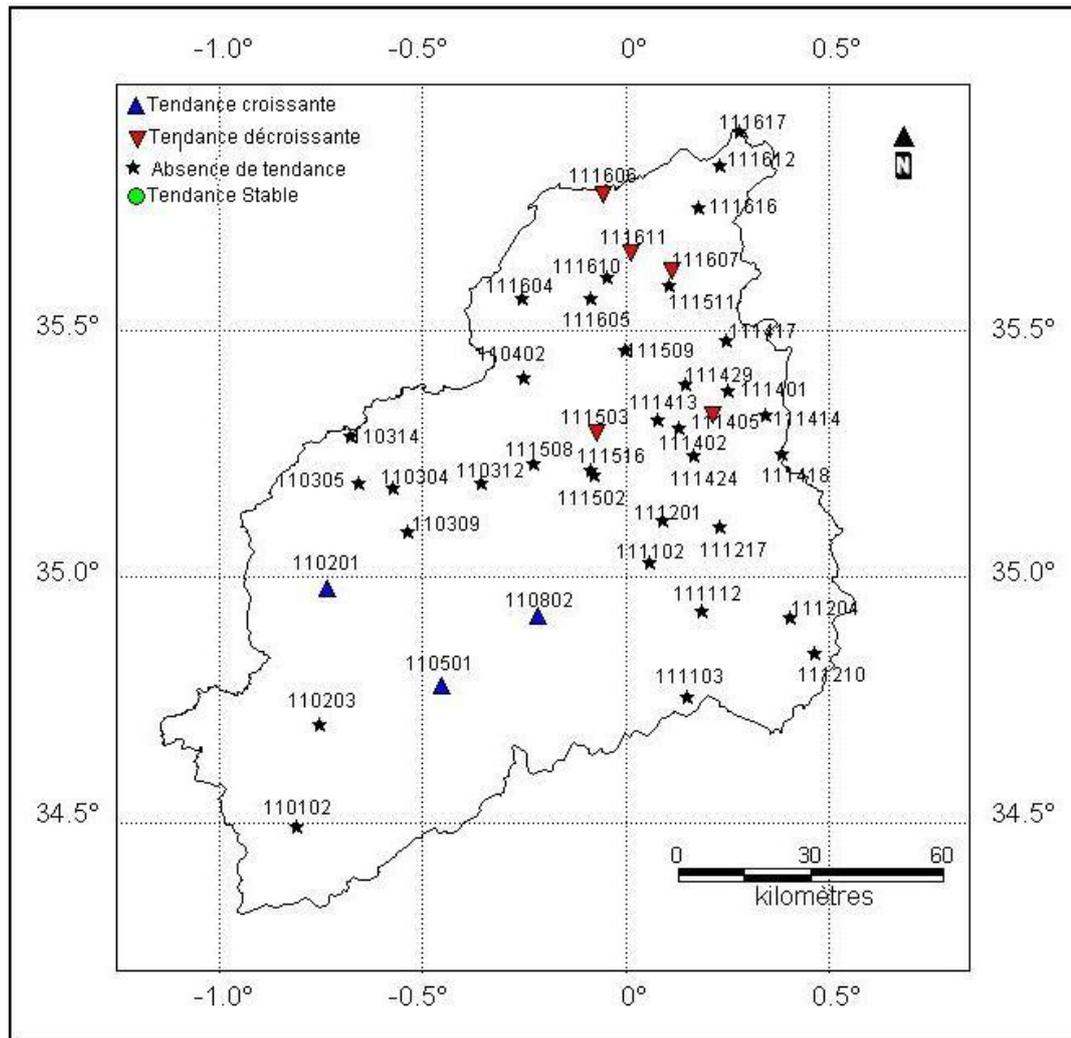
Presque la totalité des stations de la Figure 5.9, du mois de juillet, n'ont pas de tendance perceptible. Ceci est dû à la sécheresse qui marque ce mois depuis longtemps.



**Figure 5.10 :** Carte des tendances du mois d'aout (r de Pearson)

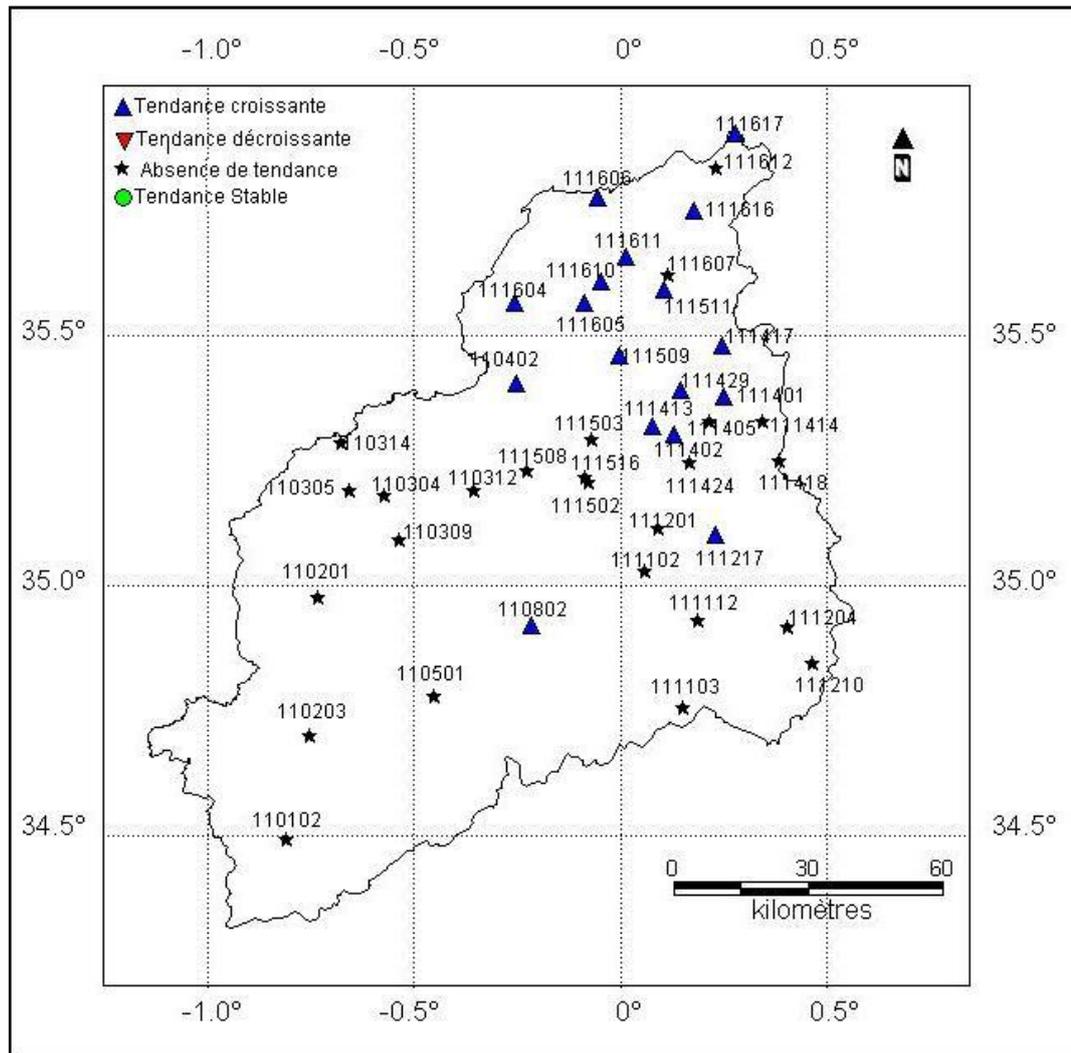
La spécificité de la Figure 5.10, qui représente le mois d'aout, est le caractère croissant de la multitude des stations étudiées. Ce phénomène est peut être expliqué par les pluies orageuses de ce mois. L'exception est pour la station de Ghriss (111424) qui a une tendance décroissante, et les stations de Ain Trid (110314), Marais de Sirat (111616) et Ferme Assorain (111617) qui ont un régime stable.





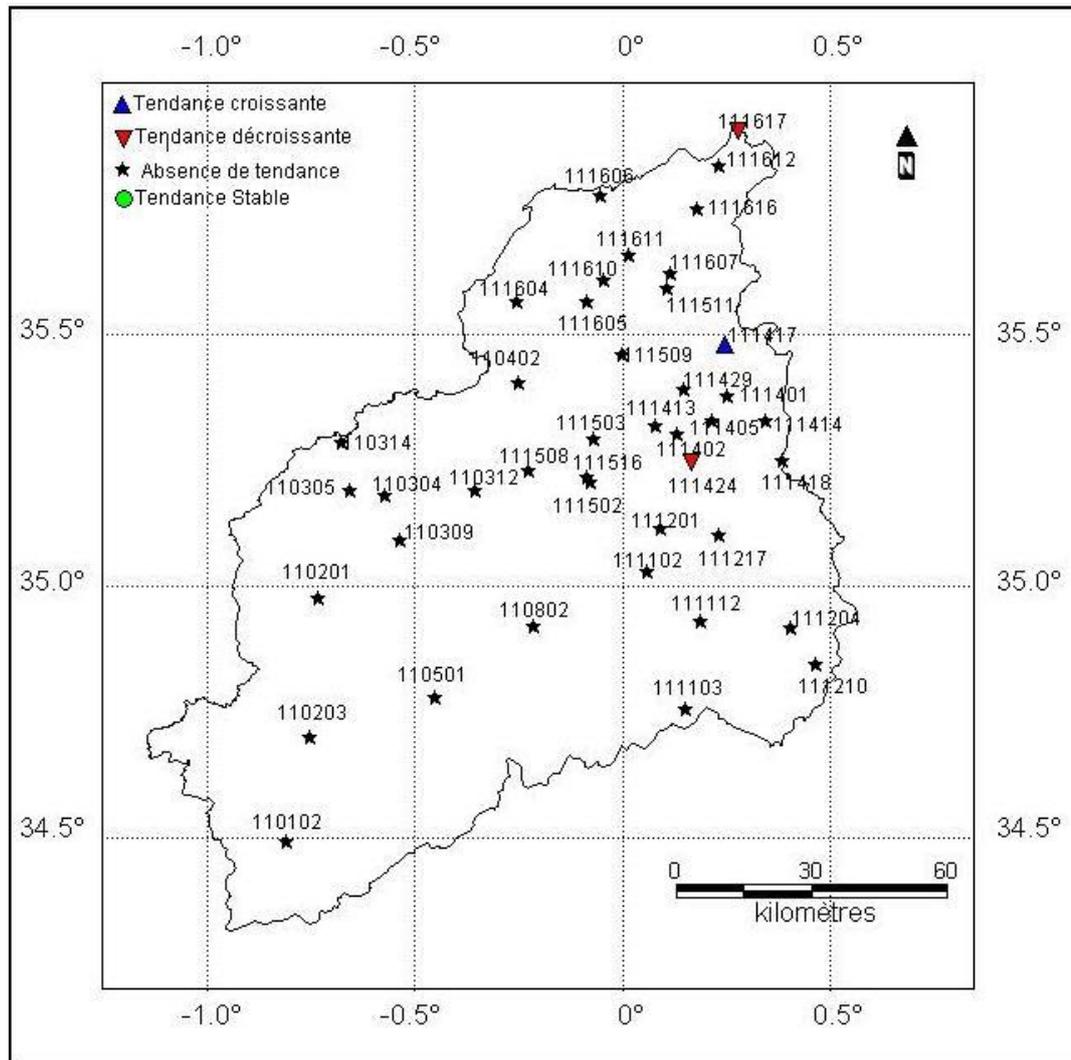
**Figure 5.12 :** Carte des tendances du mois d'octobre (r de Pearson)

La Figure 5.12 ne montre pas une dominance d'une tendance. Nous pouvons toujours dire que les quelques stations touchées par la décroissance (Sidi Ali Benyoub (110201), Merine (110501), Daoud Youb (110802)) se situent au Nord alors que celles touchées par la croissance (Matemore (111405), Bouhanifia BGE (111503), Fornaka (111606), Samouria (111607), Ferme Blanche (111611)) se situent au Sud.



**Figure 5.13 :** Carte des tendances du mois de novembre ( $r$  de Pearson)

La Figure 5.13 caractérise l'aspect de la hausse de la pluviométrie durant le mois de novembre dans la partie Nord du bassin de la Macta. Les stations concernées sont Cheurfas Bge (110402), Daoud Youb (110802), Beniane (111217), Maoussa (111401), Froha (111402), Tizi (111413), Ain Fares (111417), Mascara (111429), Hacine (111509), Mohammadia GRHA (111511), Oggaz (111604), Bouhenni (111605), Fornaka (111606), Mocta Douz (111610), Ferme Blanche (111611), Marais de Sirat (111616) et Ferme Assorain (111617). Les autres tendances ne sont pas présente dans ce mois ce qui confirme la première constatation.



**Figure 5.14 :** Carte des tendances du mois de décembre (r de Pearson)

Le mois de décembre illustré dans la Figure 5.14, élucide l'absence de la tendance de presque toutes les stations. Seules Ghriss (111424) et Ferme Assorain (111617) ont des baisses de la pluviométrie alors qu'Ain Fares (111417) a une augmentation.

### 5.2.3.1.1. Conclusion

A travers cette étude, nous avons déterminé les tendances de la pluviométrie mensuelle dans 42 stations du bassin versant de la Macta. La remarque principale est le mois de mars. La particularité de ce mois est la tendance décroissante de la plus grande parties des stations étudiées (79%). C'est le mois le plus touché par les changements climatiques, caractérisé par la baisse de la pluviométrie. Les mois de mai et juin ont le même signe de leurs pentes. Les parties Nord sont les plus marquées par cette décroissance. Cela est expliqué par des hauteurs de pluies plus grandes que celles de la région Sud et donc un déficit plus grand et plus marqué dans le cas d'une baisse de la pluviométrie même si le taux de perte est peut-être le même.

Par contre, les mois d'août, septembre et novembre sont caractérisé par un régime pluviométrique à la hausse. Les mois de janvier, février, avril, juillet, octobre et décembre présentent une absence de la tendance de la majorité des stations. Nous pouvons l'expliquer par la grande variabilité temporelle de ces mois.

Aussi, la station de Ghriss (111424) a une tendance décroissante dans la majorité des mois.

Cette tendance décroissante de la majorité des mois influe-t-elle sur la tendance saisonnière? C'est ce que nous essayons d'étudier dans la partie suivante.

### 5.2.3.2. Etude de la pluviométrie saisonnière

L'étude de la variabilité saisonnière est indispensable, pour voir si la baisse ou la hausse de la pluviométrie est spécifique à une saison particulière ou à plusieurs saisons, cela permet de mieux visualiser la chronologie des totaux de pluies saisonnières dans le temps. Les domaines d'application de la prévision saisonnière sont nombreux. On peut citer entre autres, la sécurité alimentaire, la gestion des ressources naturelles, l'énergie, la santé, l'aménagement urbain, les transports. La présente étude consiste à rechercher des tendances des cumuls pluviométriques saisonniers. Puisque nous disposons de données mensuelles, les mois de chaque saison sont représentés dans le Tableau 5.3.

**Tableau 5.3 :** Répartition des mois au sein des saisons

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

Pour chaque station, nous avons calculé le cumul de la pluviométrie pour une saison et une année donnée. 168 (4\*42) tableaux ont été formés. Chaque tableau contient en ligne les valeurs de la pluviométrie saisonnière pour une année donnée (Tableau 5.4 à Tableau 5.7). Un simple aperçu sur les données montre la grande variabilité interannuelle des nos données. Citons comme exemple le passage de 117.2 mm de l'automne 1970 de la station Ras El Ma à 16.5 mm l'année suivante. La même constatation peut être faite pour toutes les stations et toutes les saisons.

**Tableau 5.4 :** Données de la pluviométrie saisonnière (Automne) (1970-2011)

	<b>Ras Elma</b>	<b>Sidi Ali Benyoub</b>	<b>El Hacaiba</b>	.....	<b>Bled Taouria</b>	<b>Marais de Sirat</b>	<b>Ferme Assorain</b>
1970	117.2	237.8	192.1	.....	330.5	171.4	363.4
1971	16.5	58.2	38.6	.....	64.4	45.0	77.0
1972	199.1	181.5	155.2	.....	156.5	133.6	91.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2009	188.5	289.8	244.5	.....	312.7	240.6	225.3
2010	22.1	83.4	55.5	.....	62.9	59.6	68.4
2011	38.8	164.1	81.9	.....	157.0	142.1	144.6

**Tableau 5.5 :** Données de la pluviométrie saisonnière (hiver) (1970-2011)

	<b>Ras Elma</b>	<b>Sidi Ali Benyoub</b>	<b>El Hacaiba</b>	.....	<b>Bled Taouria</b>	<b>Marais de Sirat</b>	<b>Ferme Assorain</b>
1970	50.9	119.2	104.1	.....	80.3	57.6	82.0
1971	72.3	151.1	125.0	.....	96.8	119.9	155.5
1972	141.3	215.3	202.5	.....	256.5	210.0	219.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2009	84.1	175.8	170.1	.....	125.7	103.8	127.6
2010	45.5	283	99.0	.....	187.1	171.1	155.8
2011	27.1	114.6	49.0	.....	112.1	103.8	107.3

**Tableau 5.6 :** Données de la pluviométrie saisonnière (Printemps) (1970-2011)

	<b>Ras Elma</b>	<b>Sidi Ali Benyoub</b>	<b>El Hacaiba</b>	.....	<b>Bled Taouria</b>	<b>Marais de Sirat</b>	<b>Ferme Assorain</b>
1970	40.1	62.0	79.5	.....	53.0	46.7	47.5
1971	82.1	180.1	99.1	.....	283.9	260.4	253.5
1972	66.1	102.1	96.0	.....	60.7	72.8	167.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2009	78.6	68.9	56.8	.....	77.0	69.3	76.2
2010	82.5	94.9	114.4	.....	44.0	38.2	38.2
2011	113.8	134.4	170.4	.....	101.7	122.0	94.5

**Tableau 5.7 :** Données de la pluviométrie saisonnière (Eté) (1970-2011)

	<b>Ras Elma</b>	<b>Sidi Ali Benyoub</b>	<b>El Hacaiba</b>	.....	<b>Bled Taouria</b>	<b>Marais de Sirat</b>	<b>Ferme Assorain</b>
1970	34.0	5.8	5.9	.....	0.0	0.0	0.0
1971	64.1	60.8	42.7	.....	36.0	10.5	13.5
1972	19.3	24.3	41.4	.....	10.7	2.2	32.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2009	137.6	83.6	127.1	.....	16.6	21.2	23.3
2010	75.4	52.7	51.3	.....	91.6	19.5	21.3
2011	13.3	4.4	13.5	.....	0.0	9.6	9.4

Des courbes représentant les pluviométries saisonnières ont été tracées. Des droites de tendances avec les équations des droites de régression linéaires ont été ajoutées. Nous nous pouvons remarquer des stations avec des droites de tendances ascendantes et d'autre descendantes (Figure 5.15 à Figure 5.18).

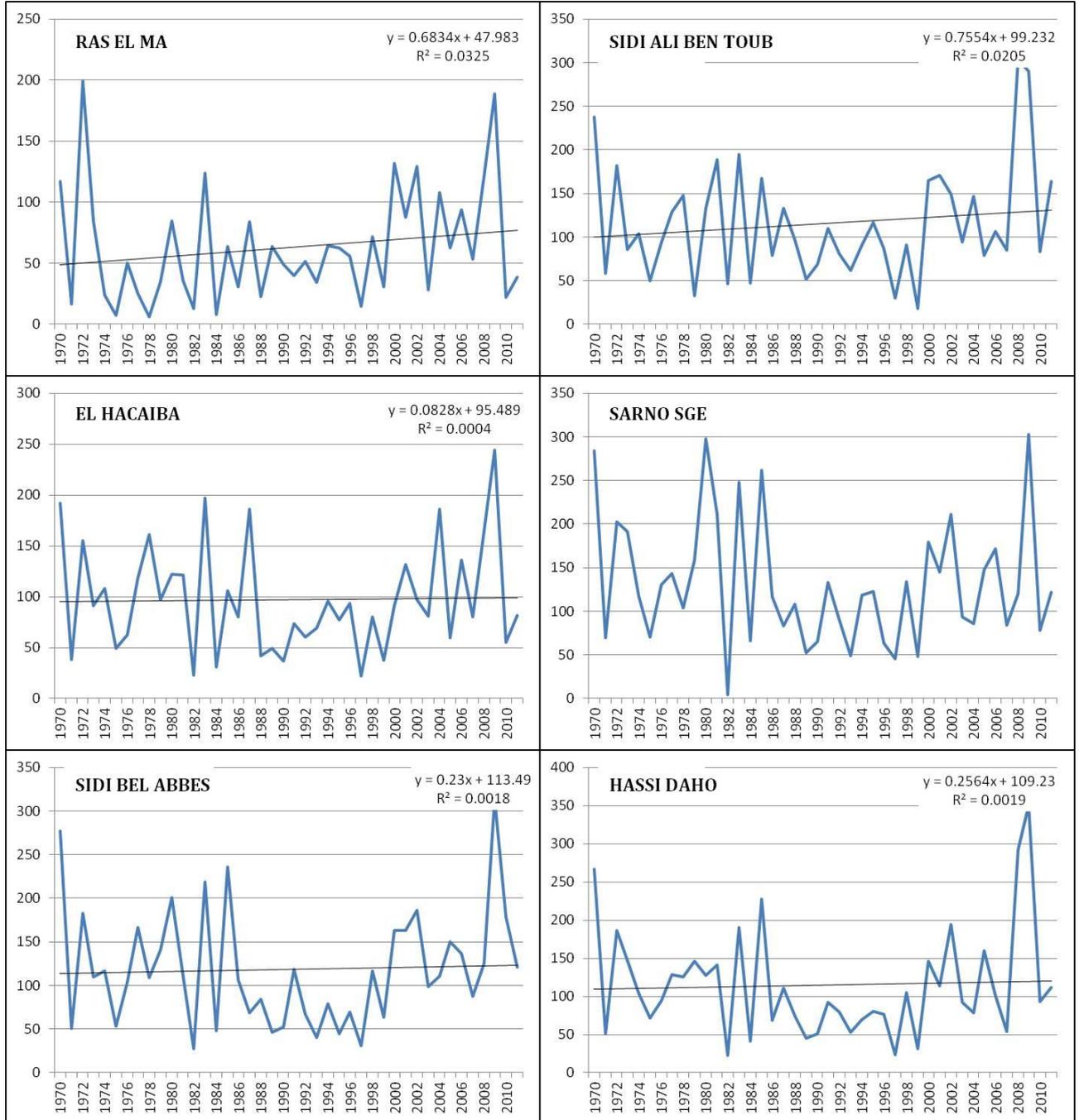


Figure 5.15 : Courbes de la pluviométrie saisonnière (Automne) (avec droites de tendances)

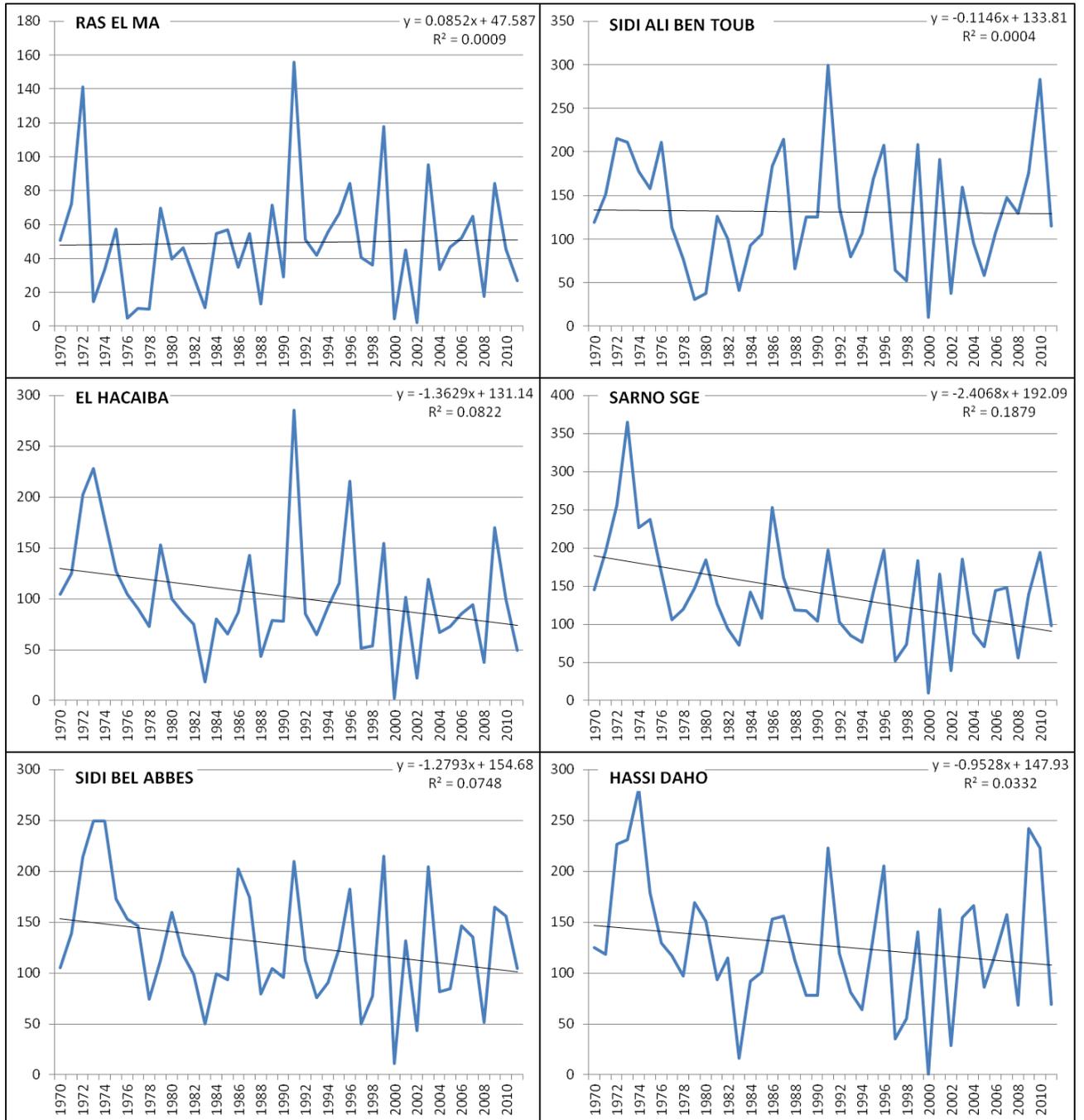


Figure 5.16 : Courbes de la pluviométrie saisonnière (Hiver)(avec droites de tendances)

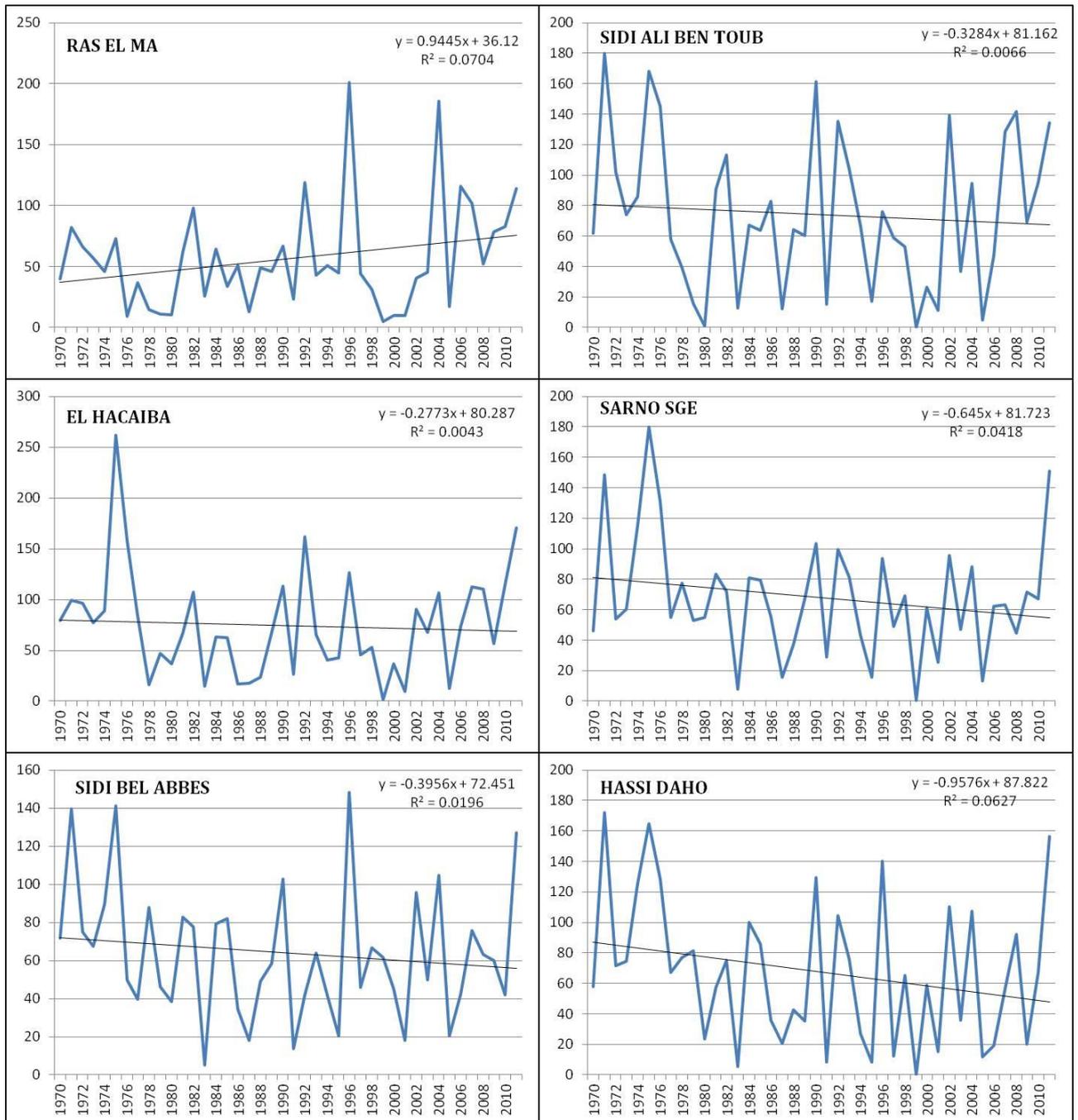


Figure 5.17 : Courbes de la pluviométrie saisonnière (Printemps) (avec droites de tendances)

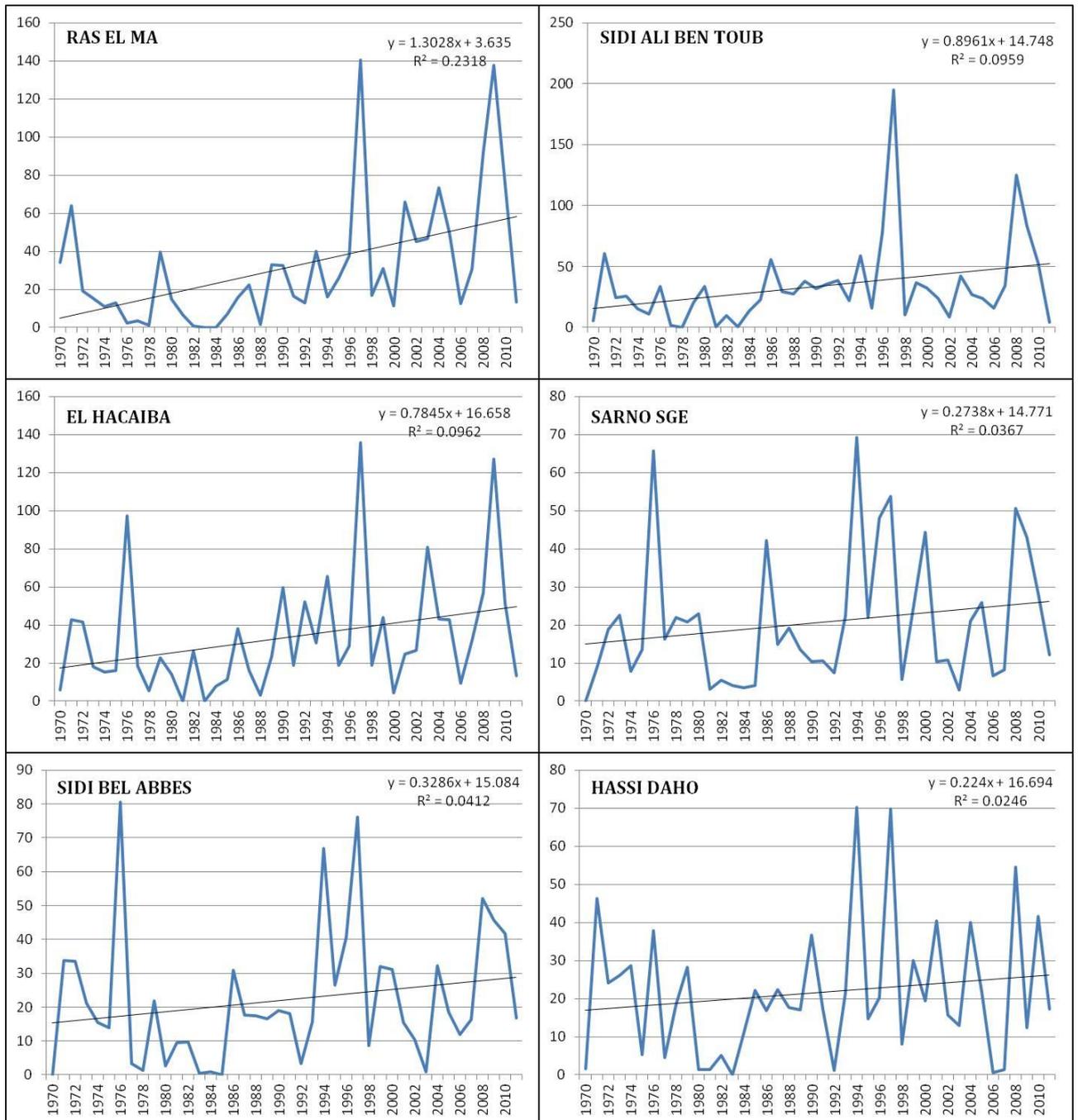
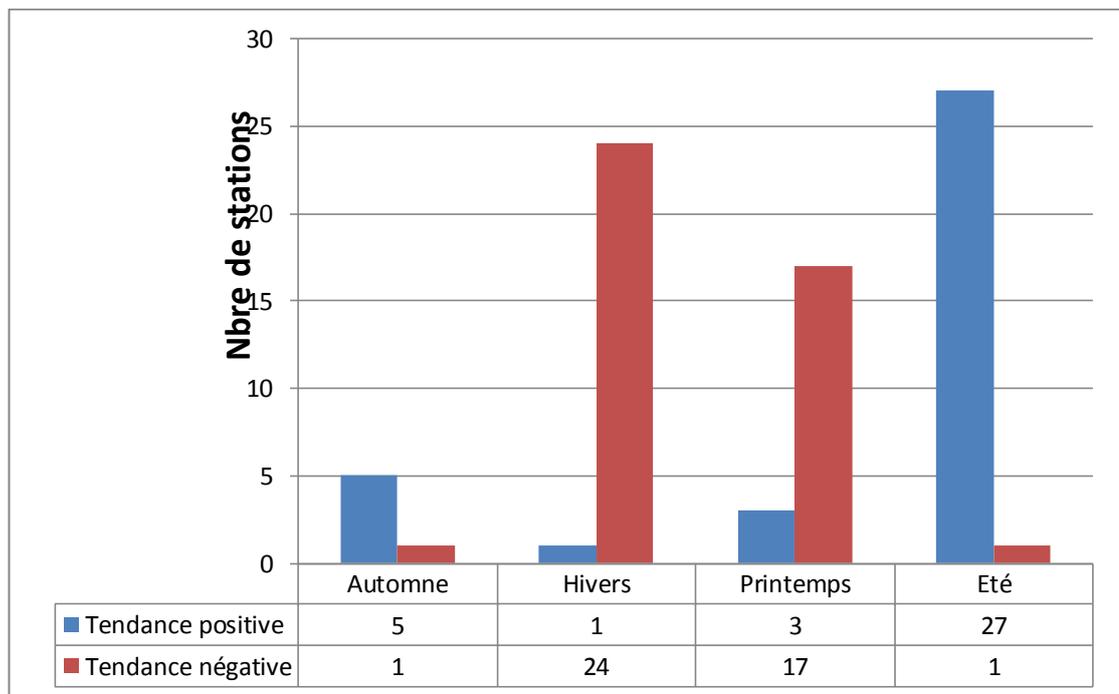


Figure 5.18 : Courbes de la pluviométrie saisonnière (Eté) (avec droites de tendances)

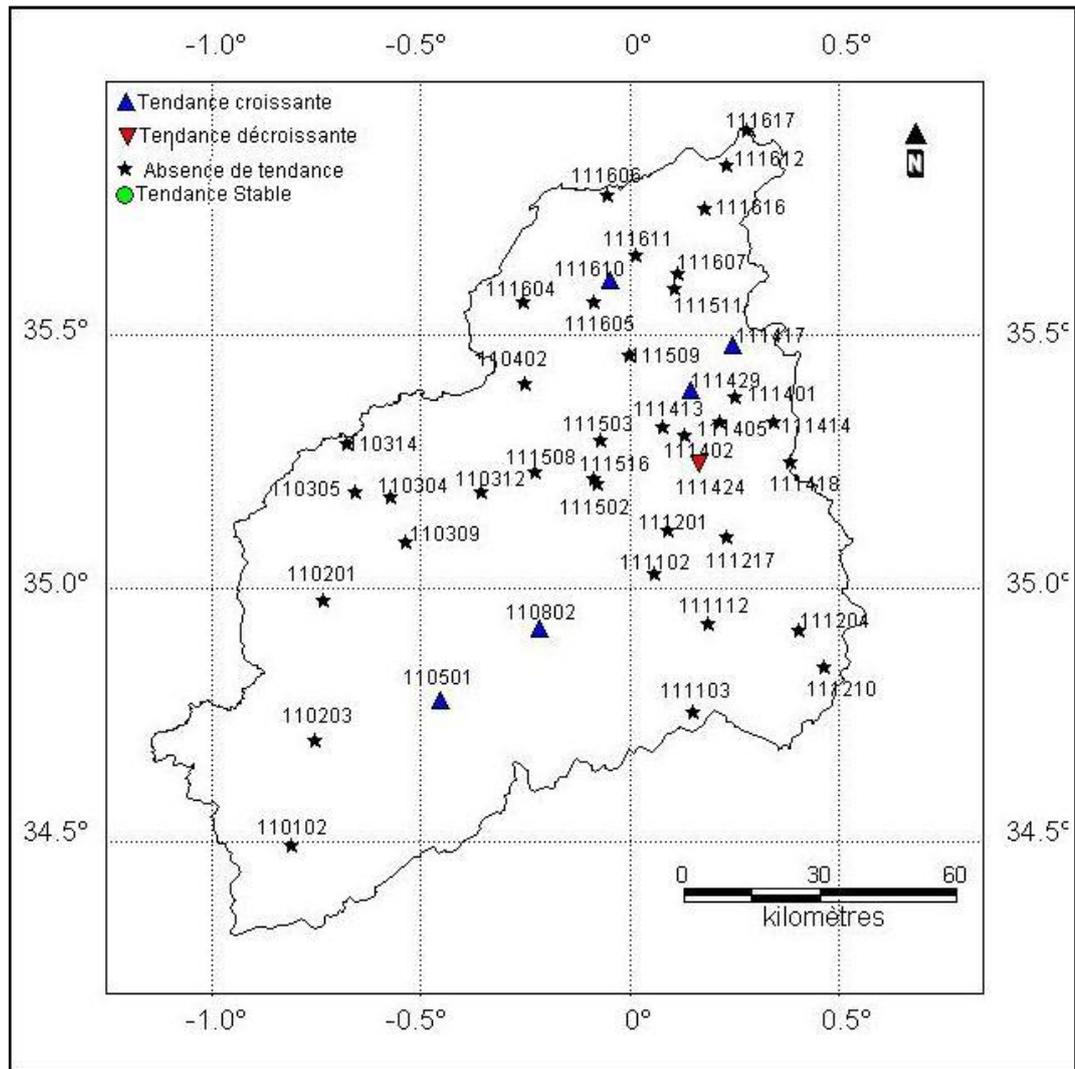
L'utilisation des valeurs des pentes des droites de tendances avec la valeur du coefficient de corrélation facilite la décision quant à une tendance donnée. Une tendance est considérée comme croissante (décroissante) si la valeur de la pente est positive (négative) et si son coefficient de corrélation est significativement supérieure (inférieure) à zéro. L'étude de la significativité du coefficient de corrélation ( $r$ ) pour chaque saison et chaque station permet de déterminer si la tendance est croissante, décroissante ou bien absence de tendance. Nous avons dénombré le nombre de station pour une saison donnée et une tendance donnée (Figure 5.19).



**Figure 5.19 :** Nombre de station pour chaque type de tendance saisonnière ( $r$  de Pearson)

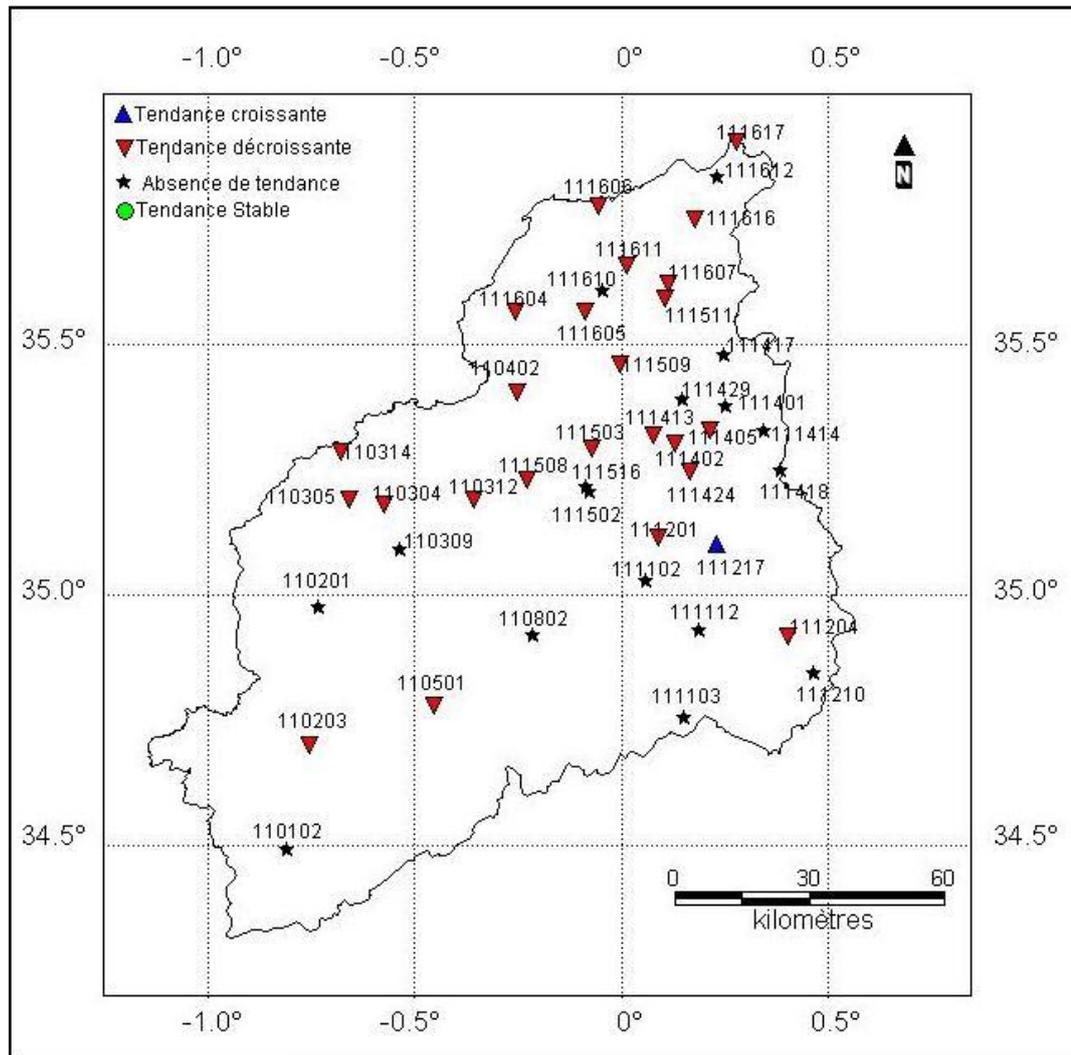
La Figure 5.19 révèle la dominance de la tendance négative au niveau des saisons hiver et printemps. Le nombre de stations en décroissance pour l'hiver et le printemps est respectivement 24 stations (soit 57%) et 17 stations (40%). Cependant la saison de l'été est marquée par une direction vers le haut (27 stations soit 64%).

Les tendances saisonnières de nos stations sont reprises sur des cartes. L'utilisation des cartes permet aussi de faire des interprétations spatiales (Figure 5.20).



**Figure 5.20 :** Carte de la tendance de la saison de l'Automne (r de Pearson)

La Figure 5.20 décrit les tendances de la saison de l'automne. D'une manière générale le plus grand nombre de stations n'ont aucune tendance. Ce qui explique la grande dispersion des données durant les années étudiées. Néanmoins, les stations de Merine (110501), Daoud Youb (110802), Ain Fares (111417), Mascara (111429) et Mocta Douz (111610) ont des directions de la pluviométrie de l'automne vers le haut. Seule la station de Ghriss (111424) a une direction vers le bas.



**Figure 5.21 :** Carte de la tendance de la saison de l'Hivers (r de Pearson)

La Figure 5.21 décrit les tendances saisonnières de nos stations. Elle montre le caractère de décroissance de la majorité des stations étudiées. Presque toutes les régions du bassin sont touchées par cette diminution. Les stations en abaissement sont El Hacaiba (110203), Sarno Bge (110304), Sidi Belabbes (110305), Mostefa Benbrahim (110312), Ain Trid (110314), Cheurfas Bge (110402), Merine (110501), Oued Taria (111201), Ain Tifrit (111204), Froha (111402), Matemore (111405), Tizi (111413), Ghriss (111424), Bouhanifia BGE (111503), Sfissef (111508), Hacine (111509), Mohammadia GRHA (111511), Oggaz (111604), Bouhenni (111605), Fornaka (111606), Samouria (111607), Ferme Blanche, (111611), Marais de Sirat (111616) et Ferme Assorain (111617). La station de Beniane (111217) a à elle seule une élévation de la pluviométrie de l'hiver.

La saison de l'hiver est la plus humide dans toutes les régions du bassin. C'est pourquoi, dans le cas d'une réduction, la pente sera plus abrupte.

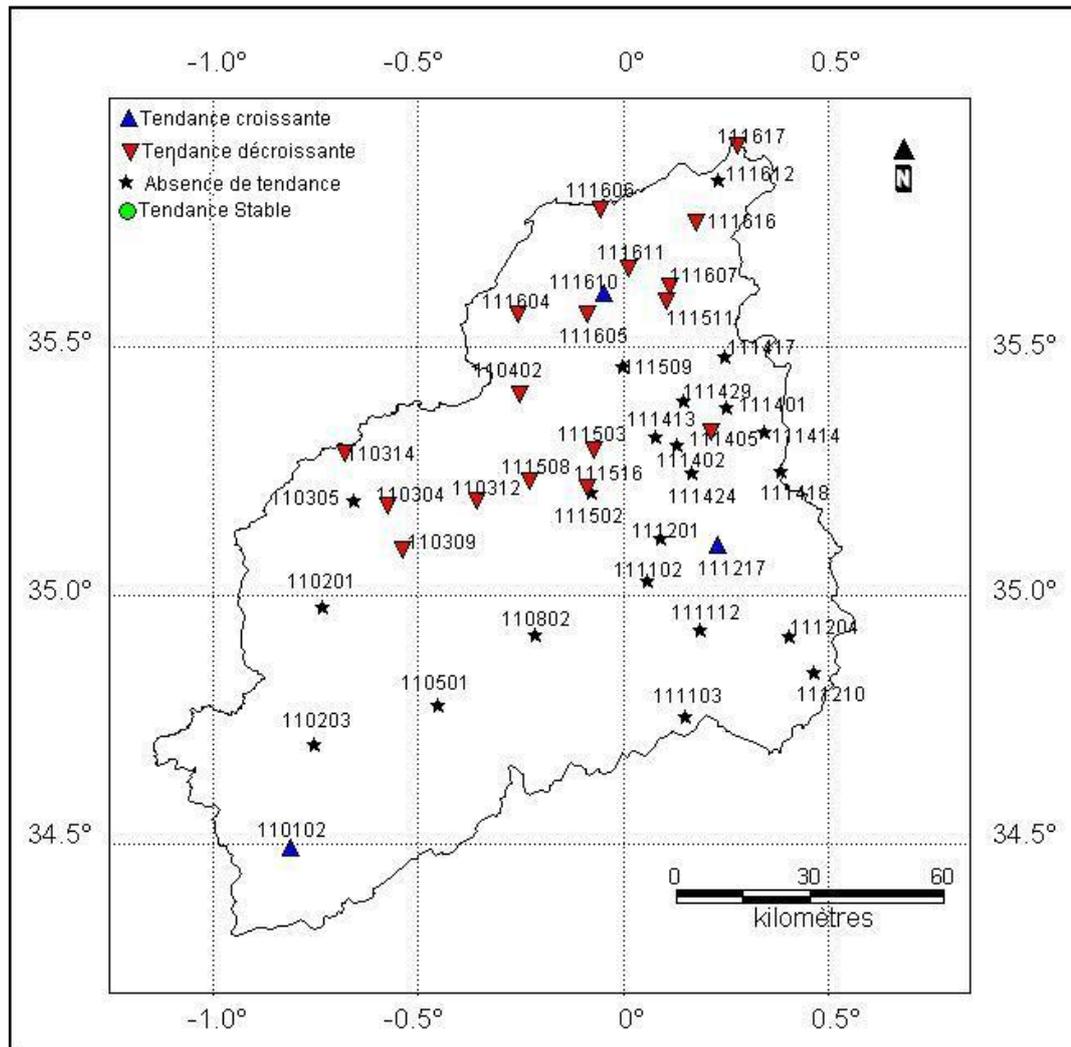


Figure 5.22 : Carte de la tendance de la saison du Printemps ( $r$  de Pearson)

La même constatation faite pour la carte de la saison de l'hiver peut être faite pour la carte du printemps (Figure 5.22). La tendance décroissante touche un bon nombre de stations. La particularité de cette saison est que la tendance se manifeste spécialement dans la région Centre Nord du bassin. Les stations affectées par la diminution de la pluviométrie sont Sarno Bge (110304), Hassi Daho (110309), Mostefa Benbrahim (110312), Ain Trid (110314), Cheurfas Bge (110402), Matemore (111405), Bouhanifia BGE (111503), Sfisseg (111508), Mohammadia GRHA (111511), Trois Rivières (111516), Oggaz (111604), Bouhenni (111605), Fornaka (111606), Samouria (111607), Ferme Blanche, (111611), Marais de Sirat (111616) et Ferme Assorain (111617). Cependant, les stations Ras Elma (110102), Beniane (111217), et Mocta Douz (111610) ont une croissance de leurs pluviométries.

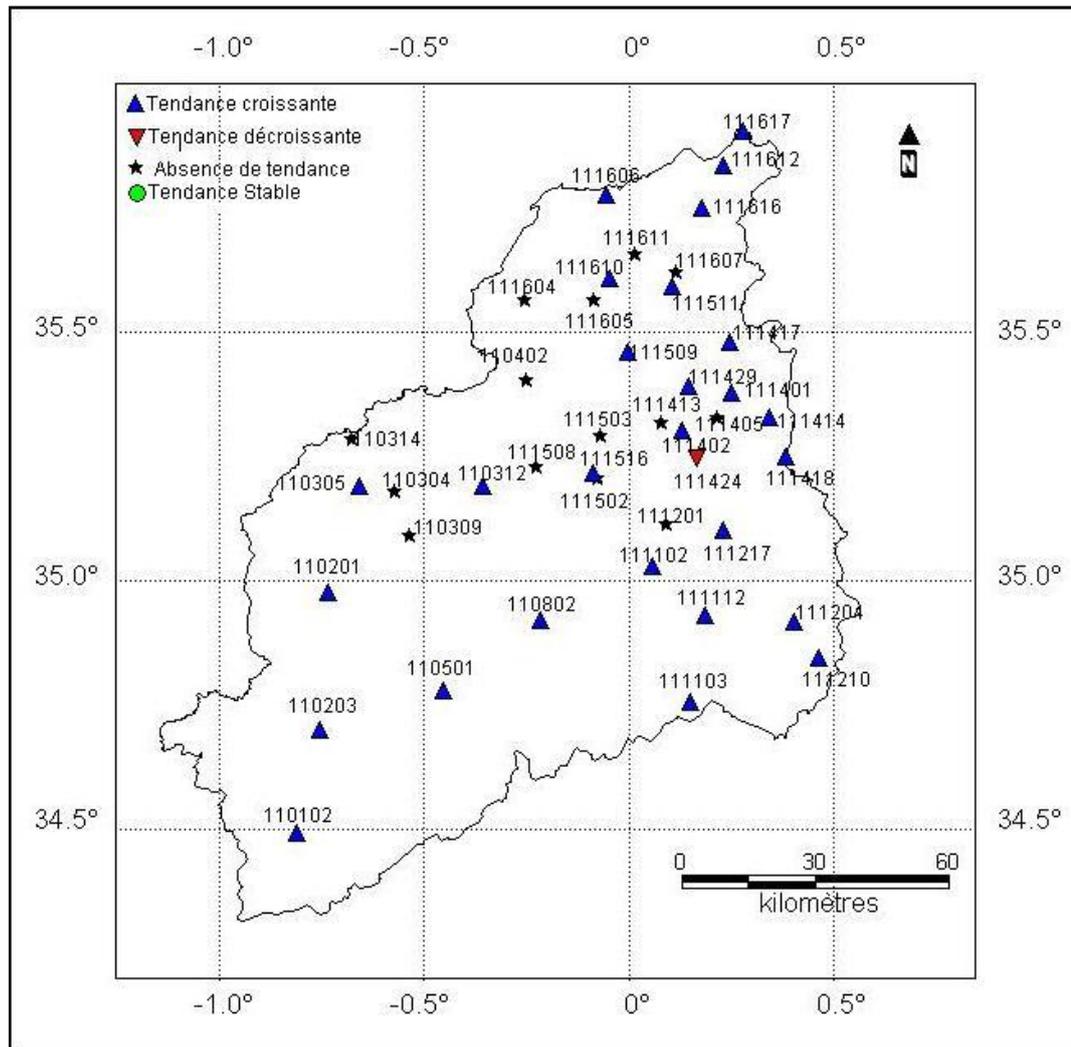


Figure 5.23 : Carte de la tendance de la saison de l'Eté (r de Pearson)

La saison de l'été, représentée sur la Figure 5.23, est soulignée par le style de l'accroissement de la pluviométrie. Bien sur cette augmentation est perceptible car cette saison est marquée par des pluies très faibles et donc toute augmentation se traduit par une pente plus élevée. Toutes les zones du bassin sont touchées par cette croissance. Les stations concernées sont Ras Elma (110102), Sidi Ali Benyoub (110201), El Hacaiba (110203), Sidi Belabbes (110305), Mostefa Benbrahim (110312), Merine (110501), Daoud Youb (110802), Meftah Sidi Boubekeur (111102), Ain El Hadjar (111103), Hammam Rabi (111112), Ain Tifrit (111204), Tamesna (111210), Beniane (111217), Maoussa (111401), Froha (111402), Sidi Kada (111414), Ain Fares (111417), Nesmoth MF(111418), Mascara (111429), Hacine (111509), Mohammadia GRHA (111511), Trois Rivières (111516), Fornaka (111606), Mocta Douz (111610), Bled Taouria (111612), Marais de Sirat (111616) et Ferme Assorain (111617). La station de Ghriss (111424) attire toujours l'attention par sa singularité de décroissance.

#### **5.2.3.2.1. Conclusion**

L'étude des tendances de la pluviométrie saisonnière par la méthode de la régression linéaire simple a permis d'afficher le sens de l'évolution des stations étudiées. La saison de l'automne est d'une manière générale caractérisée par l'absence de la tendance, à l'exception de quelques stations qui sont marquée par une augmentation. La saison de l'hiver vient confirmer l'impact des changements climatiques sur la région par un sens vers la diminution de la plus part des stations étudiées. Cette diminution concerne toutes les zones du bassin versant de la Macta. La saison du printemps marque la continuité des conséquences constatées durant la saison précédente par une même tendance. Seulement cette tendance à la baisse touche essentiellement la région Centre Nord. En fin, la saison de l'été, vient faire l'exception à la règle, en décrivant une direction positive de la pluviométrie de presque toutes les stations et toutes les régions. Citons la tendance décroissante de la station de Ghriss (111424) durant les saisons de l'automne, hivers et été.

#### **5.2.3.3. Etude de la pluviométrie annuelle**

Après l'étude de la pluviométrie mensuelle et saisonnière, nous étudions dans cette partie la pluviométrie annuelle. La pluviométrie d'une année est définie par la somme des hauteurs des précipitations mensuelles. Les valeurs des totaux annuels varient d'une année à l'autre. Le but de cette partie est d'étudier la variabilité de la pluviométrie annuelle durant la période de notre étude (1970-2011). Il se peut que nos stations aient des diminutions ou des augmentations de leurs pluviométries mensuelles ou saisonnières mais peuvent avoir des pluviométries annuelles stables. En d'autre terme, l'hypothèse que nous essayons vérifier est la suivante. Les tendances mensuelles et saisonnières influent ou non sur la tendance annuelle. Les tendances mensuelles ou saisonnières peuvent ne pas avoir d'effet sur la tendance annuelle si ces dernières se compensent entre elle.

Nous avons cumulé les données de la pluviométrie mensuelle 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 pluviométries annuelles des stations sont représentées sur la Figure 5.24 et Figure 5.25.

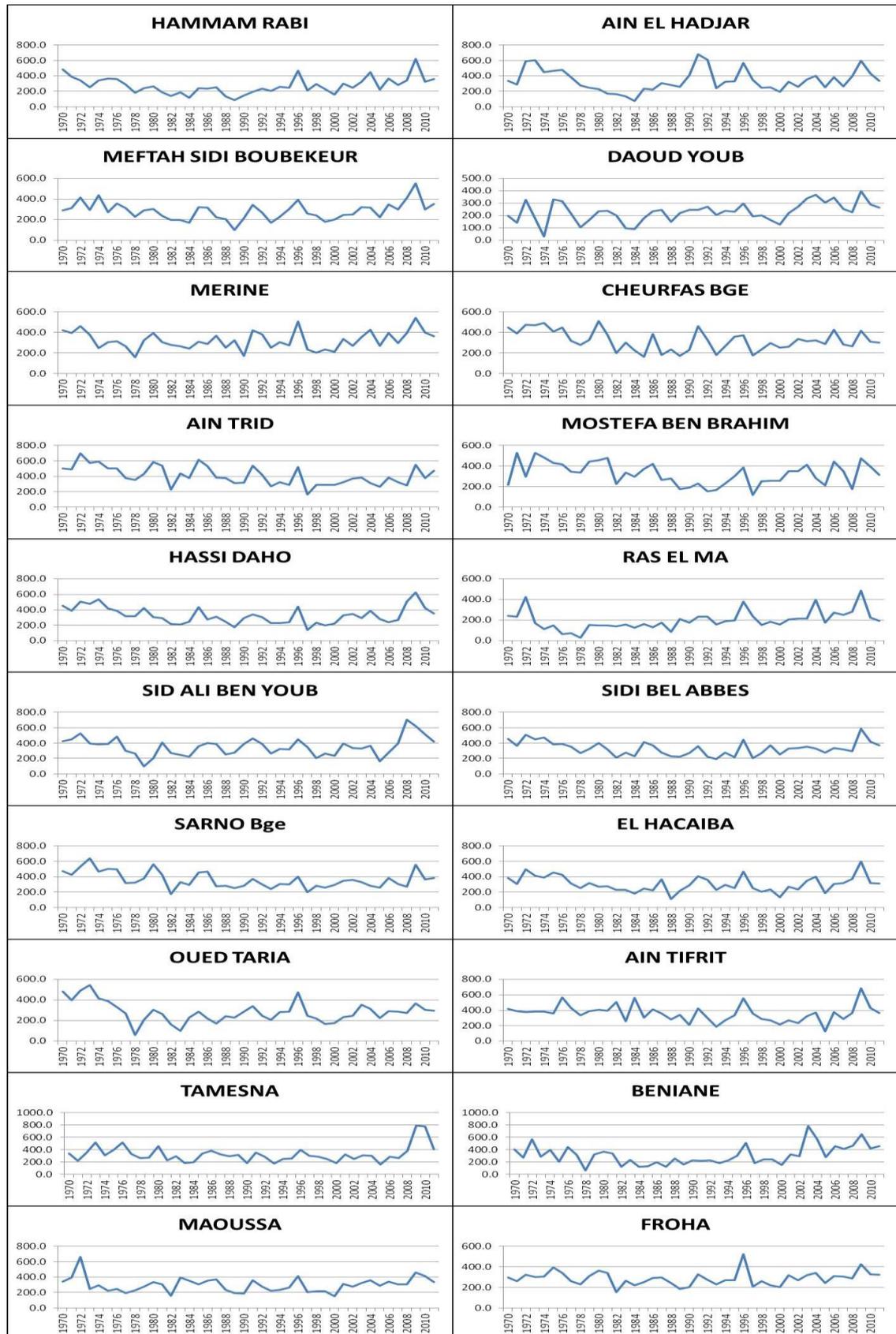


Figure 5.24 : Pluviométrie annuelle des stations étudiées

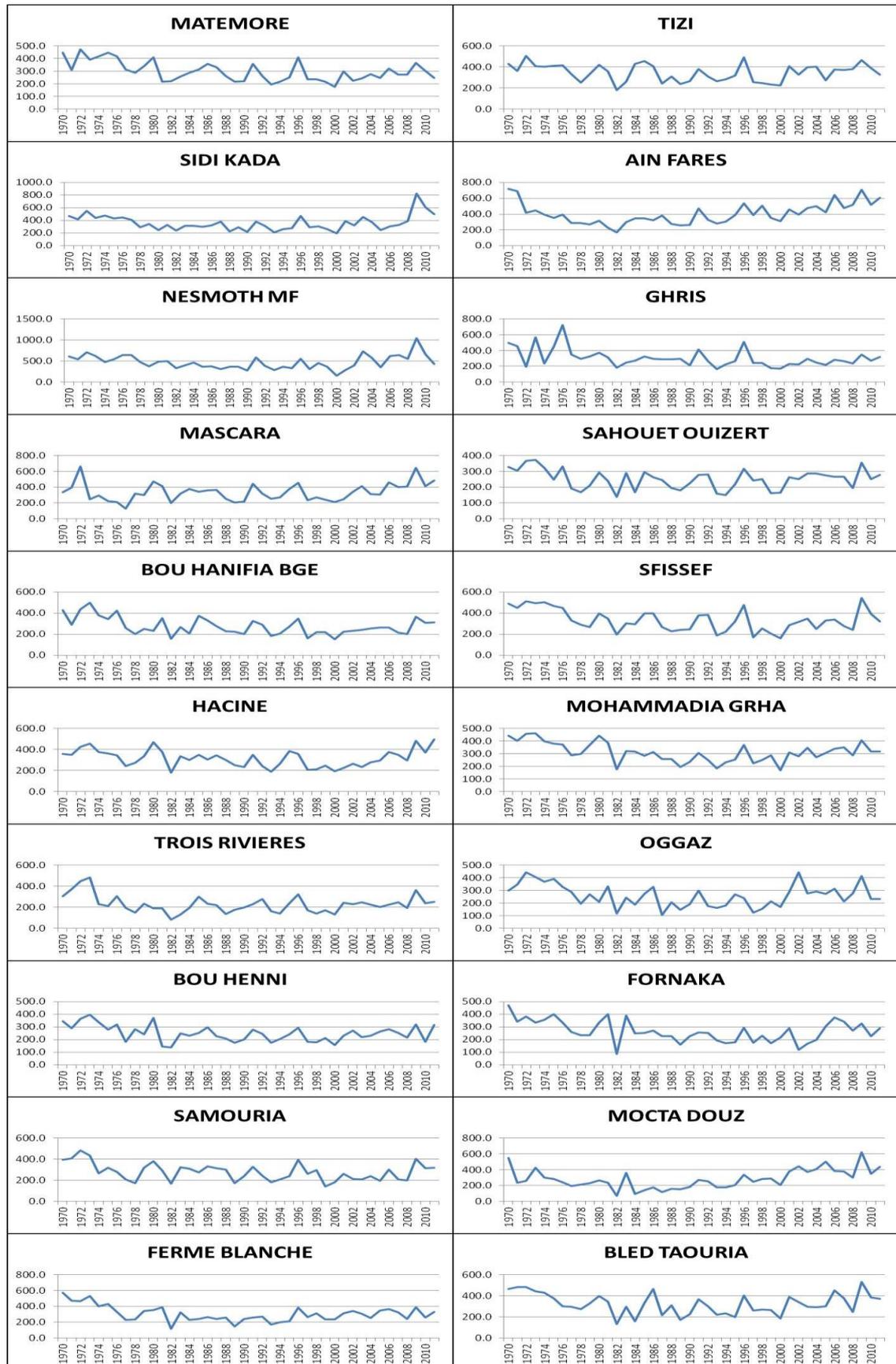
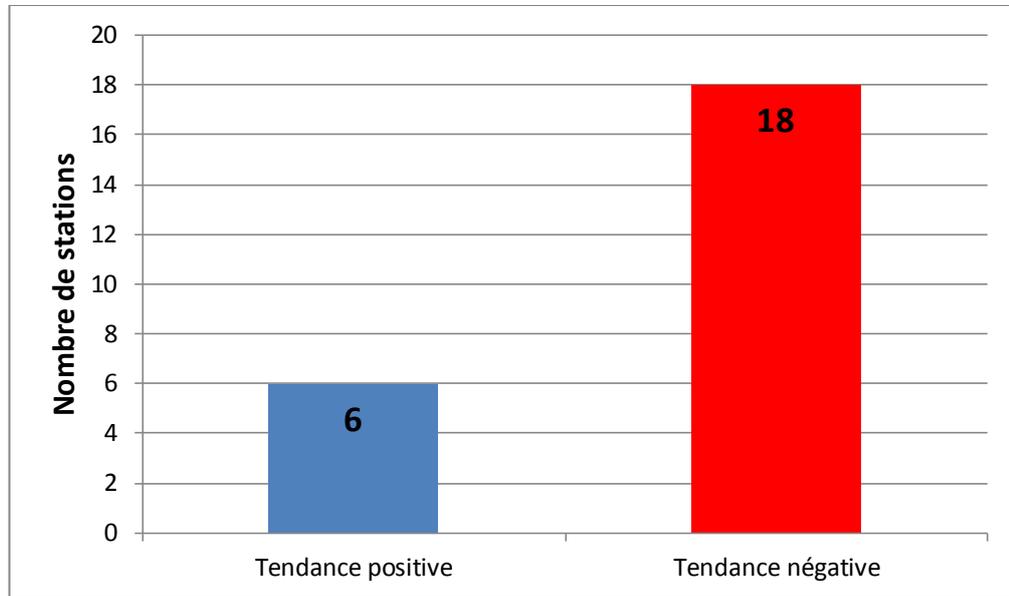


Figure 5.25 : Pluviométrie annuelle des stations étudiées

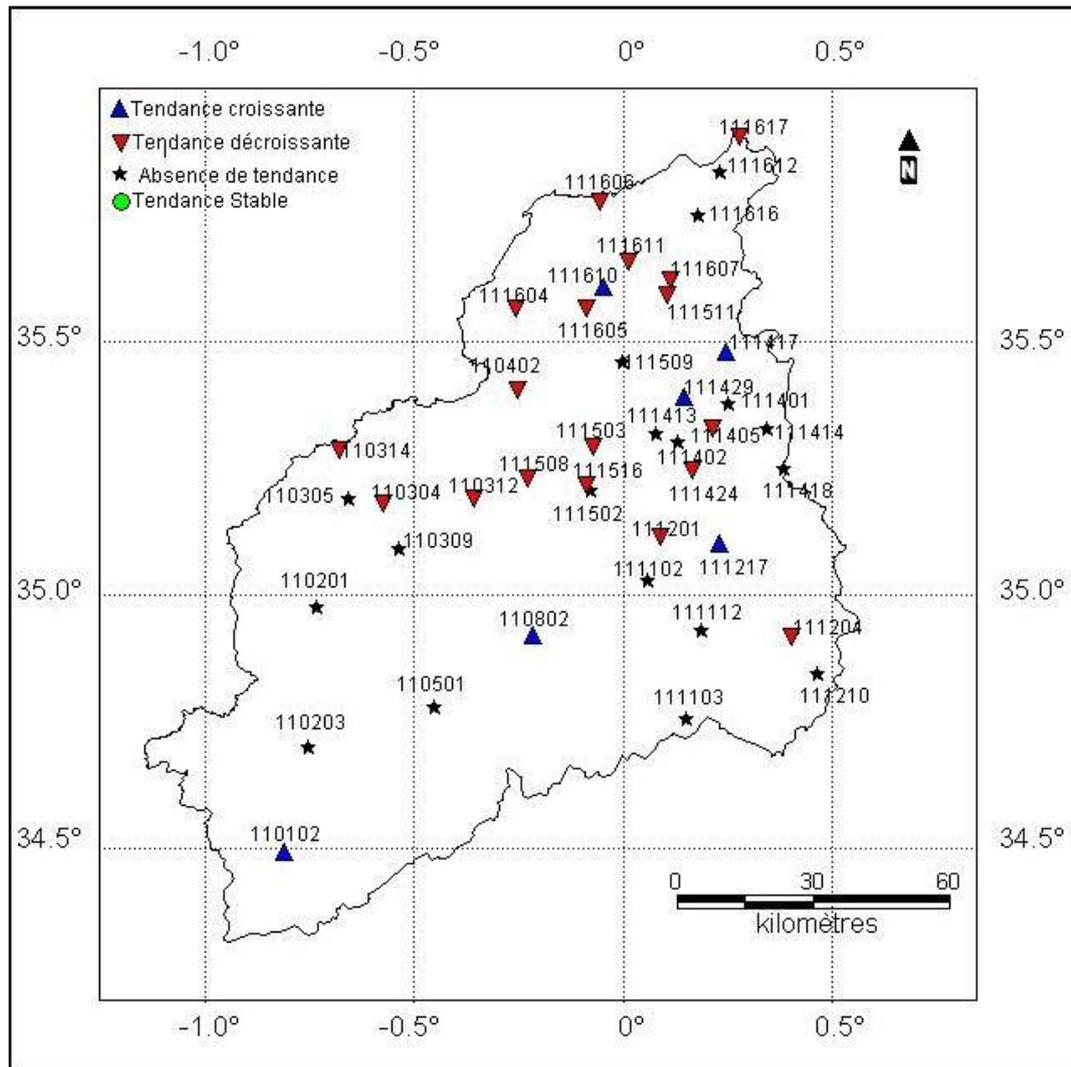
Les pentes des droites de tendances et leurs coefficients de corrélation sont calculés. Seuls les coefficients de corrélation de Pearson ( $r$ ) significatif (au seuil  $\alpha=0.10$  pour un test unilatéral) peuvent interpréter une tendance particulière.

Nous avons dénombré les stations ayant une tendance positive et celles ayant une tendance négative. La Figure 5.26 représente le nombre de station appartenant à chaque type de tendance.



**Figure 5.26 :** Nombre de stations pour chaque type de la tendance annuelle ( $r$  de Pearson)

D'après la Figure 5.26, le nombre de stations ayant une tendance positive est 18. Ceci représente un pourcentage de 43% des stations étudiées. Par contre les stations ayant une tendance négative sont au nombre de six, soit 14% des stations étudiées. Dans le cadre d'une analyse spatiale supplémentaire, les tendances des stations sont représentées sur la Figure 5.27.



**Figure 5.27 :** Carte de la tendance de la pluviométrie annuelle (r de Pearson)

La Figure 5.27 confirme l'hypothèse de la diminution de la pluviométrie. Les stations ayant une baisse sont situées principalement dans la région Centre Nord du bassin versant de la Macta. Les stations concernées sont Sarno Bge (110304), Mostefa Benbrahim (110312), Ain Trid (110314), Cheurfas Bge (110402), Oued Taria (111201), Ain Tifrit (111204), Matemore (111405), Ghriss (111424), Bouhanifia BGE (111503), Sfisseg (111508), Mohammadia GRHA (111511), Trois Rivières (111516), Oggaz (111604), Bouhenni (111605), Fornaka (111606), Samouria (111607), Ferme Blanche, (111611) et Ferme Assorain (111617). Cependant, les stations Ras Elma (110102), Daoud Youb (110802), Beniane (111217), Ain Fares (111417), Mascara (111429) et Mocta Douz (111610) ont des tendances croissantes.

#### 5.2.3.4. Conclusion

L'étude des tendances de la pluviométrie est une étape très importante pour toute planification d'actions ou d'adaptations pour minimiser les effets des changements climatiques.

La connaissance des tendances de la pluviométrie aide à avoir une quantification approximative du futur et donc de prendre toutes les dispositions nécessaires à l'avance.

L'étude de la tendance mensuelle a mis la lumière sur le mois de mars puisqu'il présente une tendance décroissante pour la majorité des stations étudiées (79%). La même tendance est remarquée pour le mois de mai et juin mais touchant un nombre plus faible de stations. La région Nord du bassin est influencée plus que la partie Sud. Ceci est dû au fait que la partie Nord reçoit une quantité plus élevée et donc dans le cas d'une réduction, elle sera plus sentie avec une pente plus élevée. Par contre, les mois d'août, septembre et novembre sont caractérisés par un régime pluviométrique à la hausse. Les mois de janvier, février, avril, juillet, octobre et décembre présentent une absence de la tendance de la majorité des stations. Nous pouvons l'expliquer par la grande variabilité temporelle de ces mois.

L'étude des tendances de la pluviométrie saisonnière par la méthode de la régression linéaire simple et la significativité du coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) ont permis d'avoir une idée sur les directions de l'évolution des stations étudiées. La saison de l'hiver est la plus touchée par la réduction de la pluviométrie. Cette diminution concerne toutes les zones du bassin versant de la Macta. La saison du printemps est marquée aussi par cette baisse mais affecte surtout la région Centre Nord. Contre toute attente, la saison de l'été décrit une direction positive de la pluviométrie de presque toutes les stations et toutes les régions.

Signalons que la station de Ghriss (111424) a une tendance décroissante dans la majorité des mois et des saisons.

L'étude de la tendance annuelle a confirmé l'hypothèse de la réduction de la pluviométrie. La majorité des stations étudiées (42%) ont des tendances annuelles décroissantes. Les stations de la partie Centre Nord sont les plus touchées par cette tendance.

### **5.3. Etude de la tendance par le test de Kendall**

#### **5.3.1. Introduction**

Les tests de tendance ont été d'un vif intérêt dans les sciences de l'environnement au cours des 10-15 dernières années. Le Tau ( $\tau$ ) de Kendall (Kendall, 1938 et Kendall, 1975) mesure la force de la relation monotone entre  $x$  et  $y$ . Le calcul du Tau est une procédure basée sur les rangs et est donc résistant à l'effet des valeurs exceptionnelles.

Le but du test de Kendall (MK) (Mann 1945, Kendall 1975, Gilbert, 1987) est d'évaluer statistiquement s'il y a une tendance monotone vers le haut ou vers le bas de la variable d'intérêt au fil du temps. Une tendance monotone croissante (décroissante) révèle que la variable augmente

(diminue) régulièrement à travers le temps. La tendance peut ou ne peut pas être linéaire. Le test MK peut être utilisé à la place d'une analyse de régression linéaire paramétrique. L'analyse de régression exige la normalité des résidus. Cette hypothèse n'est pas requise par le test MK, qui est, un test non-paramétrique (free distribution).

Hirsch, Slack et Smith (1982) indiquent que le test MK est mieux considérée comme une analyse exploratoire et est utilisée pour identifier les stations où les changements sont importants ou de grande ampleur et de quantifier ces résultats.

La valeur du  $\tau$  sera généralement plus faible que les valeurs du coefficient de corrélation traditionnelle  $r$ . Une corrélation linéaire forte de 0,9 ou plus correspond à une valeur du  $\tau$  d'environ 0,7. Ces valeurs plus basses ne signifient pas que le tau est moins sensible que  $r$ , mais simplement que l'échelle est différente.. Sa grande approximation de l'échantillon produit des valeurs de la probabilité critique (p-value) très proches des valeurs exactes, même pour des échantillons de petites tailles. Comme il est une méthode de corrélation de rang, le tau est invariant aux transformations de puissance monotones de l'une des deux variables. Par exemple, la valeur du  $\tau$  est identique pour la corrélation de  $\log(y)$  en fonction de  $\log(x)$ , de  $y$  en fonction de  $\log(x)$  et de  $y$  par rapport à  $x$  (Helsel and Hirsch, 2002).

### 5.3.2. Méthodologie

Le calcul du Tau est facilité par le rangement des pairs de valeurs, par ordre croissant de la variable  $x$ . Si une corrélation positive existe, les augmentations des  $y$  seront plus souvent que leurs diminution, à mesure que  $x$  augmente. Pour une corrélation négative, les diminutions des  $y$  seront plus fréquentes que leurs augmentation. Si aucune corrélation existe, le nombre des augmentations des  $y$  sera à peu près le même que celui des diminutions

Le test de Kendall essaye de rejeter l'hypothèse nulle ( $H_0$ : aucune tendance monotonique) et accepter l'hypothèse alternative ( $H_1$ : présence d'une tendance monotonique).

Le test commence à calculer le nombre de pairs concordantes ( $P$  = nombre de  $(x, y)$  ou  $y$  augmente à raison que  $x$  augmente) et discordantes ( $M$  = nombre de  $(x,y)$  ou  $y$  diminue à raison que  $x$  diminue). Le  $S$  de Kendall est la différence entre  $P$  et  $M$ .

Notons que nous avons  $C_n^2 = \frac{n!}{2!(n-2)!} = n(n-1)/2$  comparaisons possibles. Si

tous les  $y$  augmentent quand les  $x$  augmentent, la valeur de  $S$  sera égale à  $n(n-1)/2$ , et donc le  $\tau$  sera égale à  $+1$ . La situation inverse donnera un  $\tau = -1$ .

Le coefficient de corrélation de Kendall ( $\tau$ ) est calculé selon la formule :

$$\tau = \frac{S}{C_n^2} \quad (5.6)$$

Pour tester la significativité du  $\tau$ , pour  $n \leq 10$ , des tables des quantiles de Kendall offre des valeurs critiques ou des probabilités critiques.

### 5.3.2.1. Approximation des échantillons assez grands

Pour  $n > 10$ , la statistique du test peut être modifié pour être étroitement approximée par une distribution normale. L'erreur type pour le  $\tau$  de Kendall (en supposant que l'hypothèse nulle que  $x$  et  $y$  sont indépendants) est calculée par la formule

$$S_\tau = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2n+5}{C_n^2}} \quad (5.7)$$

La normalisation du  $\tau$  se fait selon l'équation (5.8)

$$Z = \frac{\tau}{S_\tau} = 3\tau \sqrt{\frac{C_n^2}{2n+5}} \quad (5.8)$$

L'hypothèse nulle est rejetée au niveau de signification  $\alpha$  si  $|Z| > Z_{crit}$  où  $Z_{crit}$  est la valeur de la distribution normale standard selon le type du test (bilatéral ou unilatéral).

#### 5.3.2.1.1. Traitement des ex-æquo<sup>1</sup>

Dans le cas où des ex-aequo existent, leurs différences seront égales à 0 (au lieu de + ou -). Ces différences ne contribuent ni à P ni à M. Le calcul du  $\tau$  doit être modifié. Donc la formule (5.6) devient :

$$\tau = \frac{S}{\sqrt{(C_n^2 - n_x)(C_n^2 - n_y)}} \quad (5.9)$$

Où  $n_x$  est le nombre des ex-aequo dans la variable  $x$  et  $n_y$  est le nombre des ex-aequo dans la variable  $y$ . Cette version de tau de Kendall est souvent appelée tau-b ( $\tau_b$ ) (au lieu de la version précédente qui est appelée tau-a).

<sup>1</sup>Avec le même rang dans un classement, à égalité.

### 5.3.3. Résultats et discussion

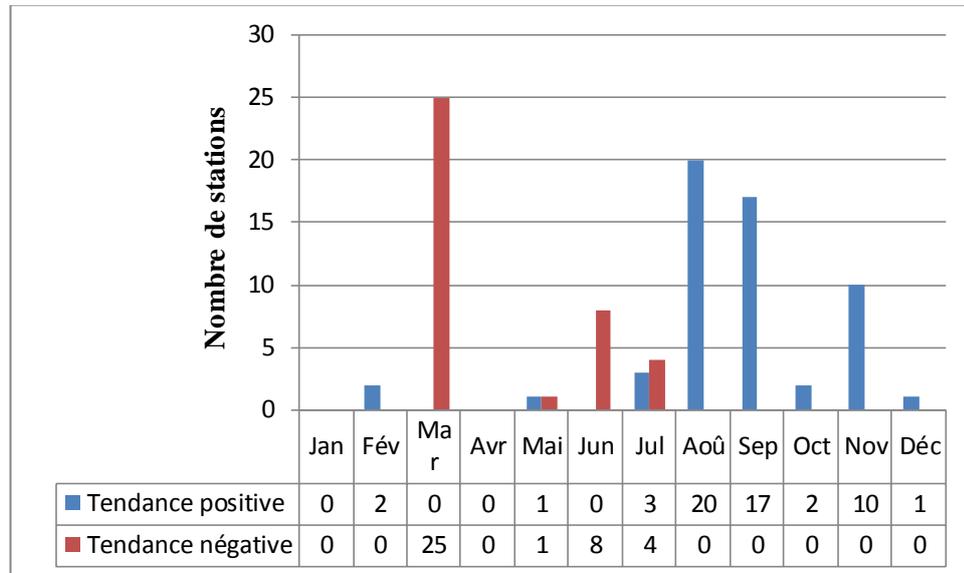
#### 5.3.3.1 Etude de la tendance mensuelle

Nous avons appliqué le test de Kendall sur les données de la pluviométrie mensuelle pour chaque station et chaque mois. Nous avons calculé le  $\tau$  de Kendall et la valeur du Z (la normalisation du  $\tau$ ). Nous avons déterminé les cas où l'hypothèse  $H_0$  peut être rejetée (valeurs de la statistique du test appartient à la région critique). Ces cas dévoilent l'existence de tendance positive ou négative selon le signe du  $\tau$ . Le Tableau 5.8 indique le signe de la tendance des stations pour chaque mois.

**Tableau 5.8 :** Signe de la tendance selon le test de Kendall

Code	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
110102	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	+						
110201	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	-	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
110203	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune						
110304	Aucune	Aucune	-	Aucune								
110305	Aucune	Aucune	-	Aucune								
110309	Aucune	Aucune	-	Aucune								
110312	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
110314	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
110402	Aucune	Aucune	-	Aucune	+	Aucune						
110501	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	+	Aucune	Aucune
110802	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	+	+	Aucune	Aucune
111102	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune						
111103	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
111112	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
111201	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111204	Aucune	Aucune	-	Aucune								
111210	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune						
111217	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune
111401	Aucune	+	+	Aucune	+	Aucune						
111402	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune						
111405	Aucune	Aucune	-	Aucune								
111413	Aucune	Aucune	-	Aucune								
111414	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	+	Aucune	Aucune	Aucune
111417	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	Aucune						
111418	Aucune											
111424	Aucune											
111429	Aucune	+	+	Aucune	+	Aucune						
111502	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune
111503	Aucune	Aucune	-	Aucune								
111508	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	-	-	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111509	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	Aucune
111511	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	Aucune
111516	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111604	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	Aucune	+	Aucune
111605	Aucune	Aucune	-	Aucune								
111606	Aucune	Aucune	-	Aucune	-	-	-	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
111607	Aucune	Aucune	-	Aucune								
111610	Aucune	+	Aucune	Aucune	+	Aucune	+	+	+	Aucune	+	Aucune
111611	Aucune	Aucune	-	Aucune	+	Aucune						
111612	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune							
111616	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	+	Aucune	+	Aucune
111617	Aucune	Aucune	-	Aucune	Aucune	-	Aucune	+	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune

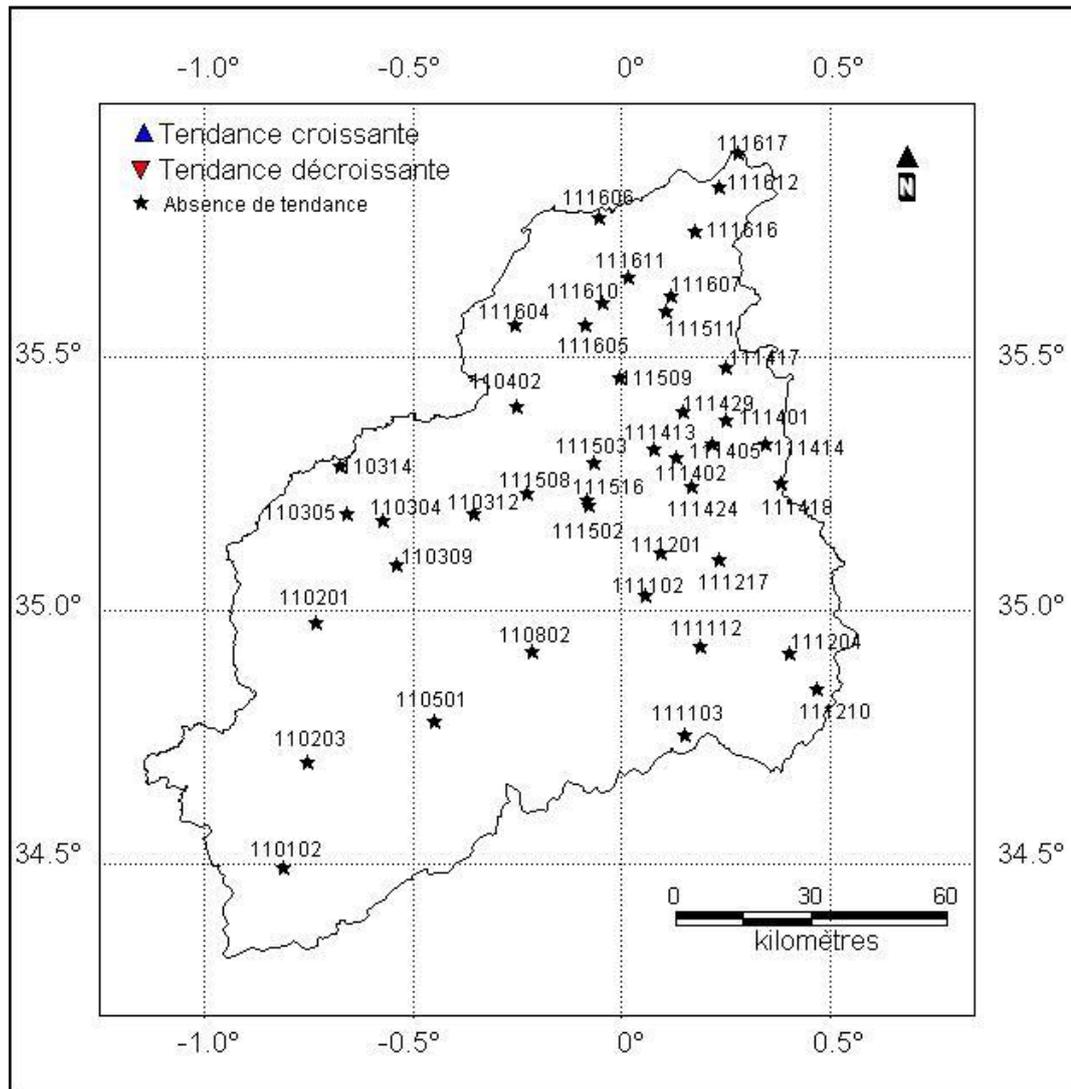
L'examen du Tableau 5.8 montre que la majorité des stations ont une tendance décroissante pour le mois de mars, tandis que le mois d'aout contient le plus grand nombre ayant une tendance croissante. La Figure 5.28 affiche le nombre de stations par mois pour chaque sens de tendance.



**Figure 5.28 :** Nombre de stations par type de tendance ( $\tau$  de Kendall)

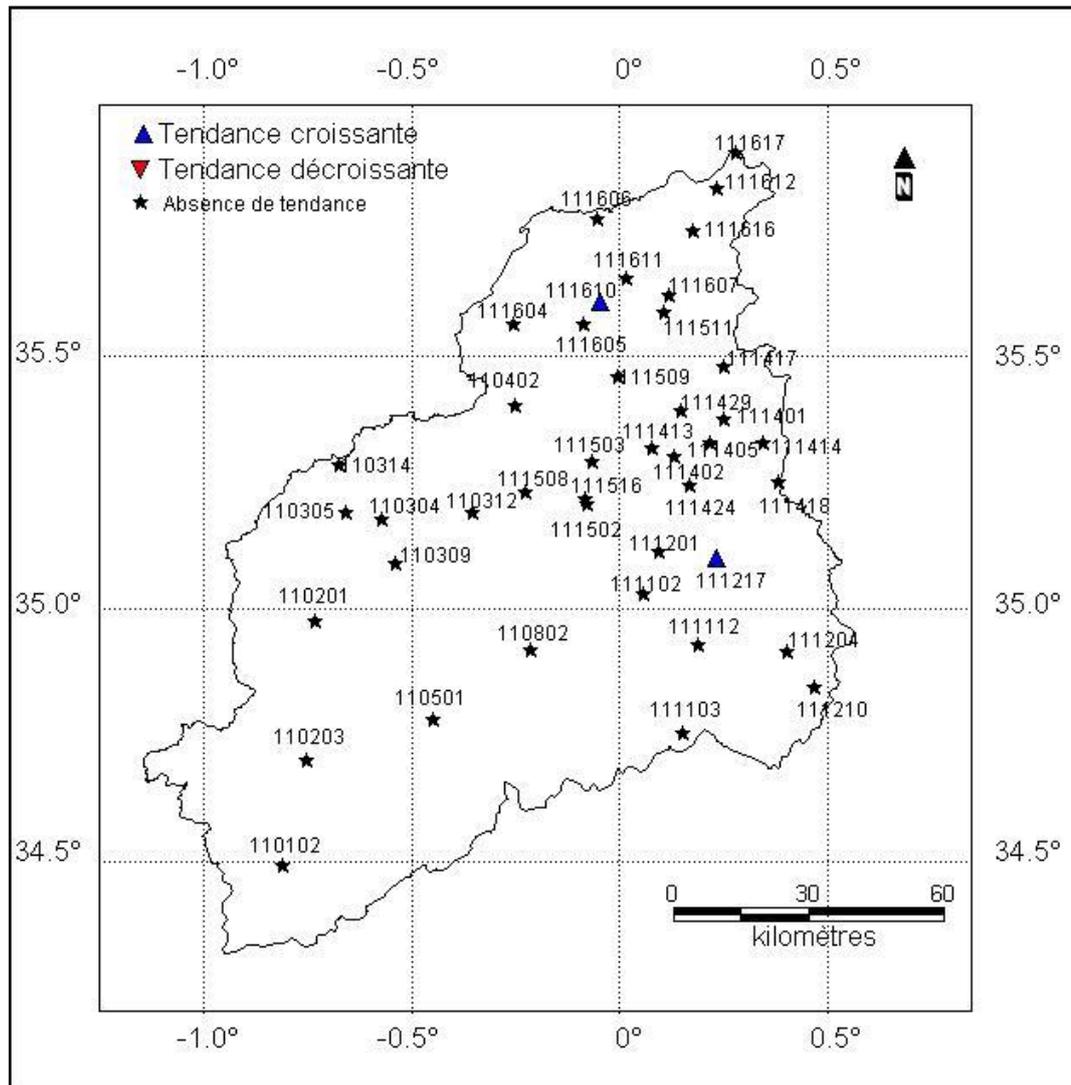
L'analyse de la Figure 5.28 montre que le mois de mars est le plus touché par la diminution de la pluviométrie avec 25 stations (soit près de 60% des stations). Cependant le mois d'aout et septembre sont affectés par des augmentations avec respectivement 20 (48%) et 17 (40%) stations.

L'utilisation des cartes nous permet d'avoir une idée spatiale sur les tendances (Figure 5.29 à Figure 5.40).



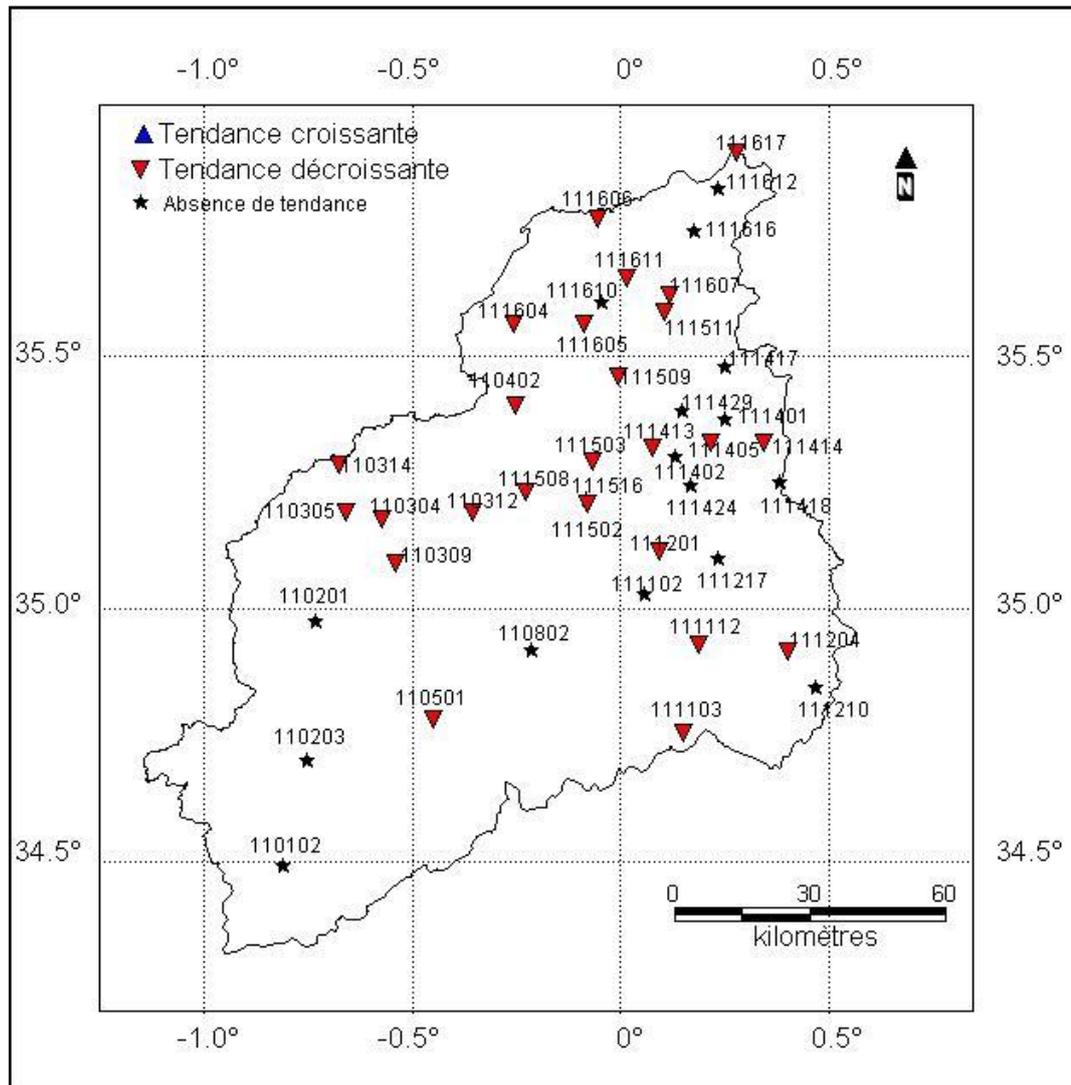
**Figure 5.29** : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de janvier)

La Figure 5.29 ne montre aucune tendance pour le mois de janvier. Toutes les stations s'accordent sur cette caractéristique. Toutes les valeurs du Z appartiennent à la zone d'acceptation et donc aucune d'entre elles ne permet de rejeter l'hypothèse de non existence d'une tendance.



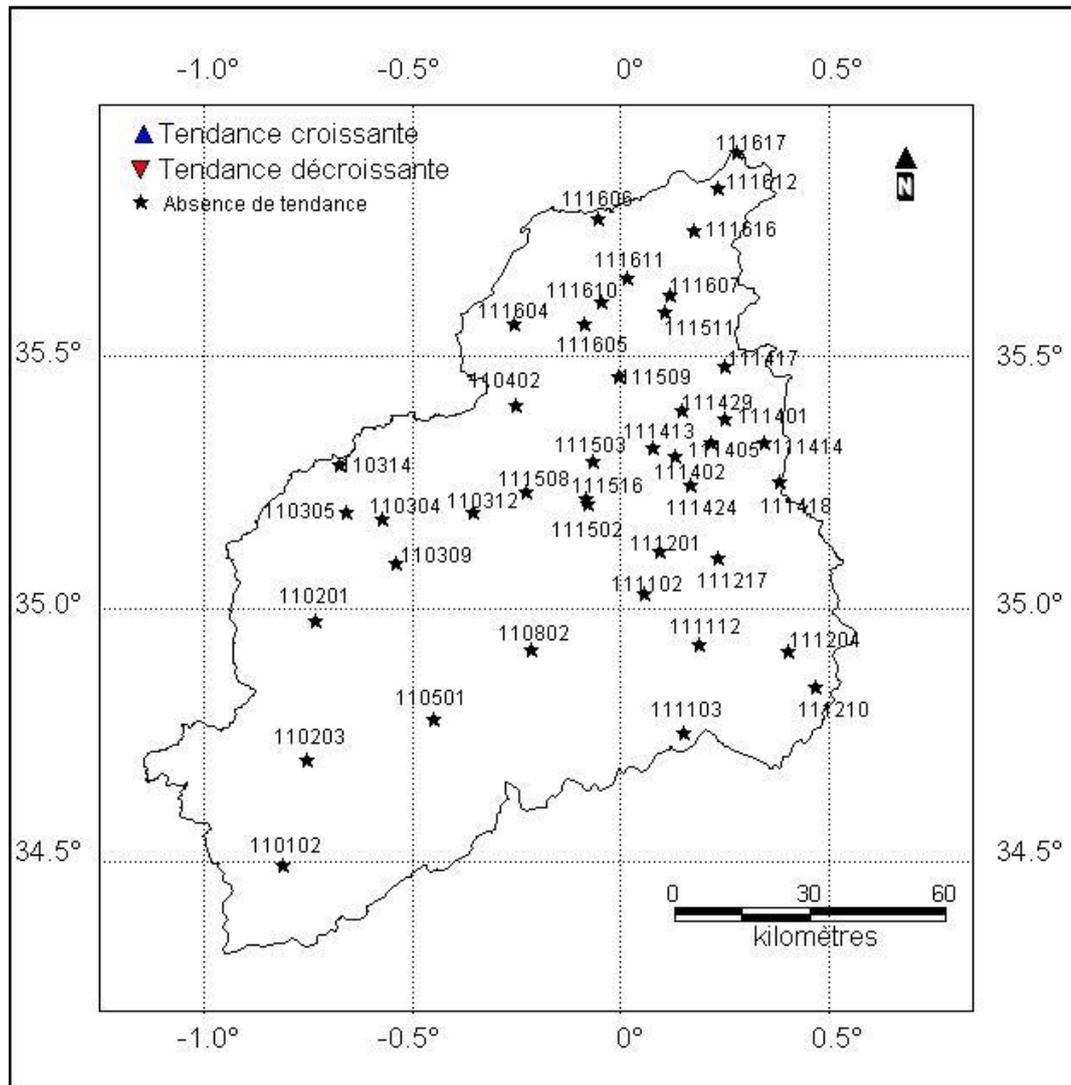
**Figure 5.30 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de février)

La carte des tendances du mois de février est presque similaire que celle du mois de janvier, où la majorité des stations n'ont pas de tendance perceptible. Seule les stations Beniane (111217) et Mocta Douz (111610) ont une tendance croissante.



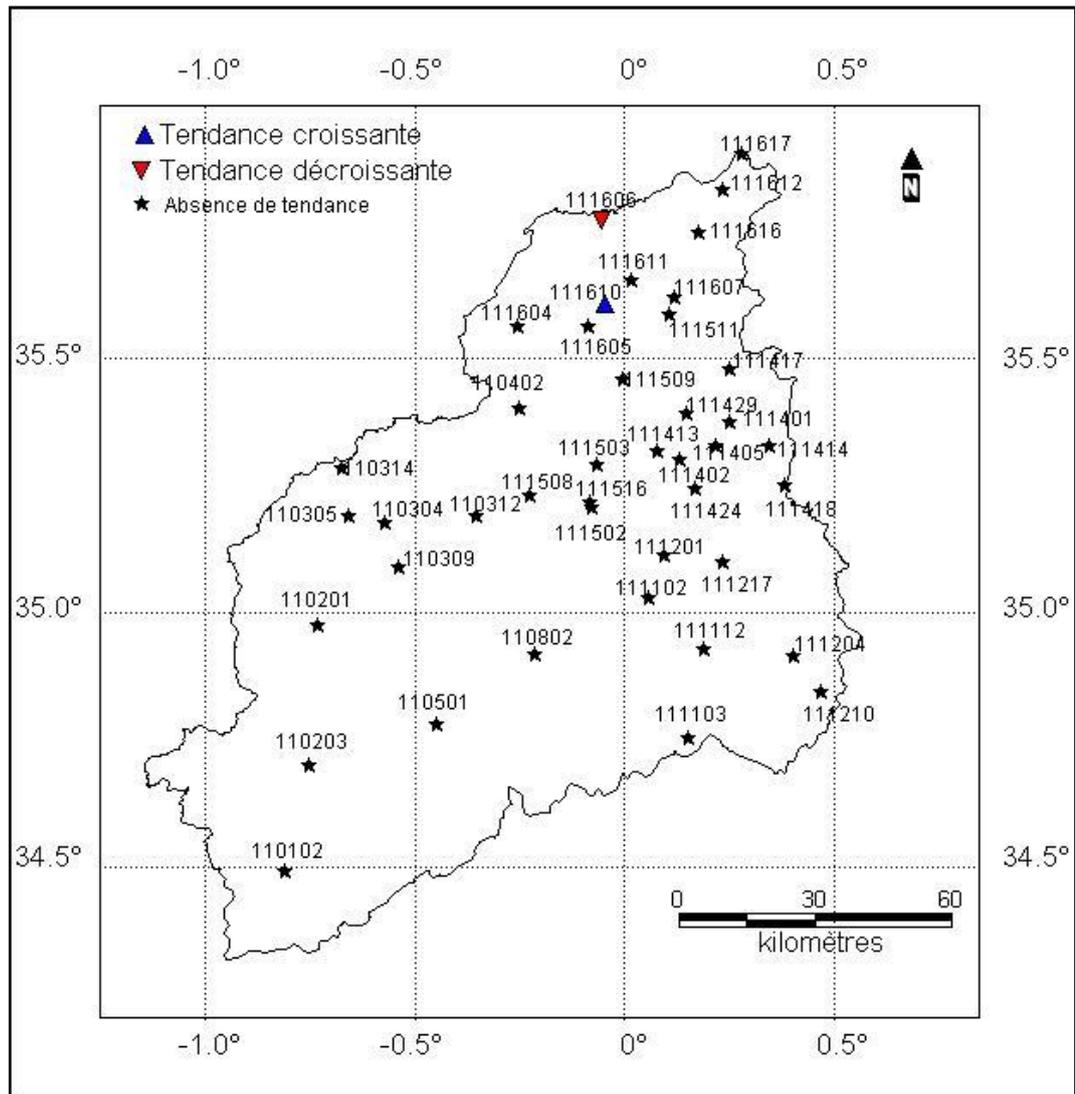
**Figure 5.31 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de mars)

La majorité des stations du mois de mars ont une tendance décroissante. Les stations concernées sont Sarno Bge (110304), Sidi Belabbes (110305), Hassi Daho (110309), Mostefa Benbrahim (110312), Ain Trid (110314), Cheurfas Bge (110402), Merine (110501), Ain El Hadjar (111103), Hammam Rabi (111112), Oued Taria (111201), Ain Tifrit (111204), Matemore (111405), Tizi (111413), Sidi Kada (111414), Sahouat Ouizert (111502), Bouhanifia BGE (111503), Sfisseg (111508), Hacine (111509), Mohammadia GRHA (111511), Oggaz (111604), Bouhenni (111605), Fornaka (111606), Samouria (111607), Ferme Blanche (111611) et Ferme Assorain (111617). Aussi nous remarquons qu'aucune station n'a de tendance croissante. Du point de vue spatial, toutes les régions sont touchées par cette diminution.



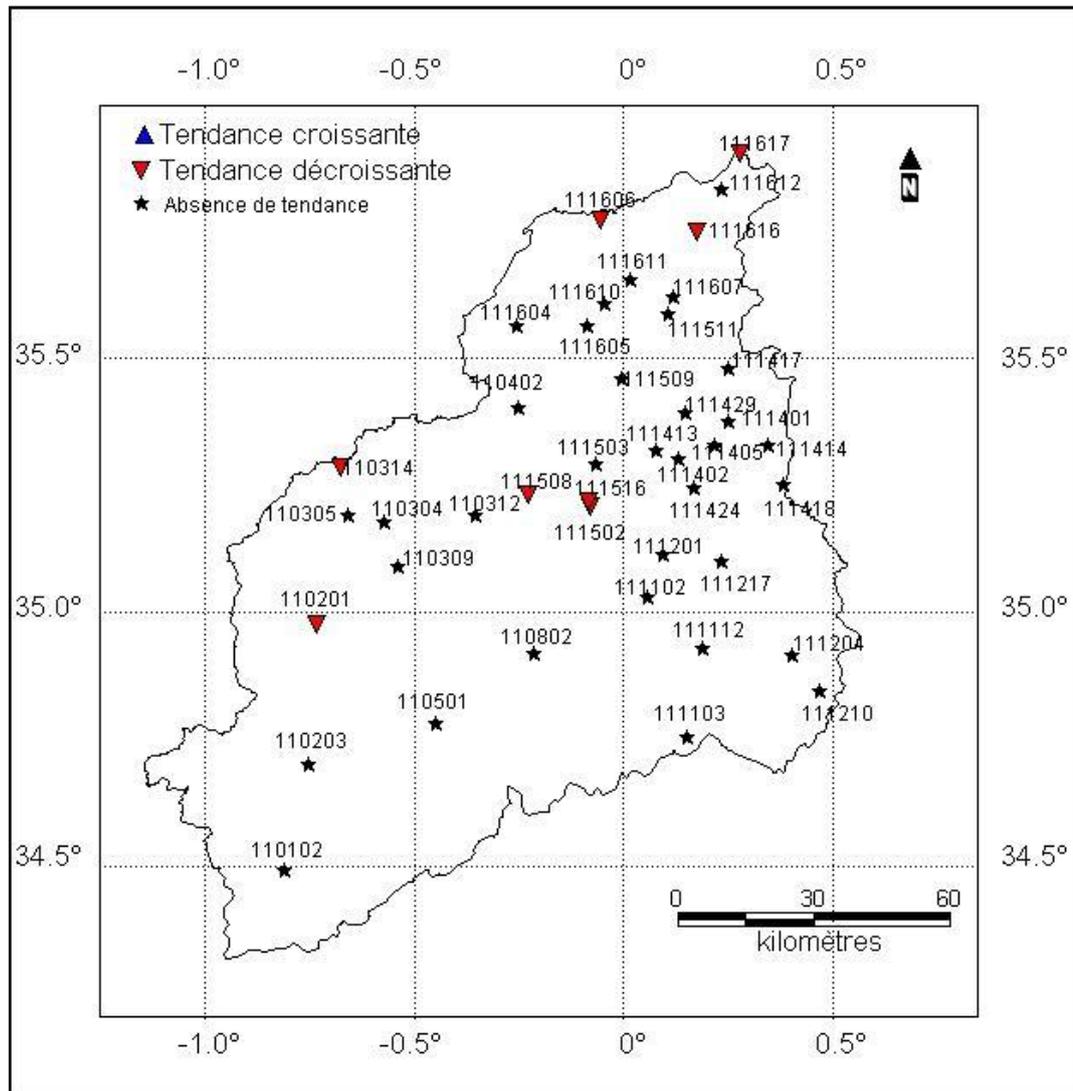
**Figure 5.32 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois d'avril)

La Figure 5.32 affiche l'absence de tendance de toutes les stations durant le mois d'avril. Toutes les valeurs du Z appartiennent à la zone d'acceptation.



**Figure 5.33 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de mai)

La constatation précédente peut être faite pour la Figure 5.33 où presque toutes les stations n'ont pas de tendance. Signalons la particularité de la station Mocta Douz (111610) qui a une augmentation de la pluviométrie alors que la station Fornaka (111606) a une diminution.



**Figure 5.34 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de juin)

La carte des tendances du mois de juin indique la non tendance de toutes les stations à l'exception de Sidi Ali Benyoub (110201), Ain Trid (110314), Sahouat Ouizert (111502), Sfisef (111508), Trois Rivières (111516), Fornaka (111606), Marais de Sirat (111616) et Ferme Assorain (111617) qui ont une décroissance. La dispersion spatiale de ces stations ne permet pas d'avoir une explication géographique.

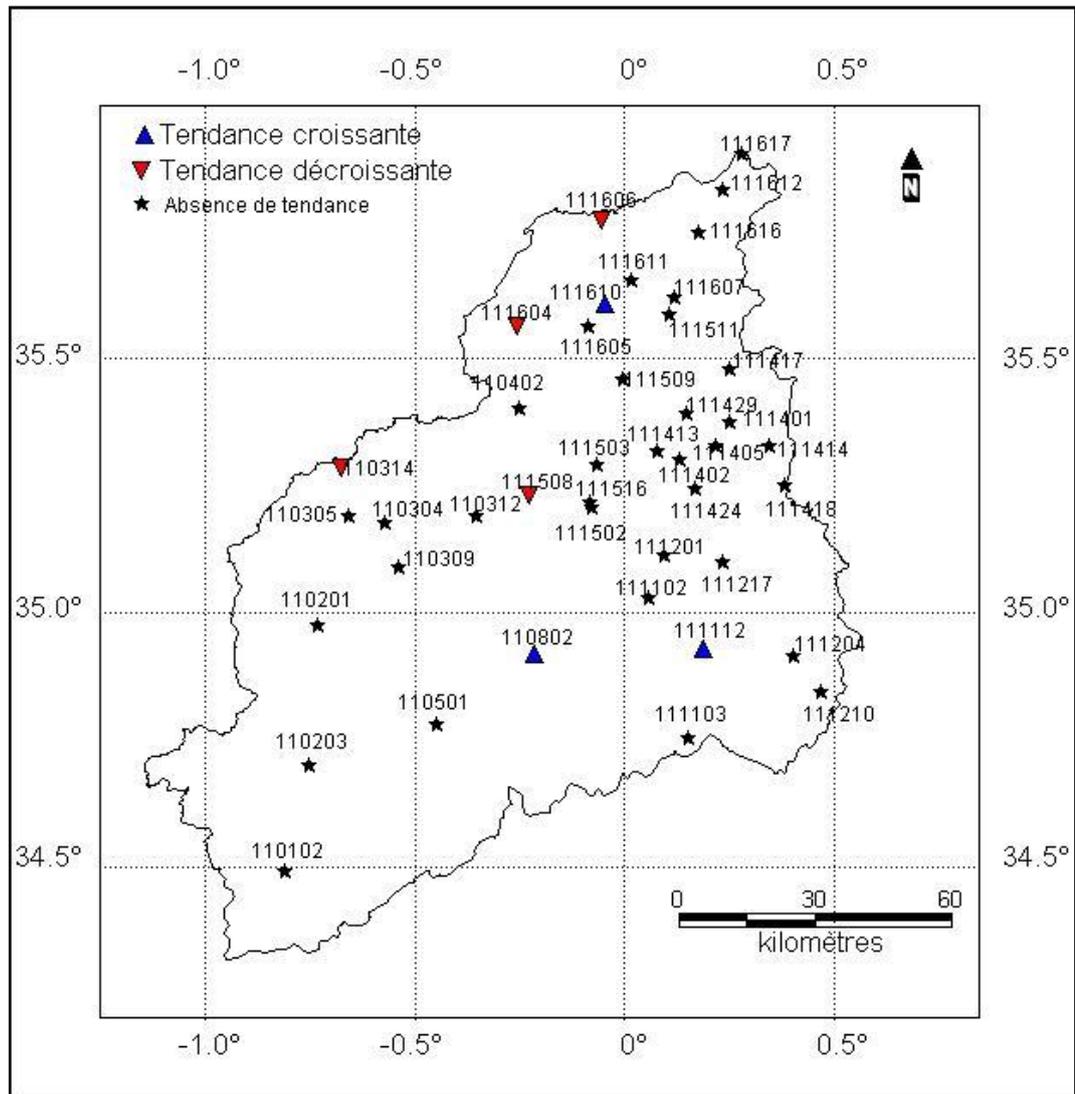
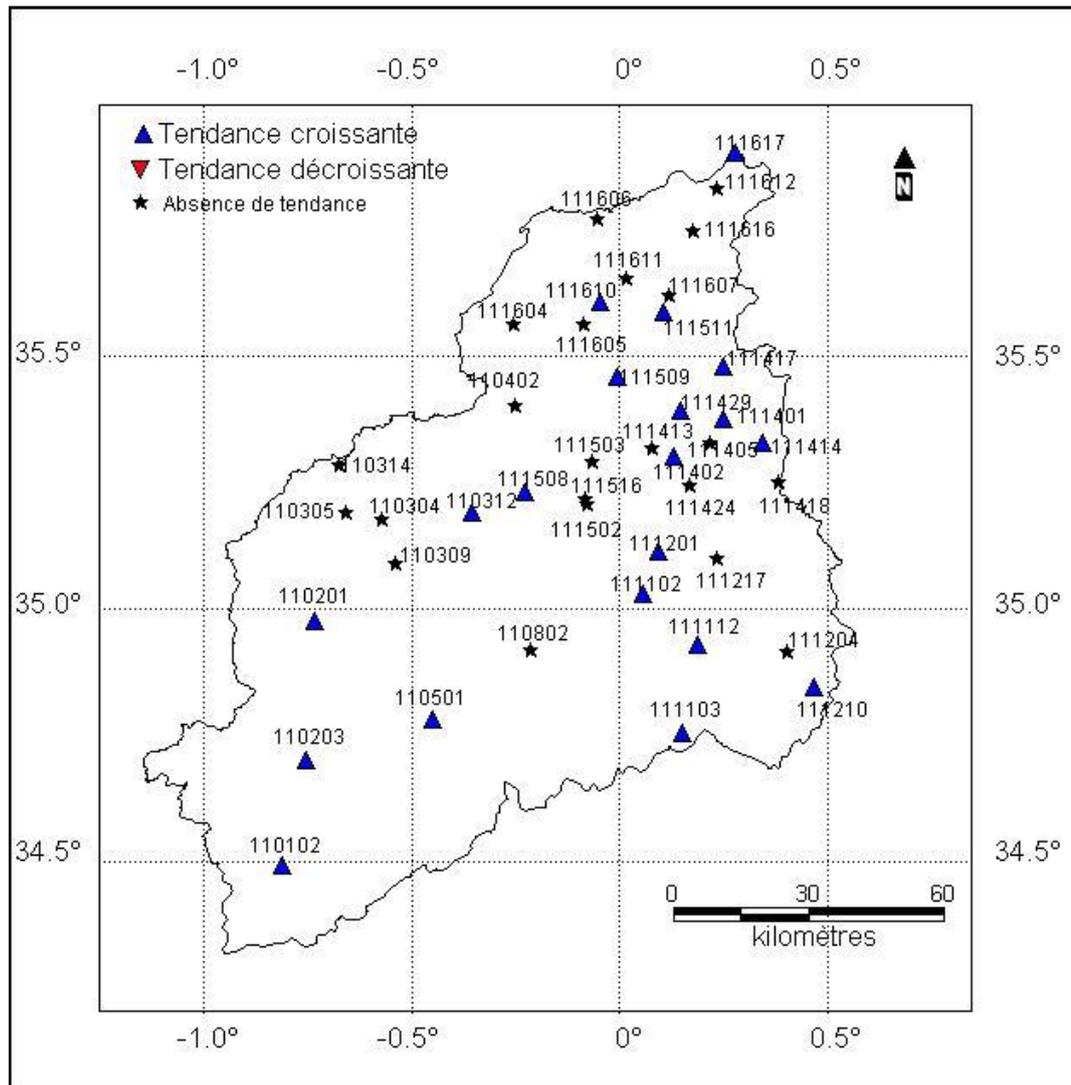


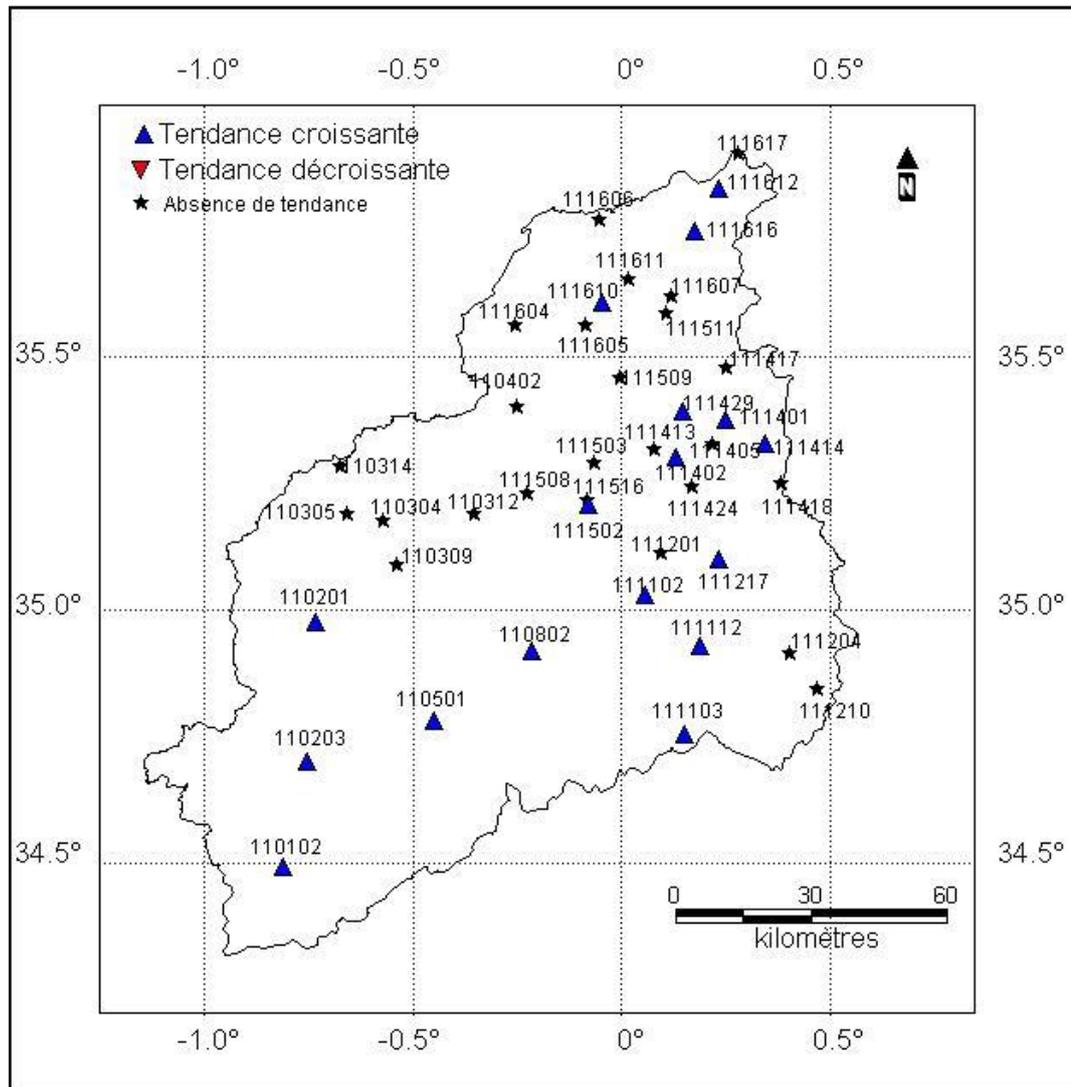
Figure 5.35 : Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de juillet)

La plus part des stations n'ont pas de direction clair de leurs pluviométrie. Hormis les stations Ain Trid (110314), Sfisseg (111508), Oggaz (111604) et Fornaka (111606) qui sont en diminution et les stations de Daoud Youb (110802), Hammam Rabi (111112) et Mocta Douz (111610) qui affichent une augmentation.



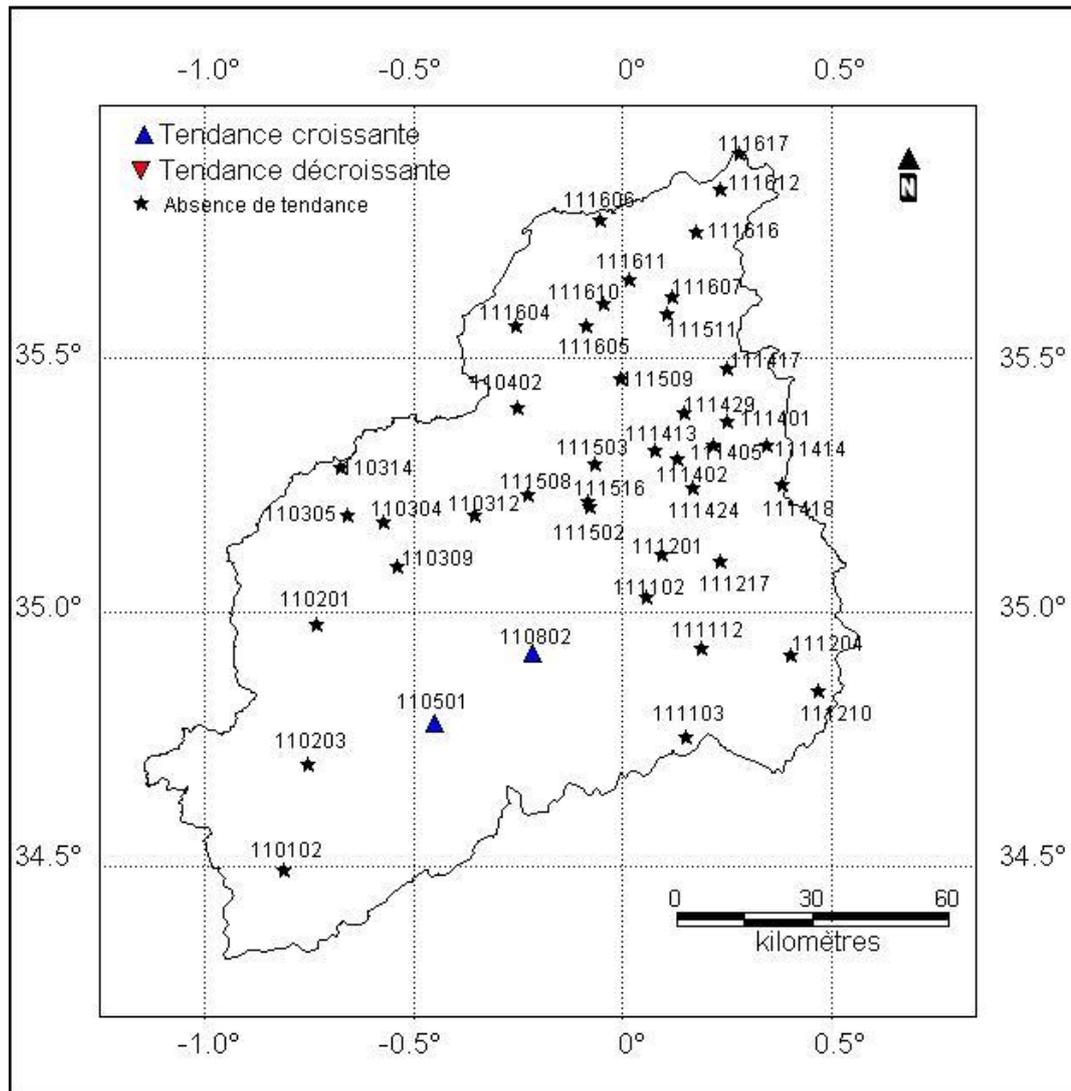
**Figure 5.36 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois d'août)

Le mois d'août, à l'encontre du mois de mars, possède l'aspect de tendance croissante de la majorité des stations. Celles ayant ce trait sont Ras Elma (110102), Sidi Ali Benyoub (110201), El Hacaiba (110203), Mostefa Benbrahim (110312), Merine (110501), Meftah Sidi Boubekeur (111102), Ain El Hadjar (111103), Hammam Rabi (111112), Oued Taria (111201), Tamesna (111210), Maoussa (111401), Froha (111402), Sidi Kada (111414), Ain Fares (111417), Mascara (111429), Sfisef (111508), Hacine (111509), Mohammadia GRHA (111511), Mocta Douz (111610) et Ferme Assorain (111617). Cette situation affecte toutes les zones du bassin versant de la Macta.



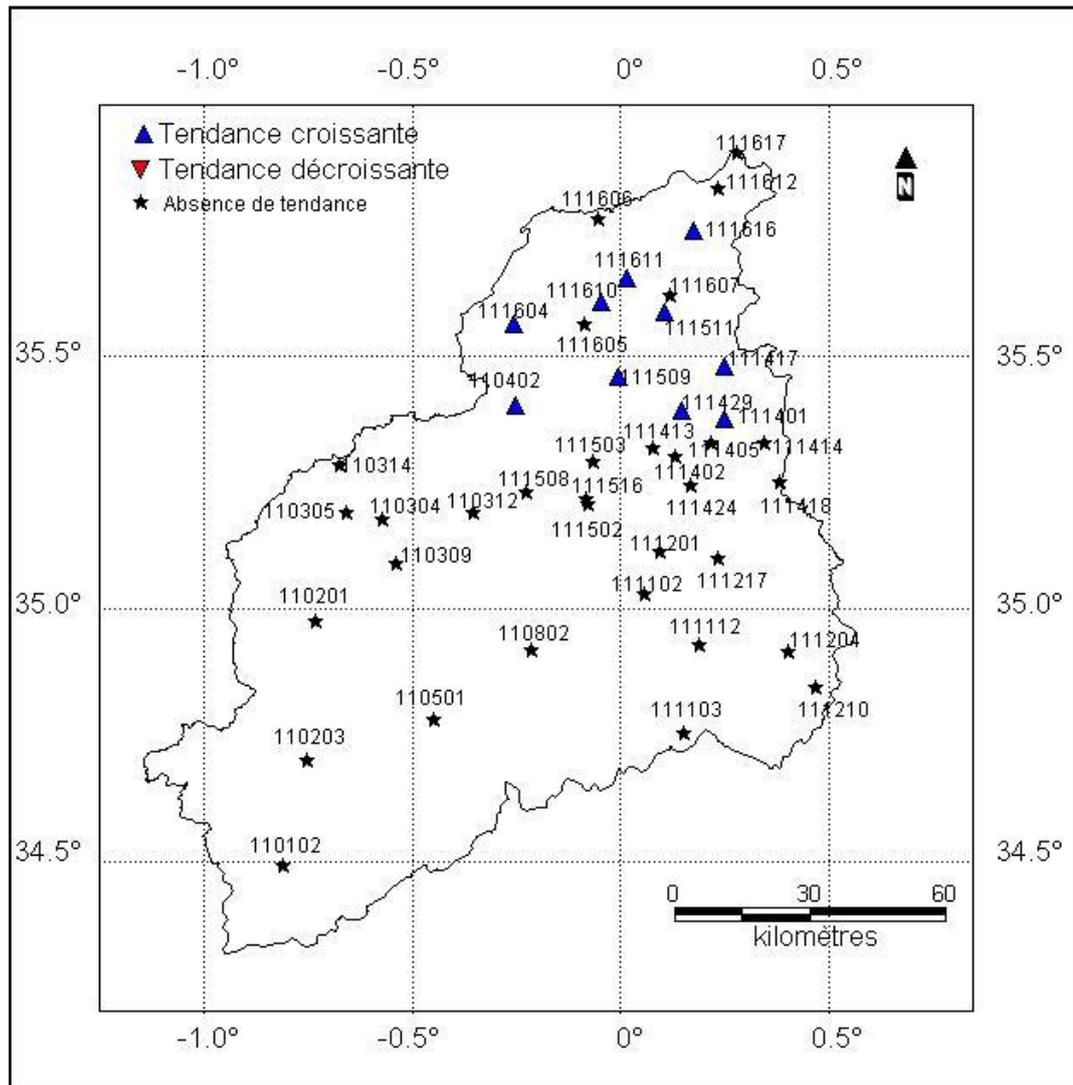
**Figure 5.37 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de septembre)

Le mois de septembre, représenté par la Figure 5.37 affiche aussi des tendances croissantes majoritaires. Les stations affectées sont Ras Elma (110102), Sidi Ali Benyoub (110201), El Hacaiba (110203), Merine (110501), Daoud Youb (110802), Meftah Sidi Boubekeur (111102), Ain El Hadjar (111103), Hammam Rabi (111112), Beniane (111217), Maoussa (111401), Froha (111402), Sidi Kada (111414), Mascara (111429), Sahouat Ouizert (111502), Mocta Douz (111610), Bled Taouria (111612) et Marais de Sirat (111616). Aucune station n'affiche une décroissance de la pluviométrie. Nous remarquons que les stations situées au Nord-Ouest du bassin n'ont pas d'augmentation.



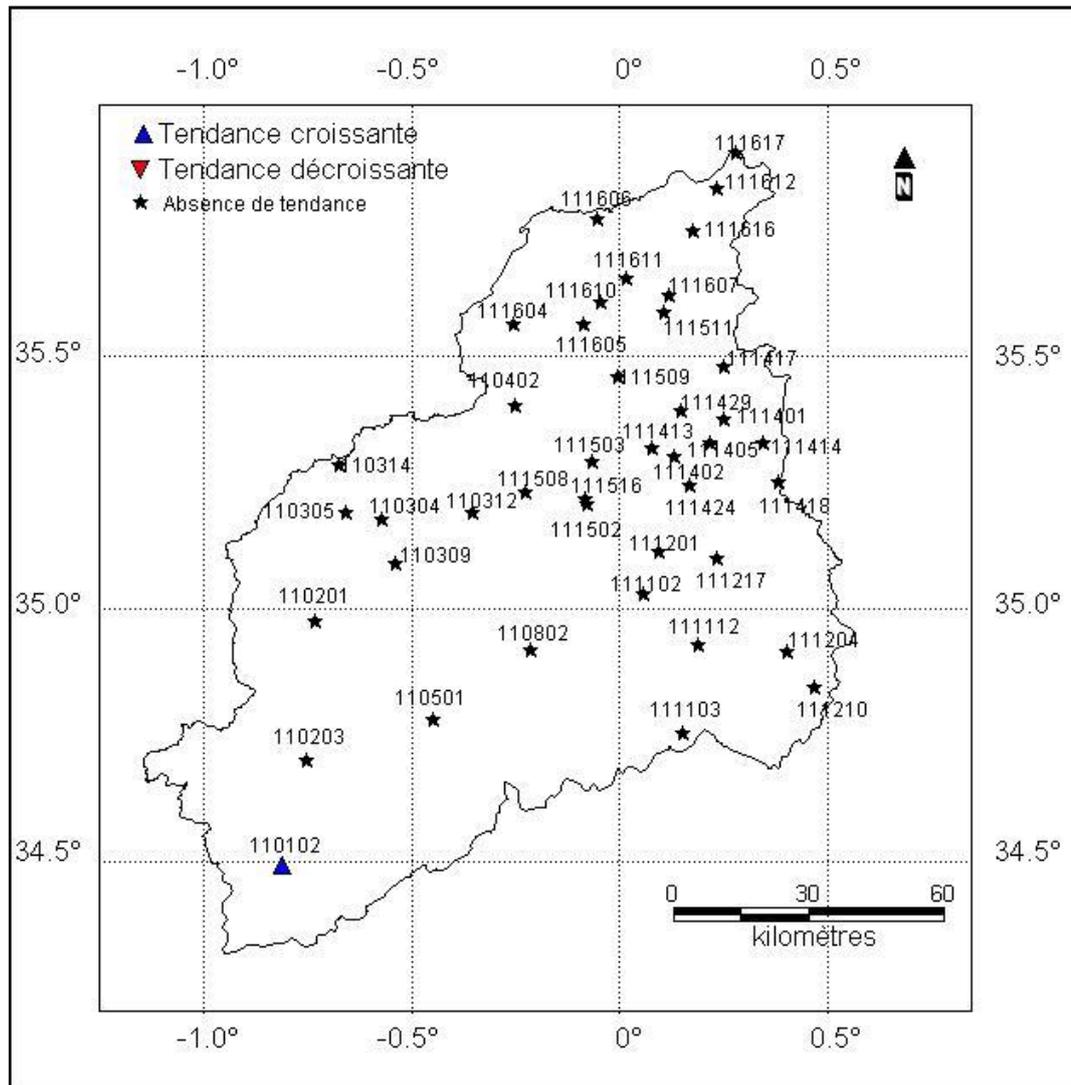
**Figure 5.38 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois d'octobre)

L'absence de tendance touche presque toutes les stations du mois d'octobre. A l'exception des stations Merine (110501) et Daoud Youb (110802) qui ont une élévation de la pluviométrie mensuelle.



**Figure 5.39 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de novembre)

La Figure 5.39 montre une hausse de la pluviométrie pour les stations Nord du bassin de la Macta. Ce sont Cheurfas Bge (110402), Maoussa (111401), Ain Fares (111417), Mascara (111429), Hacine (111509), Mohammadia GRHA (111511), Oggaz (111604), Mocta Douz (111610), Ferme Blanche (111611) et Marais de Sirat (111616). Toutes les stations du Sud n'ont pas de tendance claire.



**Figure 5.40 :** Carte des tendances selon le test de Kendall (mois de décembre)

Le mois décembre présente une absence de tendance de toutes les stations sauf Ras Elma (110102) qui a une croissance de sa pluviométrie.

### 5.3.3.1.1. Conclusion

Nous avons étudié les tendances mensuelles de 42 stations en utilisant le test de Kendall. Le mois de mars présente la particularité de la décroissance de la majorité des stations. En effet 25 stations (environ 60%) ont une tendance décroissante. Nous remarquons le même phénomène pour le mois de juin mais avec un nombre plus faible (8 stations soit 19%).

Les mois d'aout, septembre et novembre sont caractérisés par un régime pluviométrique à la hausse avec un nombre de stations respectif de 20 (48%), 17 (40%) et 10 (24%).

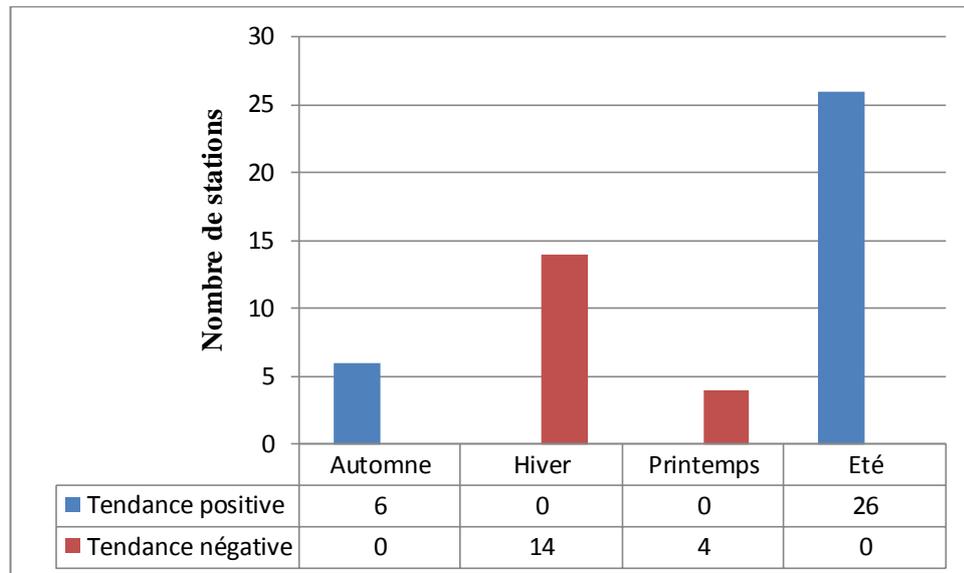
Les mois de janvier, février, avril, mai, juillet, octobre et décembre présentent une absence de la tendance de la majorité des stations.

Aussi, la station de Ghriss (111424) a une tendance décroissante dans la majorité des mois.

Cette tendance décroissante de la majorité des mois influe-t-elle sur la tendance saisonnière ? C'est ce que nous essayons d'étudier dans la partie suivante.

### 5.3.3.2. Etude de la tendance saisonnière

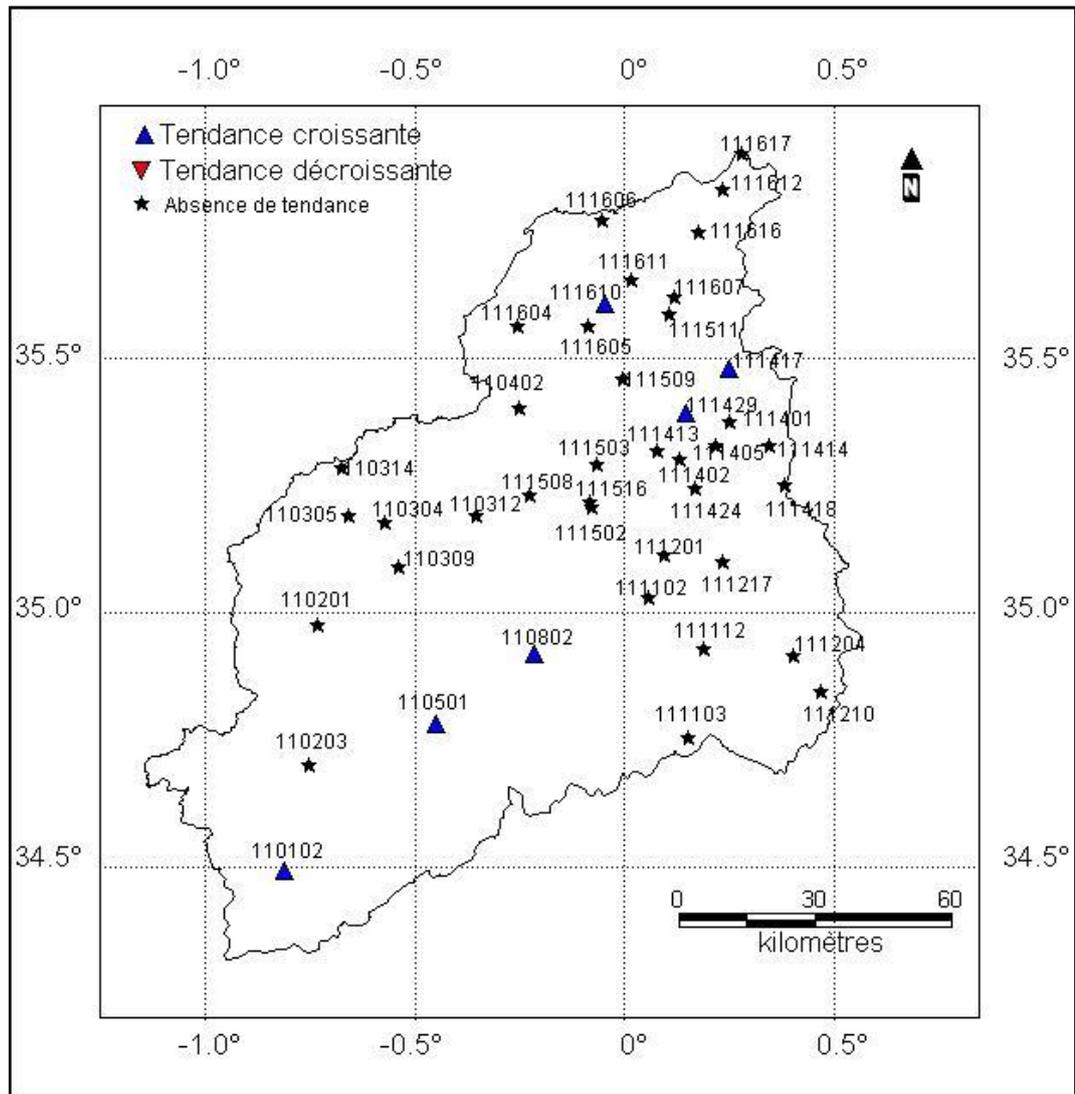
Suivant le même principe nous avons calculé les  $\tau$  de Kendall pour les pluviométries saisonnières. Puisque c'est des échantillons assez grand ( $n > 10$ ) l'approximation à la loi normale a été utilisée. L'appartenance, ou non, de la valeur du Z à la zone de rejet détermine l'existence, ou non, d'une tendance. Nous avons appliqué un test unilatéral avec un seuil de signification de 0.10. Le nombre de stations ayant une tendance particulière est résumé sur la Figure 5.41.



**Figure 5.41** : Nombre de stations de la tendance saisonnière ( $\tau$  de Kendall)

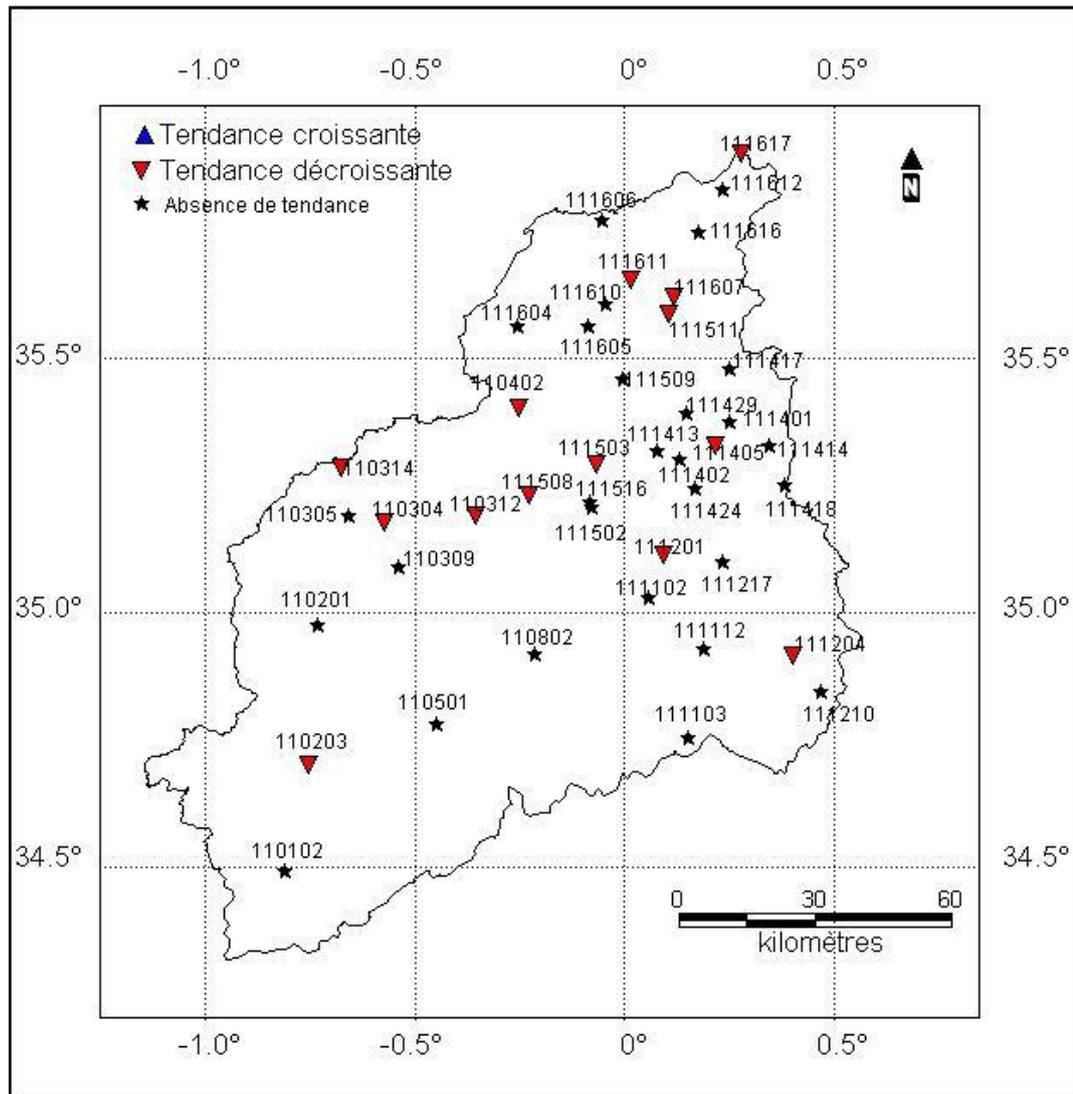
Nous pouvons distinguer un nombre élevé de stations ayant une augmentation de la pluviométrie durant la saison de l'été (26 stations soit 62%). La saison d'hiver attire aussi l'attention avec 14 stations (33%) ayant une diminution de leurs pluviométries. Les deux autres saisons ne font pas l'objet de remarques particulières puisque la plus grande partie des stations n'ont aucune tendance.

Des cartes pour visualiser la position des stations et pour détecter les tendances spatiales ont été réalisées (Figure 5.42 à Figure 5.45)



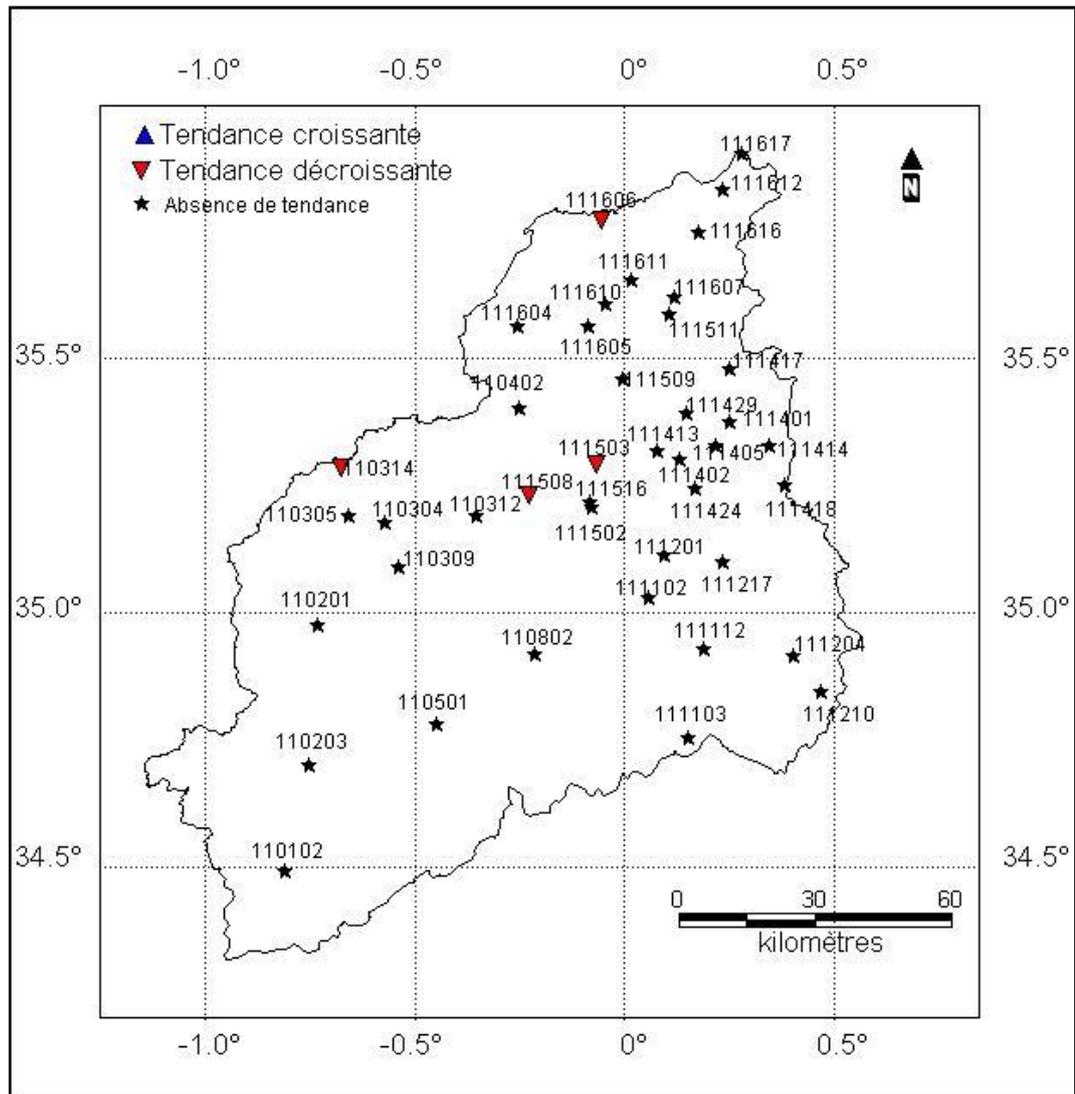
**Figure 5.42 :** Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'automne ( $\tau$  de Kendall)

La saison de l'automne ne présente pas de tendance importante. Quelques stations ont des augmentations de la pluviométrie saisonnière. Il s'agit de Ras Elma (110102), Merine (110501), Daoud Youb (110802), Ain Fares (111417), Mascara (111429) et Mocta Douz (111610). La distribution spatiale de ces stations ne donne aucune information supplémentaire.



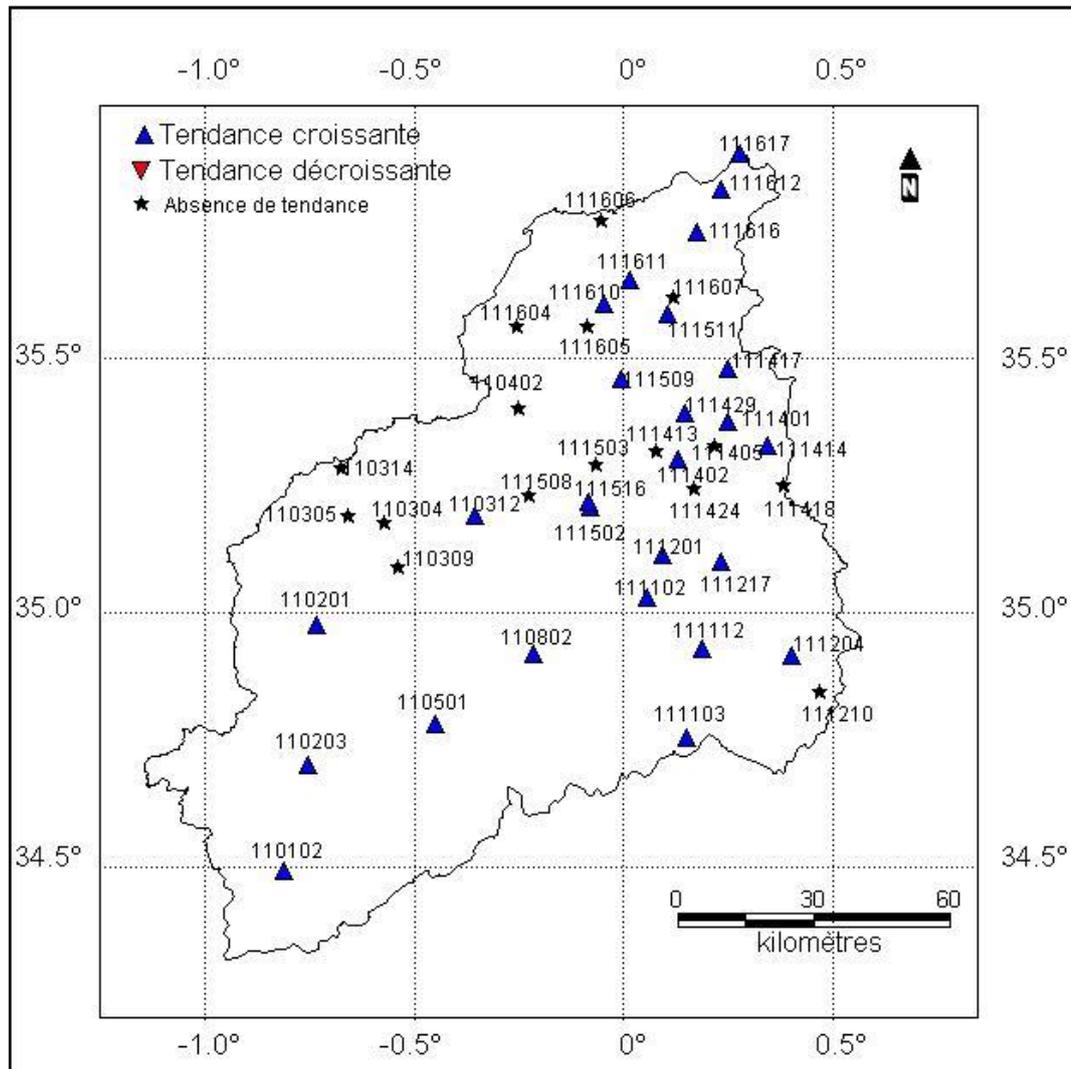
**Figure 5.43 :** Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'hiver ( $\tau$  de Kendall)

La saison d'hiver est caractérisée par la diminution de la pluviométrie d'un nombre de stations non négligeable. Elles sont au nombre de 14 (soit 33%). Les stations affectées sont El Hacaiba (110203), Sarno Bge (110304), Mostefa Benbrahim (110312), Ain Trid (110314), Cheurfas Bge (110402), Oued Taria (111201), Ain Tifrit (111204), Matemore (111405), Bouhanifia BGE (111503), Sfisseg (111508), Mohammadia GRHA (111511), Samouria (111607), Ferme Blanche (111611) et Ferme Assorain (111617). Ces stations sont surtout localisées au Centre-Nord du bassin de la Macta.



**Figure 5.44 :** Carte des tendances de la pluviométrie de la saison du printemps ( $\tau$  de Kendall)

La saison du printemps est majoritairement représentée par l'absence de la tendance. A l'exception des stations de Ain Trid (110314), Bouhanifia BGE (111503), Sfisef (111508) et Fornaka (111606) qui ont une tendance décroissante.



**Figure 5.45 :** Carte des tendances de la pluviométrie de la saison de l'été ( $\tau$  de Kendall)

La saison de l'été, à l'opposé de l'hiver, est généralement définie par une tendance croissante. Cette dernière touche 26 stations (62%). Nous remarquons l'absence de tendance dans le côté Nord-Ouest.

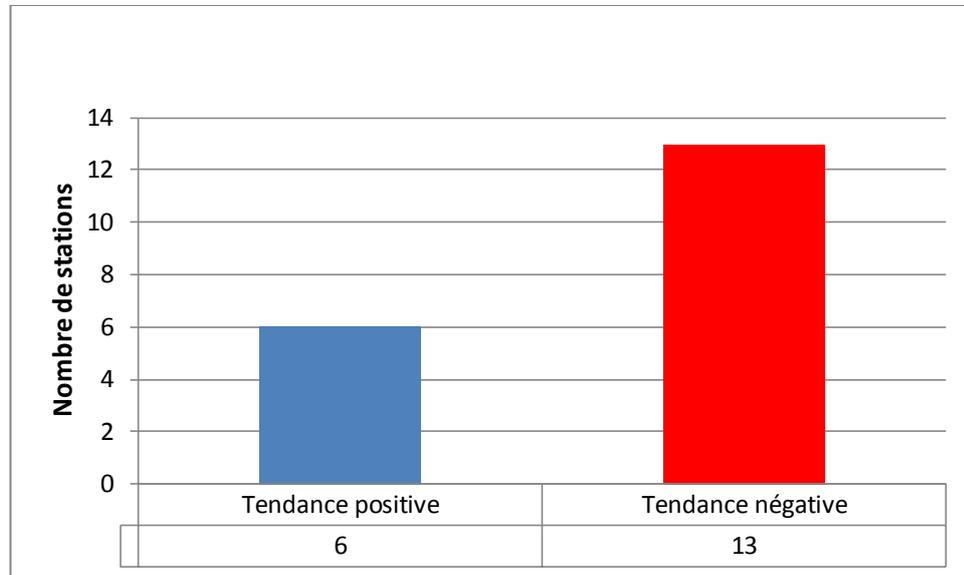
#### 5.3.3.2.1. Conclusion

Cette partie de notre travail avait pour but d'étudier la tendance de la pluviométrie saisonnière des stations retenues dans le bassin versant de la Macta. Nous avons utilisé le test de Kendall, ce qui a permis de mettre en évidence le sens de la variabilité de la pluviométrie saisonnière.

La saison de l'été attire l'attention par la hausse de la pluviométrie. Ceci touche environ toutes les régions à l'exception de la zone Nord-Ouest. La saison de l'hiver est spécifiée par la tendance décroissante de 14 stations (33%), situées surtout au Centre-Nord du bassin. Les saisons restantes sont majoritairement marquées par l'absence de tendance.

### 5.3.3.3. Etude de la tendance annuelle

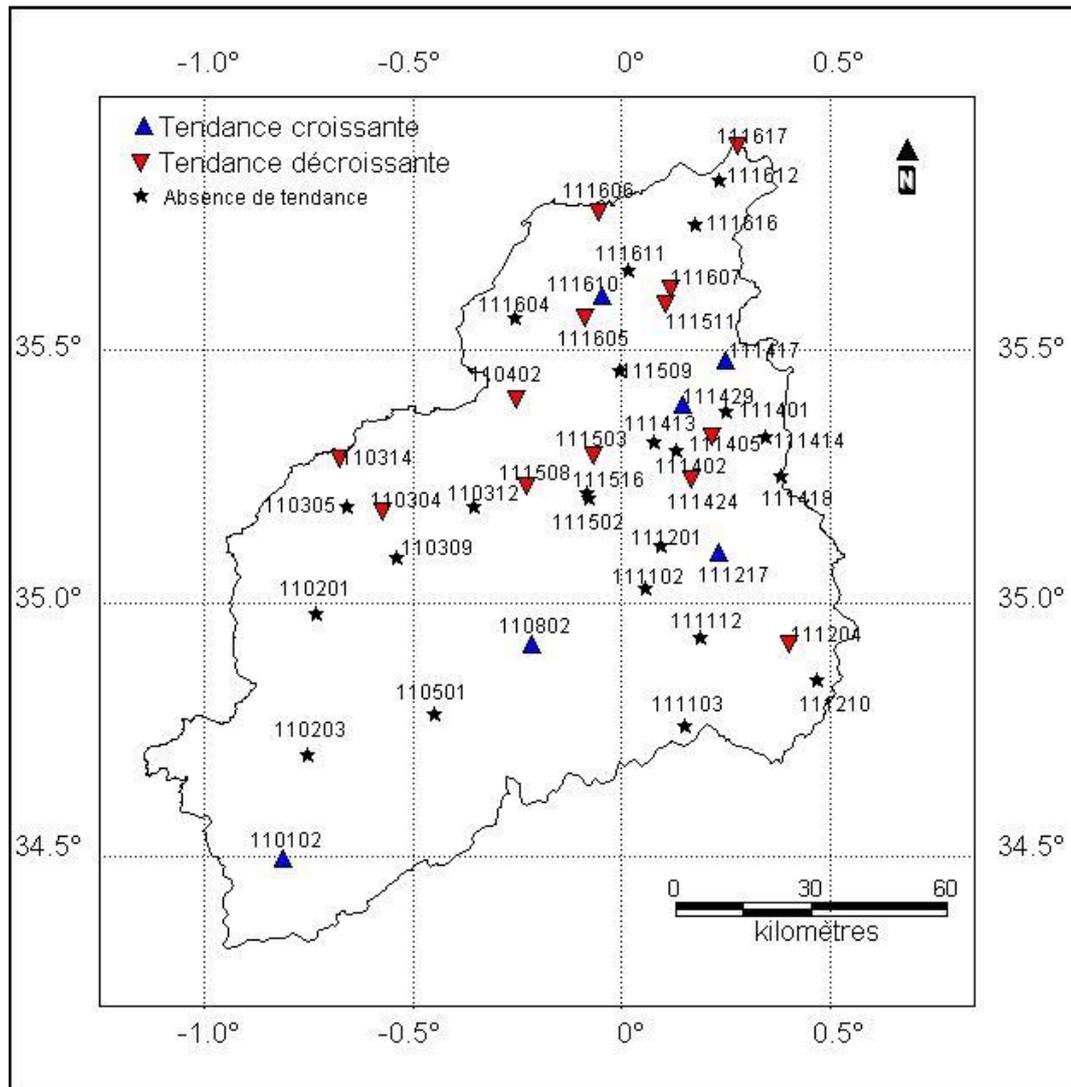
Le test de Kendall est utilisé pour déterminer les tendances de la pluviométrie annuelle de nos stations. Un test unilatéral avec un seuil de signification 0.10 est appliqué. Le nombre de stations ayant une tendance particulière est résumé sur la Figure 5.46.



**Figure 5.46 :** Nombre de stations pour chaque type de la tendance annuelle ( $\tau$  de Kendall)

Les stations en décroissance sont au nombre de 13, soit 31% des stations étudiées, contre 6 (14%) en croissance. Le reste, 23 stations (55%), n'ont pas de tendance perceptible.

La représentation des tendances de nos stations sur une carte aide à établir une interprétation géographique (Figure 5.47).



**Figure 5.47 :** Carte de la tendance annuelle des stations étudiées ( $\tau$  de Kendall)

La Figure 5.47 fournit la distribution spatiale des tendances des 42 stations étudiées dans le bassin versant de la Macta. Il est clair que la tendance décroissante est installée essentiellement dans la zone Centre-Nord. Les stations affectées sont Sarno Bge (110304), Ain Trid (110314), Cheurfas Bge (110402), Ain Tifrit (111204), Matemore (111405), Ghriss (111424), Bouhanifia BGE (111503), Sfisef (111508), Mohammadia GRHA (111511), Bouhenni (111605), Fornaka (111606), Samouria (111607) et Ferme Assorain (111617). Six stations ont une hausse de la pluviométrie annuelle. Ce sont les stations de Ras Elma (110102), Daoud Youb (110802), Beniane (111217), Ain Fares (111417), Mascara (111429) et Mocta Douz (111610).

### 5.3.4. Conclusion

Nous avons étudié les tendances de la pluviométrie mensuelle, saisonnière et annuelle en utilisant le test de Kendall. 42 stations ont été retenues situées dans le bassin versant de la Macta.

Concernant la tendance mensuelle le mois de mars est celui le plus touché par la diminution de la pluviométrie (25 stations, soit 60%). Le mois de juin est aussi affecté par cette diminution, néanmoins le nombre de stations est plus faible (8 stations, soit 19%). A l'opposé, Les mois d'août, septembre et novembre sont caractérisés par un régime pluviométrique à la hausse avec un nombre de stations respectif de 20 (48%), 17 (40%) et 10 (24%).

L'étude des tendances de la pluviométrie saisonnière par le test de Kendall a contribué à déterminer le sens de la variabilité. La saison de l'hiver montre une décroissance de la pluviométrie dans 14 stations (soit 33%) situées essentiellement dans la partie Centre-Nord du bassin de la Macta. Cependant, la saison de l'été affiche une augmentation de la pluviométrie dans 26 stations (62%). La partie Nord-Ouest semble être épargnée par cette tendance.

La tendance annuelle décroissante est installée essentiellement dans la zone Centre-Nord. Elle touche 13 stations, soit un pourcentage de 31%.

## 5.4. Etude des tendances (coefficient de corrélation de Spearman)

### 5.4.1. Introduction

Fondamentalement, le coefficient de Spearman est aussi un cas particulier du coefficient de Pearson, calculé à partir des transformations des variables originelles. Mais il présente l'avantage d'être non paramétrique. L'inférence statistique ne repose plus sur la normalité bi-variée du couple de variables (X; Y). En statistique, la corrélation de Spearman ou rho de Spearman, nommée d'après Charles Spearman et souvent notée par la lettre grecque  $\rho$  (rho) ou  $r_s$ . C'est une mesure de dépendance statistique non paramétrique entre deux variables (Caillat et al., 2008).

La corrélation de Spearman est étudiée lorsque deux variables statistiques semblent corrélées sans que la relation entre les deux variables soit de type affine. Elle consiste à trouver un coefficient de corrélation, non pas entre les valeurs prises par les deux variables mais entre les rangs de ces valeurs. Elle estime à quel point la relation entre deux variables peut être décrite par une fonction monotone. S'il n'y a pas de données répétées, une corrélation de Spearman parfaite de +1 ou -1 est obtenue quand l'une des variables est une fonction monotone parfaite de l'autre.

Le coefficient de Spearman est approprié pour les variables continues et discrètes, y compris les variables ordinales. Le  $\rho$  de Spearman et  $\tau$  de Kendall peuvent être formulés comme des cas particuliers d'un coefficient de corrélation plus générale (Lehman, 2005).

Le coefficient de corrélation de rang de Spearman ( $\rho$  de Spearman) est le coefficient de corrélation de Pearson sur les rangs des données.

#### 5.4.2. Méthodologie

Le but principal est de tester s'il existe une corrélation entre deux variables aléatoires en testant si, ou non, le  $\rho$  de Spearman=0 (l'hypothèse nulle).

L'idée est de substituer aux valeurs observées leurs rangs. Nous créons donc deux nouvelles colonnes. La première, celles des  $R_i = \text{Rang}(x_i)$ , correspond au rang de l'observation  $x_i$  dans la colonne des X; et celles des  $S_i = \text{Rang}(Y_i)$ .

Le  $\rho$  de Spearman est ni plus ni moins que le coefficient de Pearson calculé sur les rangs (équation 5.10).

$$\rho = \frac{COV(R_{X_i}, R_{Y_i})}{\sigma_{R_{X_i}} \sigma_{R_{Y_i}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_i (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_i (S_i - \bar{S})^2}} \quad (5.10)$$

Le  $\rho$  de Spearman varie de -1 à +1 et prend les mêmes propriétés que le r de Bravais Pearson.

Le test de significativité, dans le cas des petits échantillons ( $n < 10$ ), utilise la table des valeurs critiques des  $\rho$  de Spearman. Cependant, lorsque  $n$  est de l'ordre de 20 à 30, le t de Student est utilisé en approximant selon l'équation 5.11.

$$t = \frac{\rho}{\sqrt{\frac{1 - \rho^2}{n - 2}}} \quad (5.11)$$

Ou même utiliser une approximation normale, plus simple, lorsque  $n > 35$  (équation 5.12).

$$U = \frac{\rho}{\sqrt{\frac{1}{n - 1}}} = \rho \sqrt{n - 1} \quad (5.12)$$

Signalons que les avis des auteurs divergent au sujet de la taille  $n$  pour utiliser une approximation. Dodge et Rousson (2004) rapportent que l'approximation normale suffit dès que  $n > 10$ ; Siegel et Castellan (1988), eux, rapportent qu'on peut s'appuyer sur l'approximation normale lorsque  $n$  est autour de 20 - 25.

#### **5.4.2.1. Traitement des ex-aequo**

Lorsqu'il y a beaucoup d'ex-aequo dans les données, nous affectons les rangs moyens aux observations portant des valeurs identiques.

Lors de la transformation des données en rangs, nous devons tenir compte des ex-aequo. Au départ nous affectons les rangs aux observations selon la procédure habituelle. Dans un deuxième temps, nous effectuons un nouveau passage sur les données, nous attribuons aux individus portant des valeurs identiques la moyenne des rangs associés.

Si par exemple, deux valeurs identiques ont le même rang 9. Nous attribuons donc le rang moyen 9.5 «  $(9+10)/2$  » aux deux valeurs.

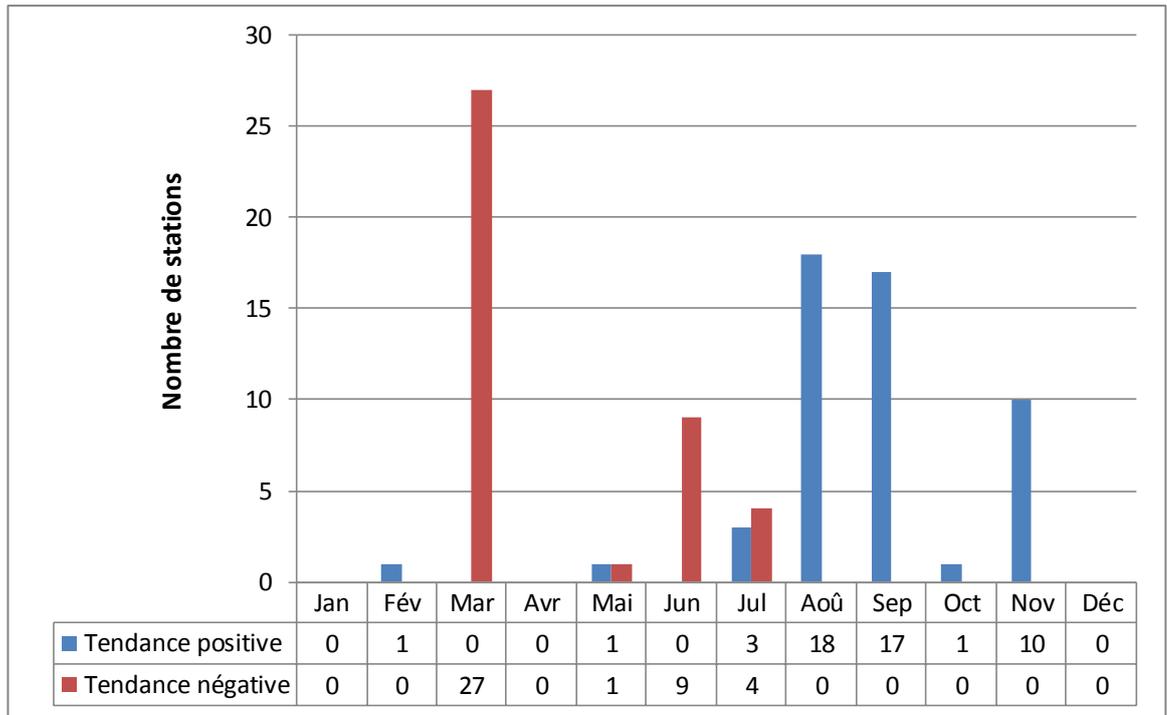
#### **5.4.3. Résultats et discussion**

##### **5.4.3.1. Etude de la tendance mensuelle**

De la même manière que les tests précédents, nous calculons le  $\rho$  de Spearman pour chaque mois et chaque station. L'approximation à la loi normale est calculée pour chaque valeur du  $\rho$ .

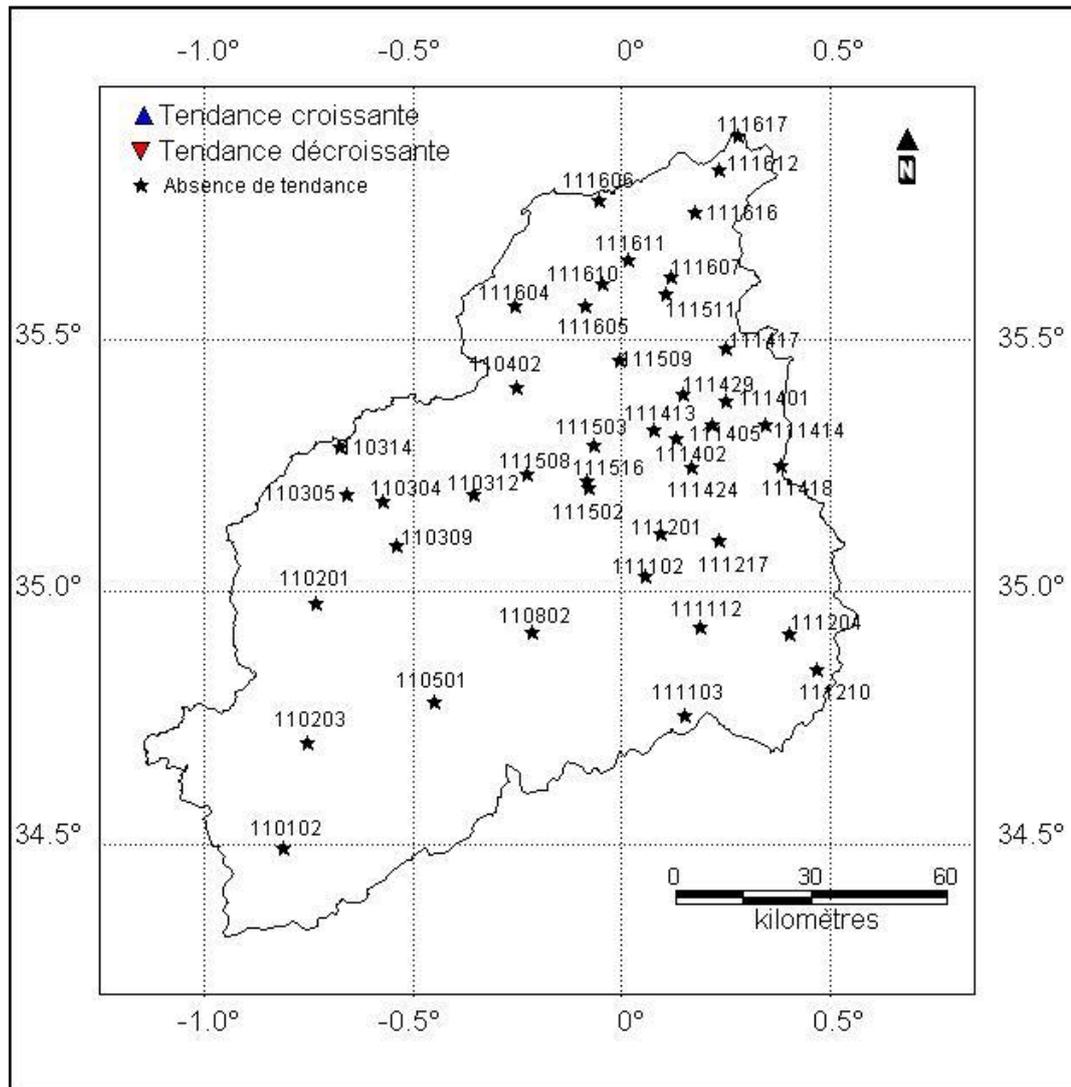
L'hypothèse nulle est rejetée si la valeur du Z (approximation du  $\rho$  de Spearman à la loi normale) appartient à la région critique (test unilatéral pour  $\alpha = 0.10$ ).

La Figure 5.48 affiche le nombre de stations pour chaque tendance. Le mois de mars contient le plus grands nombre de stations ayant une diminution de la pluviométrie avec 27 stations (64%). Le mois de juin contient 9 stations (21%) ayant une réduction. Les mois d'aout et septembre possèdent environ le même nombre de stations caractérisées par la hausse de la pluviométrie. Le mois de novembre renferme 10 stations (24%) ayant une augmentation. Signalons que pour les mois suscités, une seule tendance existe.



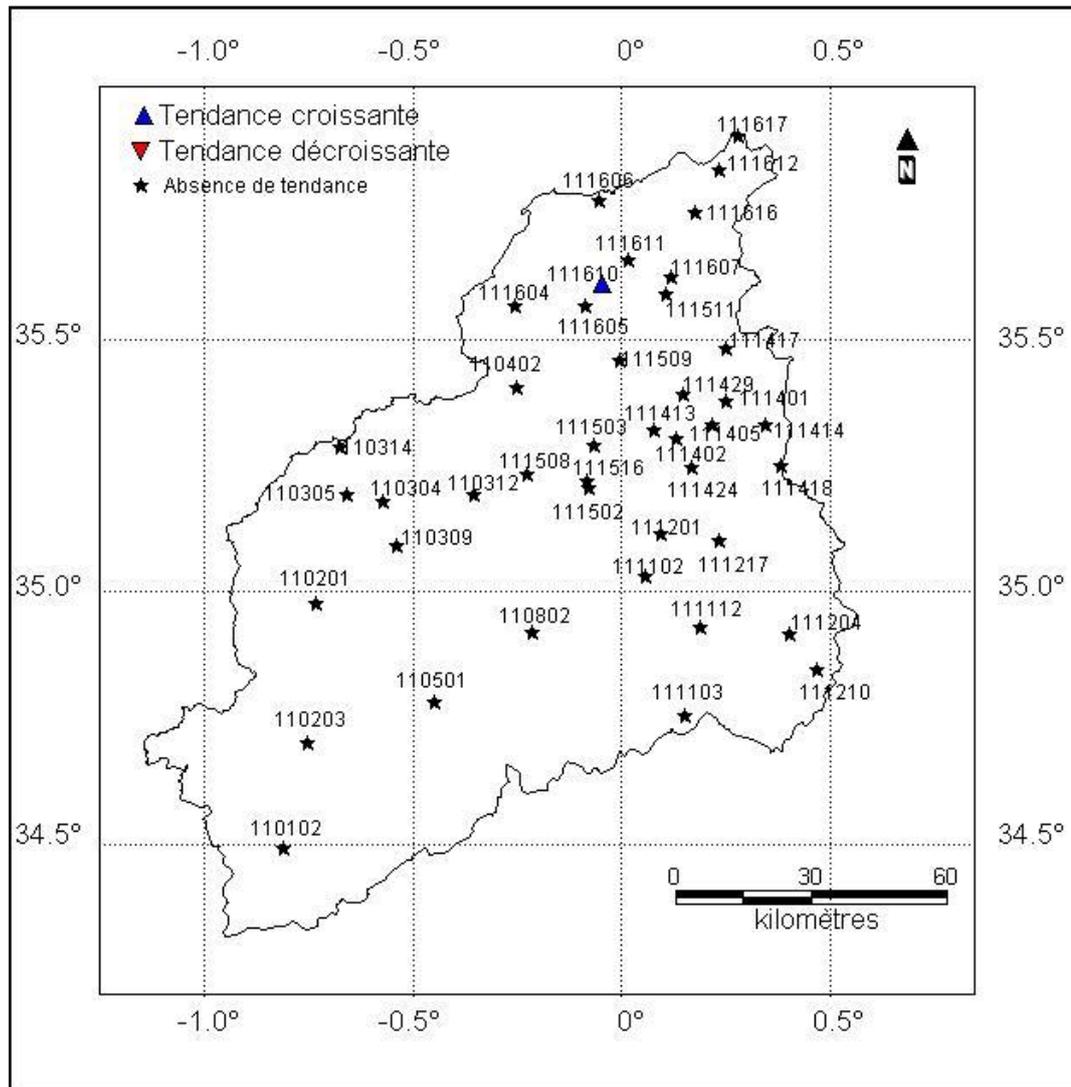
**Figure 5.48** : Nombre de stations pour chaque type de tendance ( $\rho$  de Spearman)

L'élaboration de cartes nous fournit une vision spatiale des tendances trouvées (Figure 5.49 à Figure 5.60).



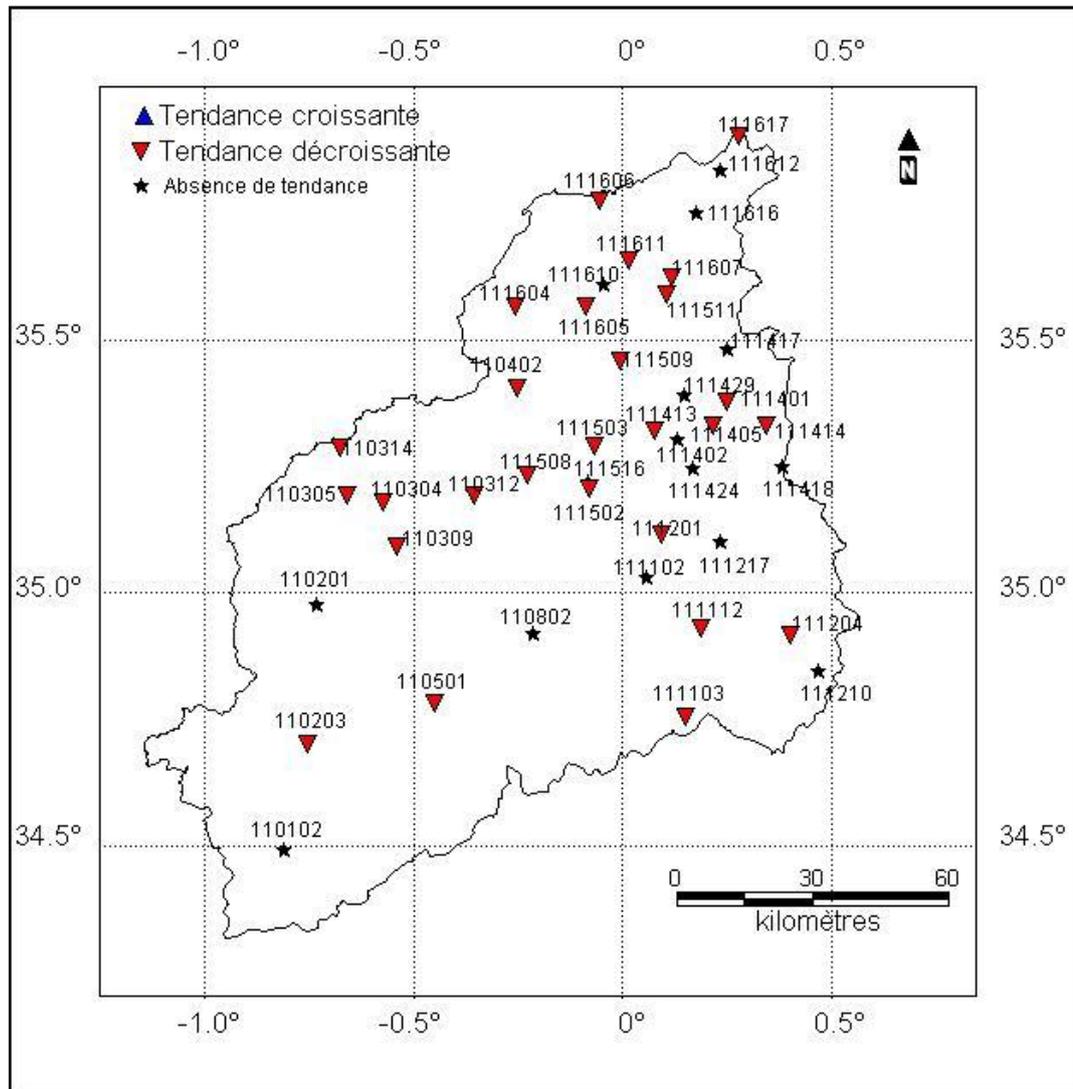
**Figure 5.49 :** Carte des tendances des stations du mois de janvier ( $\rho$  de Spearman)

Toutes les stations du mois de janvier n'ont pas de tendance. La grande fluctuation des données empêche la formation d'une tendance positive ou négative. Il faut signaler que 20 stations ont un  $\rho$  (ou  $z$ ) négatif, ce qui veut dire que le sens est vers la diminution. C'est possible, que si la série s'allonge, ces stations auront des valeurs qui se situeront dans la région critique.



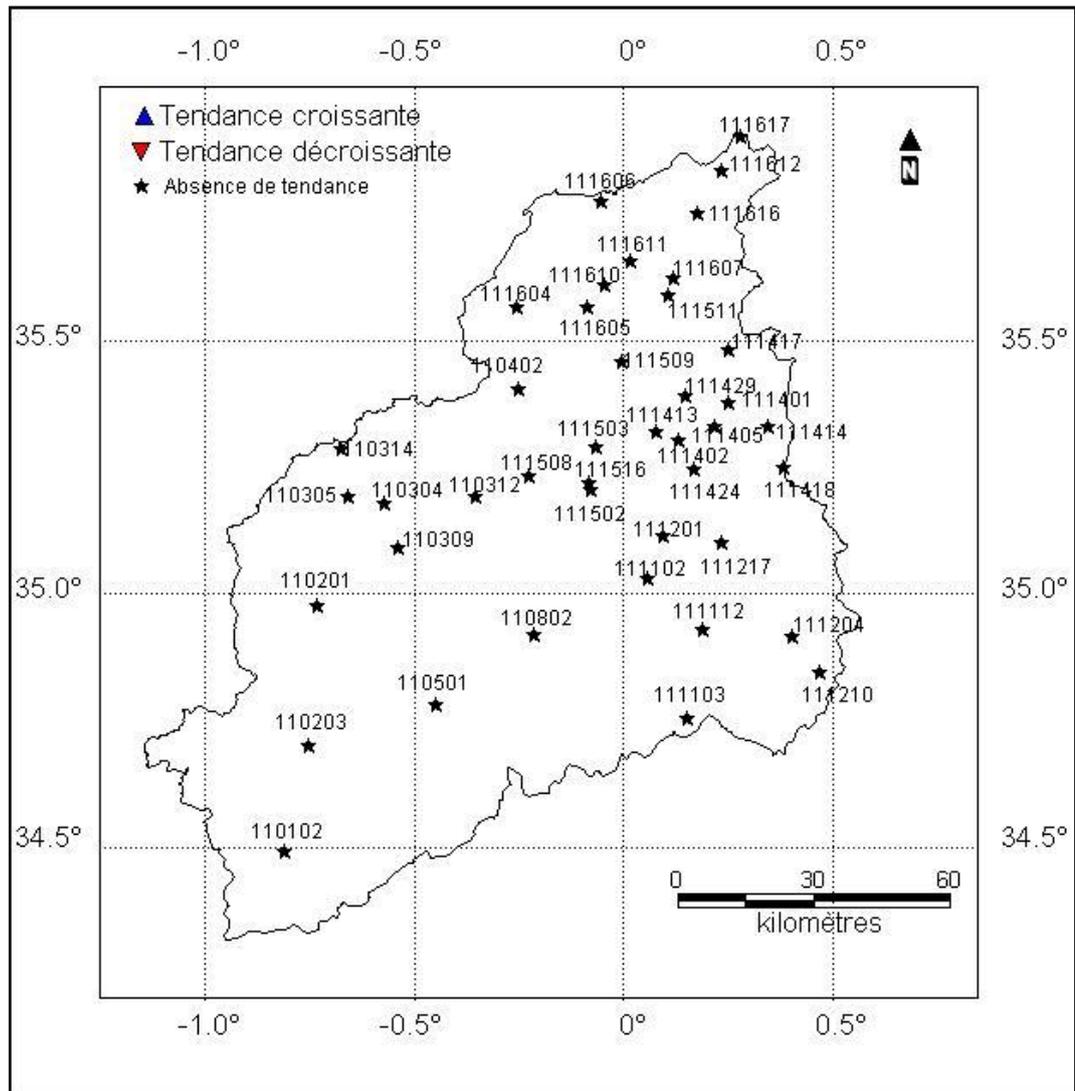
**Figure 5.50** : Carte des tendances des stations du mois de février ( $\rho$  de Spearman)

La Figure 5.50, du mois de février, est similaire à celle du mois de janvier ou toutes les stations n'ont pas de sens de leurs aptitudes, à l'exception de la station Mocta Douz (111610) qui présente une augmentation de la pluviométrie. Notons aussi que 24 stations ont des signes négatifs, et donc elles sont prédisposées à avoir une tendance décroissante au futur.



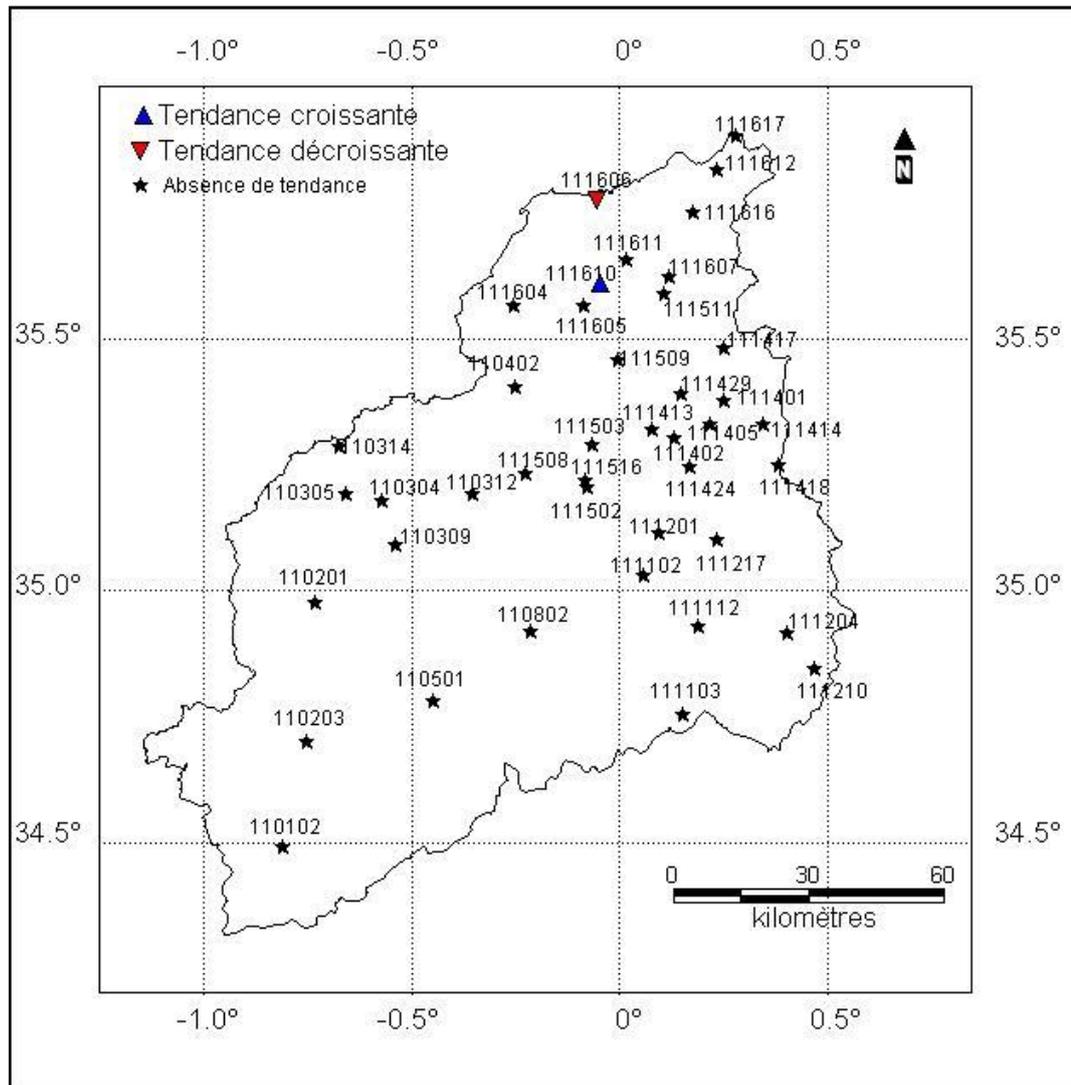
**Figure 5.51 :** Carte des tendances des stations du mois de mars ( $\rho$  de Spearman)

Le mois de mars présente la particularité d'avoir un grand nombre de stations ayant une diminution de la pluviométrie. Ceci est vrai pour toutes les méthodes utilisées dans cette thèse. Cette distinction touche toutes les zones du bassin de la Macta. Aussi, il faut attirer l'attention que toutes les autres stations ont des valeurs du  $\rho$  négatives, et donc elles sont des stations à potentialités décroissantes.



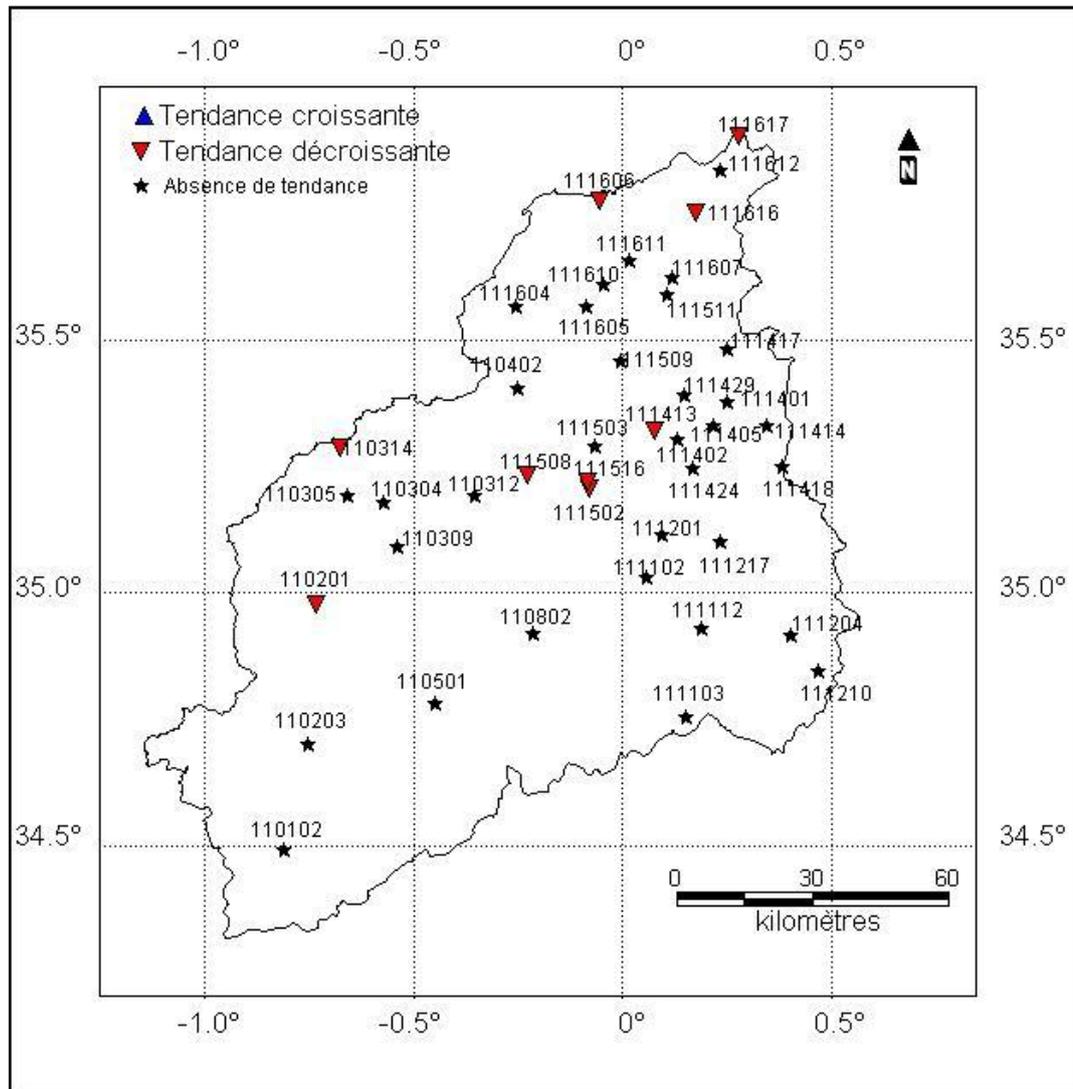
**Figure 5.52 :** Carte des tendances des stations du mois d'avril ( $\rho$  de Spearman)

Le mois d'avril, comme le mois de janvier et février, est dominé par l'absence de tendance. Mais, 29 stations sont dans le côté négatif. Ce mois pourra facilement basculer vers la tendance décroissante dans les prochaines années.



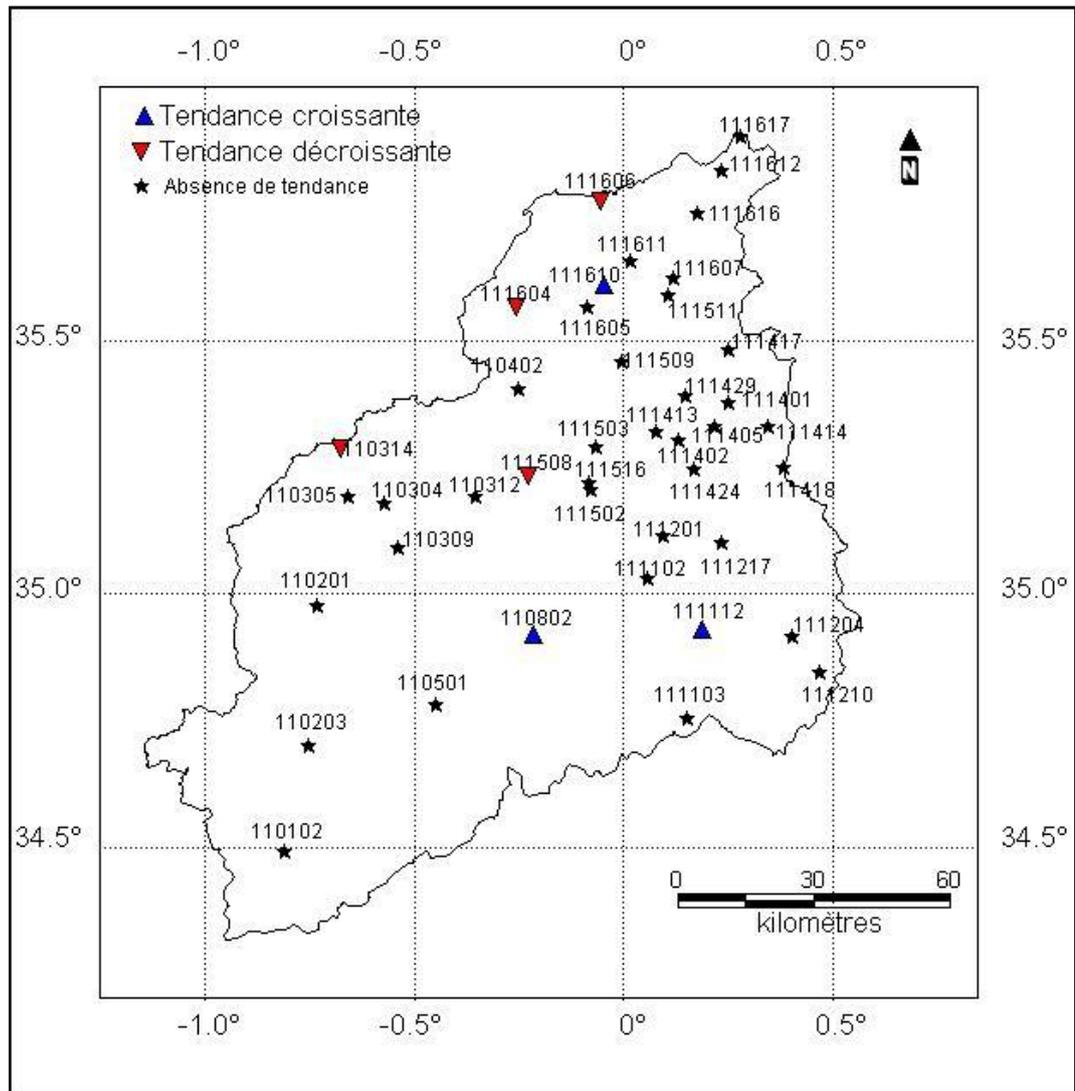
**Figure 5.53 :** Carte des tendances des stations du mois de mai ( $\rho$  de Spearman)

La Figure 5.53 ne visualise aucun penchant de la pluviométrie. Les stations Macta Douz (111610) et Fornaka (111606) présentent l'exception en ayant respectivement une augmentation et une diminution de la pluviométrie. Remarquons que 17 stations peuvent avoir une diminution au futur.



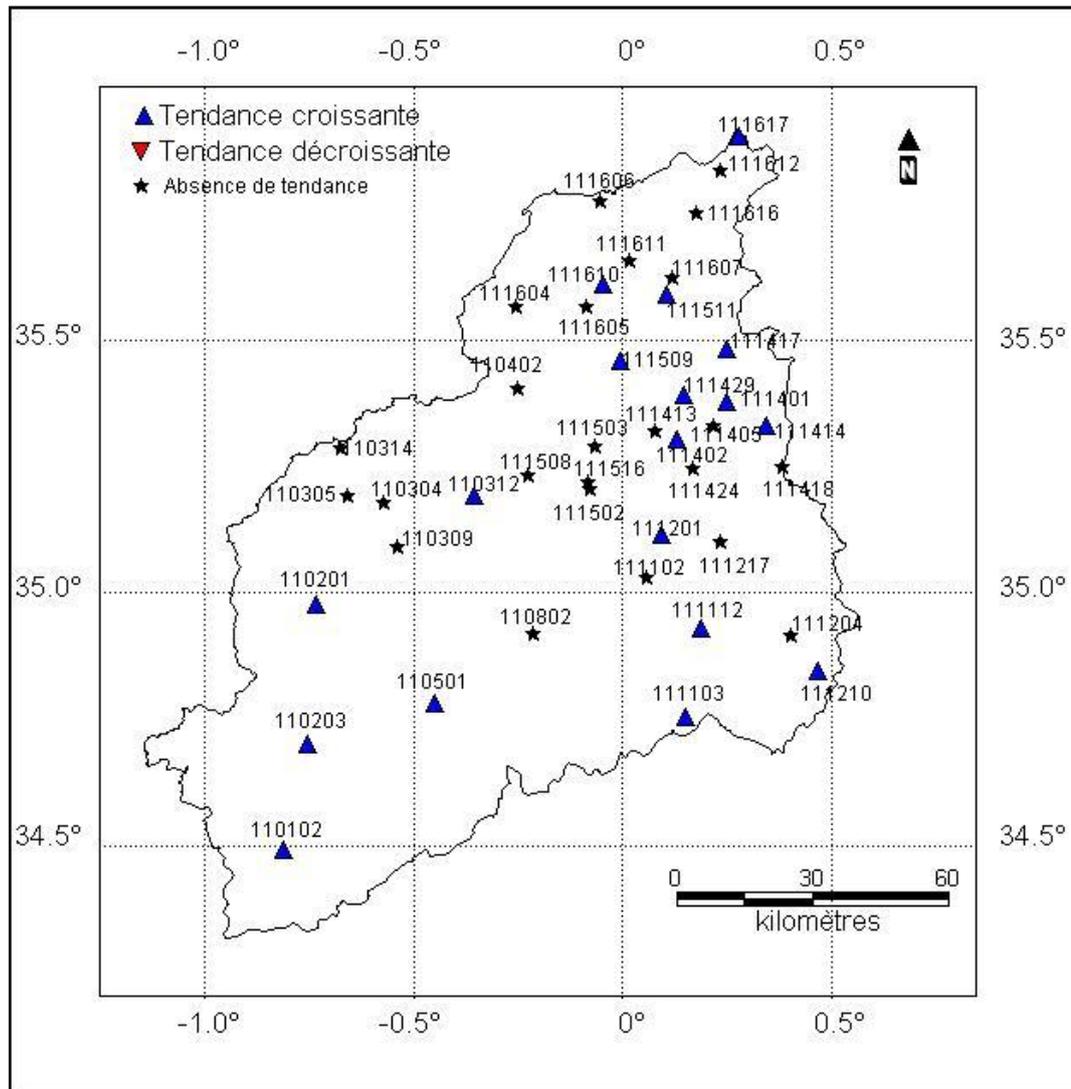
**Figure 5.54 :** Carte des tendances des stations du mois de juin ( $\rho$  de Spearman)

Neuf stations du mois de juin ont une décroissance de la pluviométrie. Il s'agit de Sidi Ali Benyoub (110201), Ain Trid (110314), Tizi (111413), Sahouat Ouizert (111502), Sfisseg (111508), Trois Rivières (111516), Fornaka (111606), Marais de Sirat (111616) et Ferme Assorain (111617). Ce nombre pourrait devenir 35 stations puisque c'est le nombre ayant un  $\rho$  négatif.



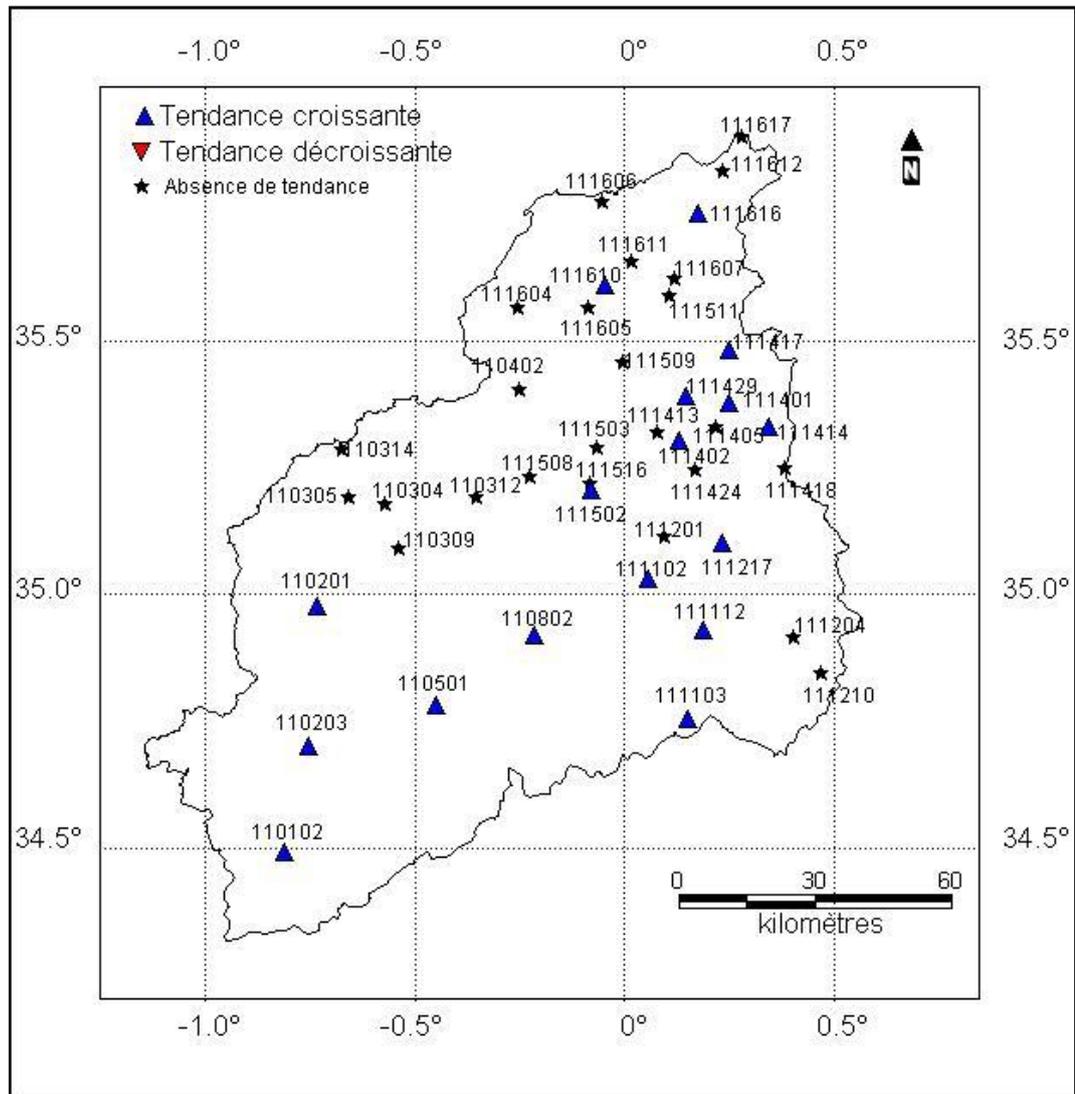
**Figure 5.55 :** Carte des tendances des stations du mois de juillet ( $\rho$  de Spearman)

Le mois de juillet contient 3 stations avec une tendance positive. Les stations sont Daoud Youb (110802), Hammam Rabi (111112) et Mocta Douz (111610). Quatre stations ont une tendance négative, à savoir, Ain Trid (110314), Sfisseg (111508), Oggaz (111604) et Fornaka (111606). Neuf autres stations ont des perspectives de tendances négatives.



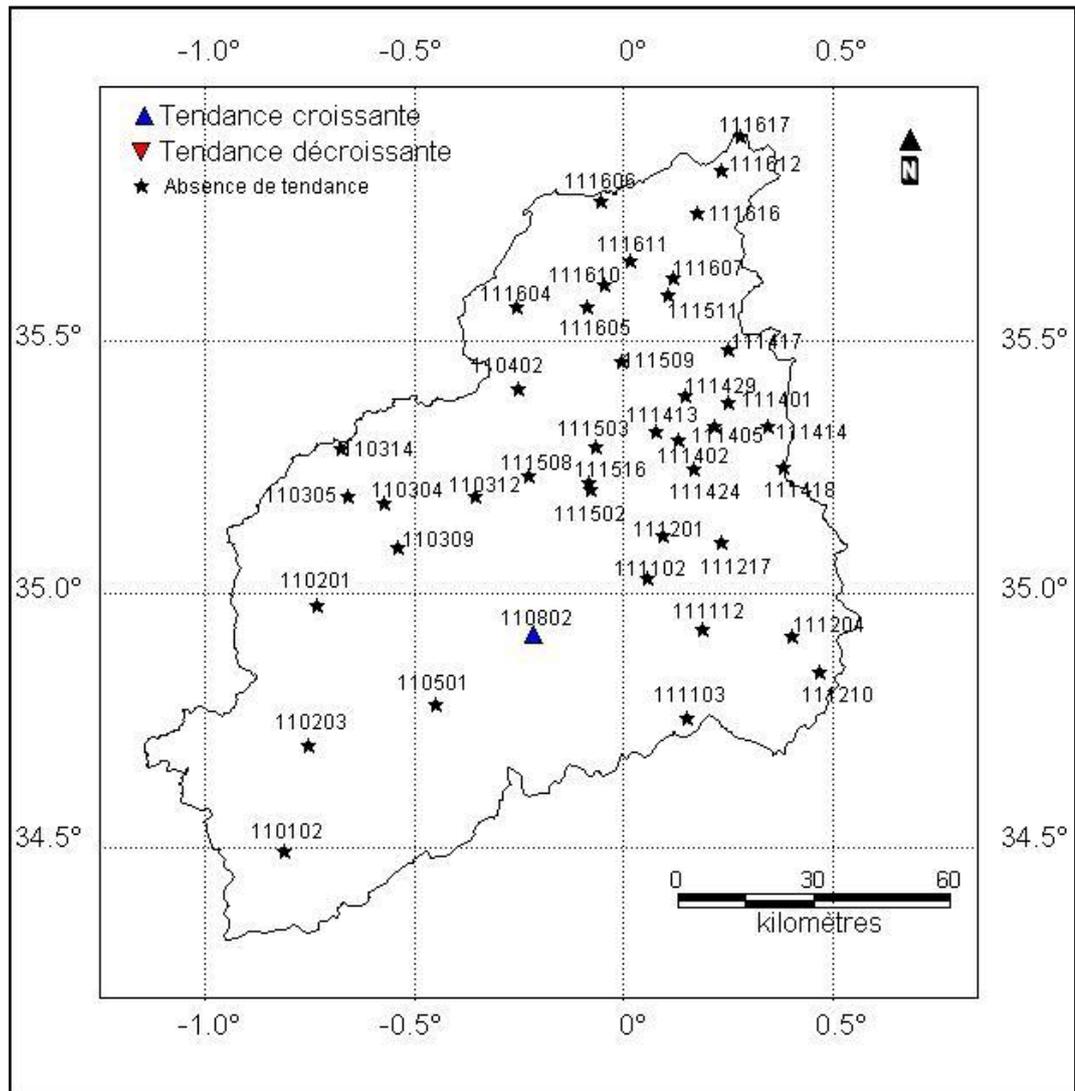
**Figure 5.56 :** Carte des tendances des stations du mois d'aout ( $\rho$  de Spearman)

La singularité du mois d'aout est le trait de la hausse de plusieurs stations. C'est la station de Ras Elma (110102), Sidi Ali Benyoub (110201), El Hacaiba (110203), Mostefa Benbrahim (110312), Merine (110501), Ain El Hadjar (111103), Hammam Rabi (111112), Oued Taria (111201), Tamesna (111210), Maoussa (111401), Froha (111402), Sidi Kada (111414), Ain Fares (111417), Mascara (111429), Hacine (111509), Mohammadia GRHA (111511), Mocta Douz (111610) et Ferme Assorain (111617). En plus toutes les autres stations ont un  $\rho$  positif sauf deux.



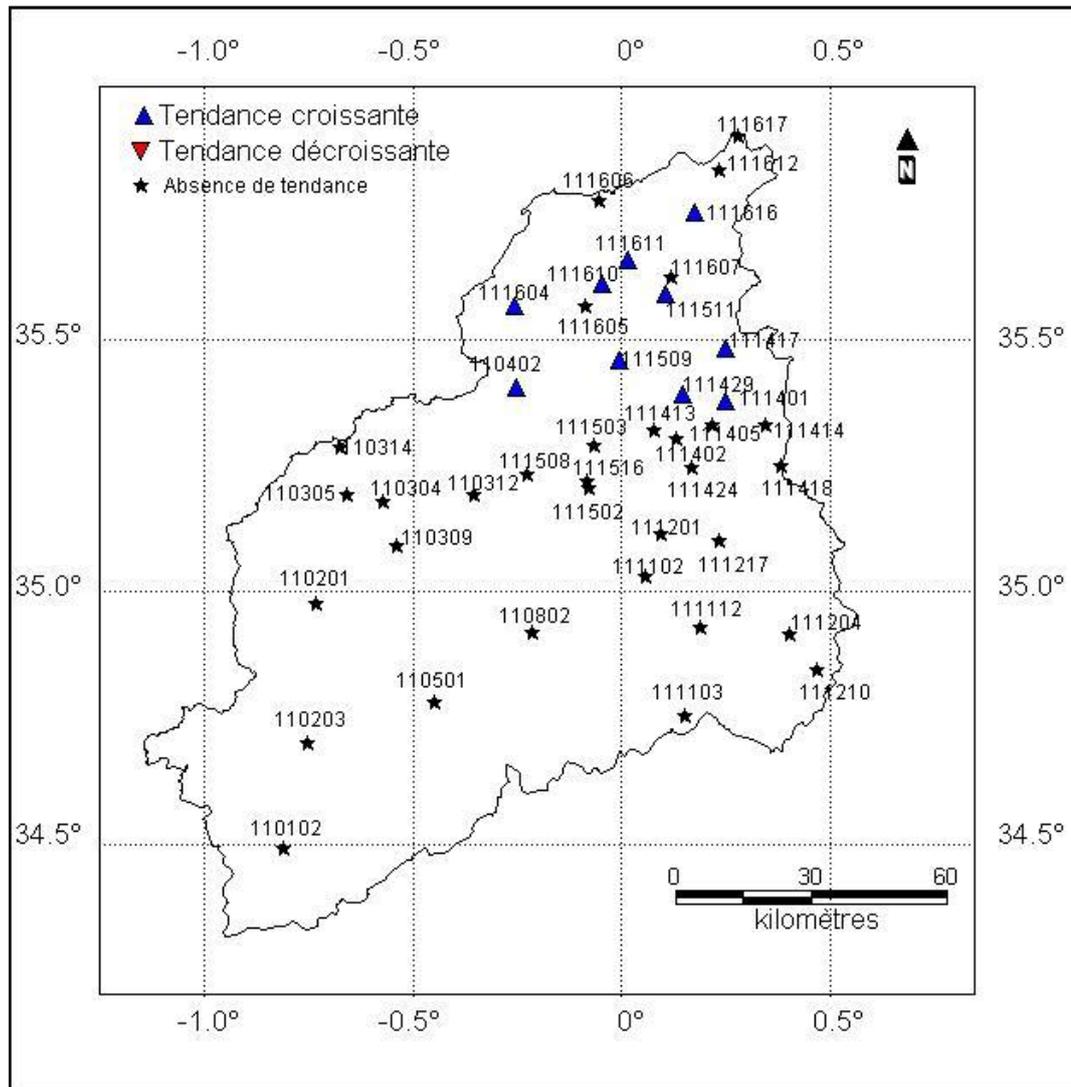
**Figure 5.57 :** Carte des tendances des stations du mois de septembre ( $\rho$  de Spearman)

Le mois de septembre est la succession de la tendance du mois d'aout avec la hausse de 17 stations. Onze de ces stations ont la même tendance durant les deux mois. Les stations concernées par la hausse pour le mois de septembre sont Ras Elma (110102), Sidi Ali Benyoub (110201), El Hacaiba (110203), Merine (110501), Daoud Youb (110802), Meftah Sidi Boubekeur (111102), Ain El Hadjar (111103), Hammam Rabi (111112), Beniane (111217), Maoussa (111401), Froha (111402), Sidi Kada (111414), Ain Fares (111417), Mascara (111429), Sahouat Ouizert (111502), Mocta Douz (111610) et Marais de Sirat (111616). Quarante et un (41) stations de ce mois ont des valeurs positives. Le mois de septembre pourrait avoir des tendances croissantes pour toutes les stations.



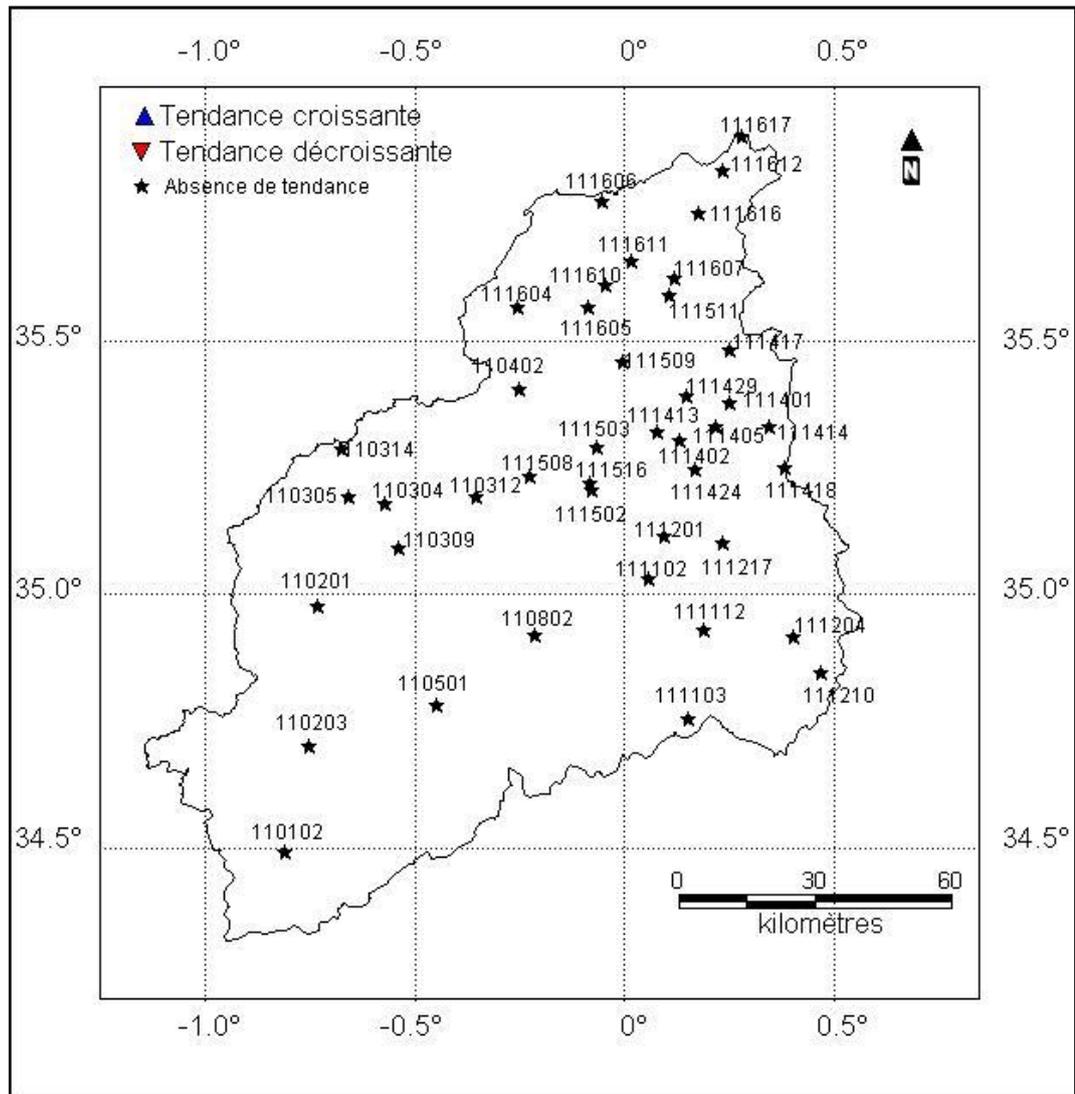
**Figure 5.58 :** Carte des tendances des stations du mois d'octobre ( $\rho$  de Spearman)

Toutes les stations de la Figure 5.58, du mois d'octobre, n'ont pas de tendance tangible. La station Daoud Youb (110802) fait l'exception avec une direction positive.



**Figure 5.59 :** Carte des tendances des stations du mois de novembre ( $\rho$  de Spearman)

La partie Nord du bassin de la Macta est caractérisée par des pluviométries à la hausse. Dix stations sont concernées. Elles sont Cheurfas Bge (110402), Maoussa (111401), Ain Fares (111417), Mascara (111429), Hacine (111509), Mohammadia GRHA (111511), Oggaz (111604), Mocta Douz (111610), Ferme Blanche (111611) et Marais de Sirat (111616). Les valeurs des  $\rho$  de 41 stations sont positives. Par conséquent, ce mois pourrait devenir un mois à tendances croissantes.



**Figure 5.60 :** Carte des tendances des stations du mois de décembre ( $\rho$  de Spearman)

L'absence de tendance de toutes les stations, sans exception, caractérise le mois de décembre.

#### 5.4.3.1.1. Conclusion

L'utilisation de la corrélation de Spearman a aidé à définir le régime de la pluviométrie de nos 42 stations pendant les douze mois de l'année.

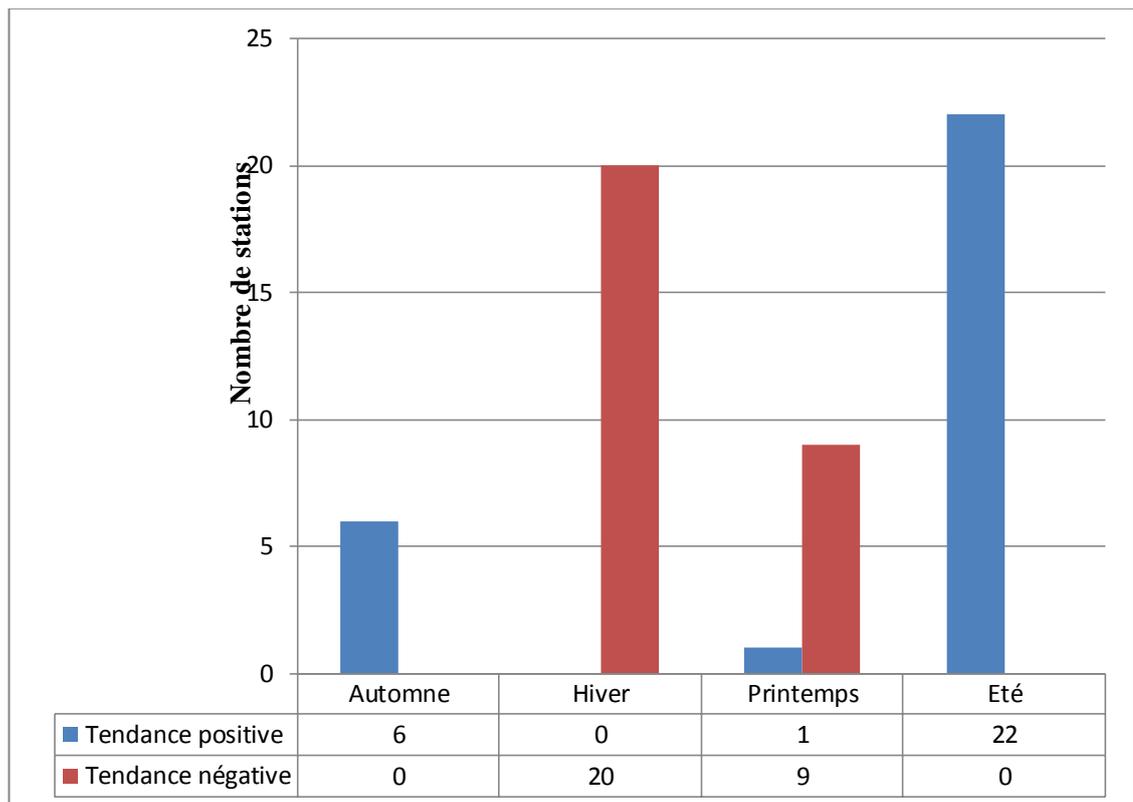
Les mois de décembre, janvier, février, avril, mai, juillet et octobre présentent une absence de tendance pour la majorité, si non la totalité, des stations étudiées.

Le mois de mars est le mois de la décroissance par excellence, où 27 stations sont en régime de diminution de la pluviométrie.

Les mois d'aout et septembre semblent bien partie pour une élévation de la pluviométrie, avec 18 et 17 stations ayant ce régime. En fin, le mois de novembre, avec 10 stations à tendances croissantes, pourrait joindre les mois suscités.

#### 5.4.3.2. Etude de la tendance saisonnière

La même méthodologie utilisée pour déterminer les tendances mensuelles est utilisée pour établir les tendances saisonnières. La Figure 5.61 montre le nombre de stations appartenant à une tendance particulière pour une saison donnée.

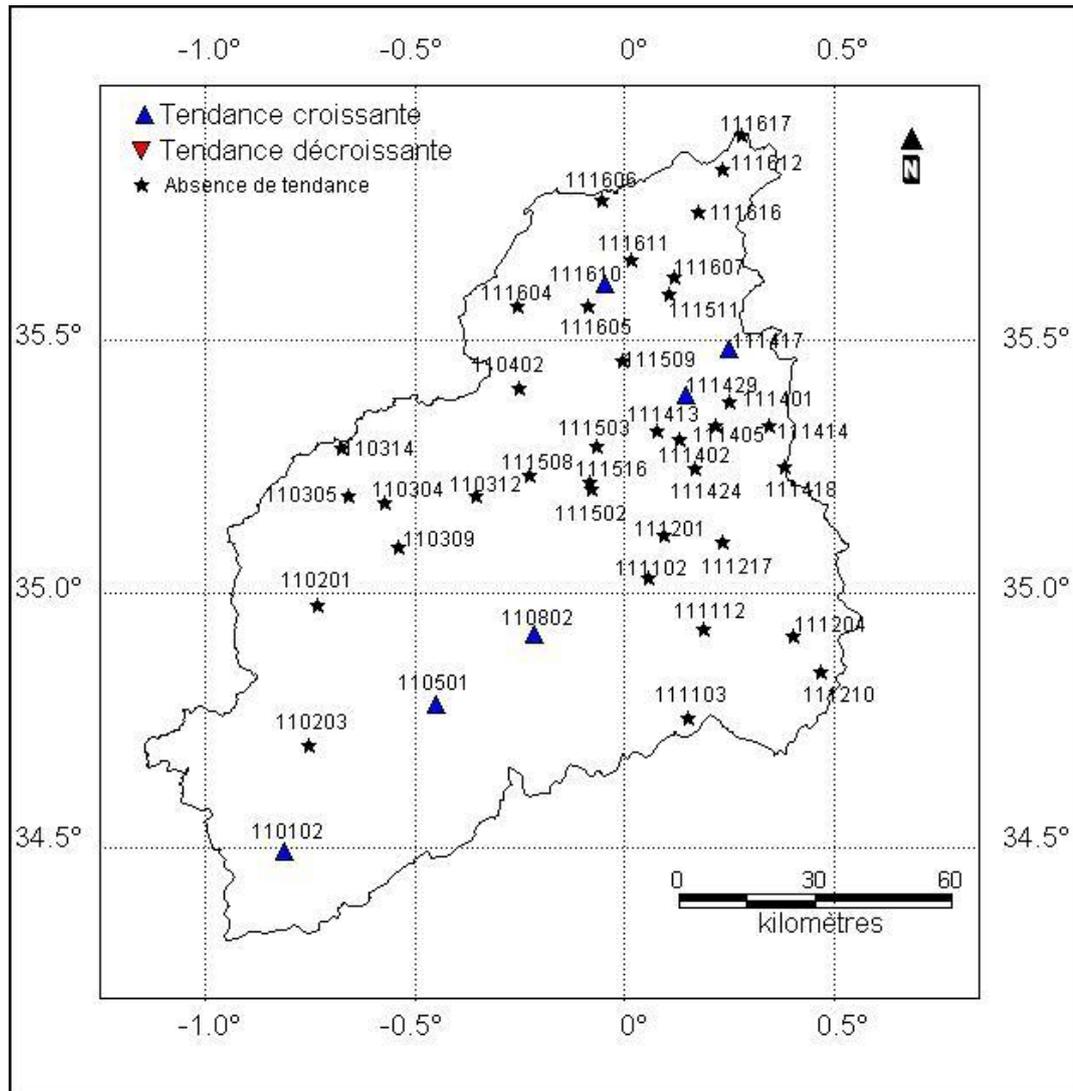


**Figure 5.61 :** Nombre de stations pour chaque type de tendance saisonnière

La Figure 5.61 met la lumière sur la dominance de la tendance décroissante au sein de la saison de l'hiver, où 20 stations affichent ce sens d'évolution contre aucune ayant l'autre sens. Par contre, la saison de l'été marque l'opposition à la saison de l'hiver par la dominance de la tendance croissante (22 stations). Aussi, signalons que presque tous les  $\rho$  sont négatifs (positifs) durant la saison de l'hiver (été) et donnent donc des perspectives futures négatives (positives).

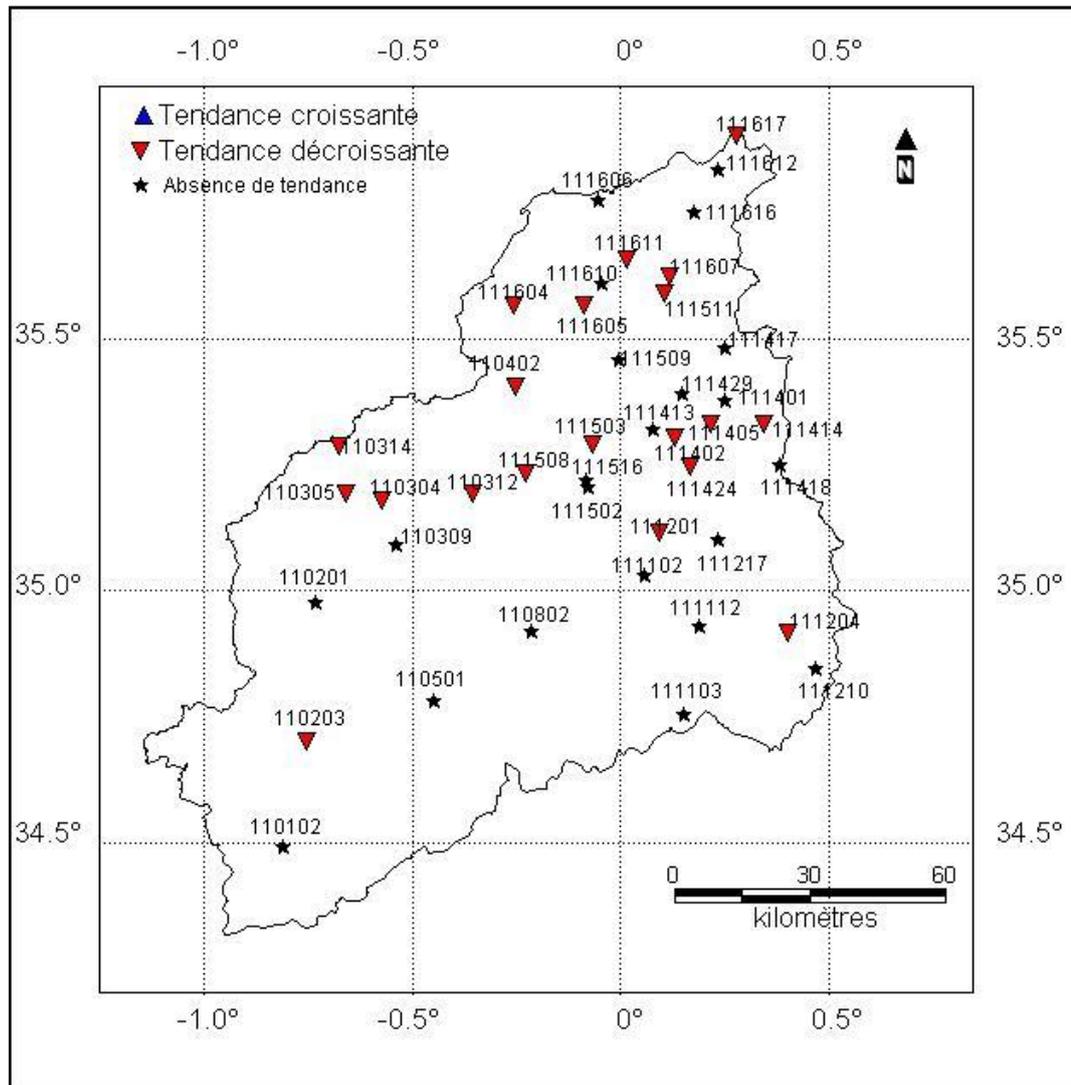
L'automne (printemps) ressemble à l'été (hiver) avec une échelle plus faible ou des tendances positives (négatives) dominant.

Dans un contexte d'une analyse spatiale, nous avons élaboré des cartes qui affichent les tendances des stations avec leurs positions géographiques (Figure 5.62 à Figure 5.65).



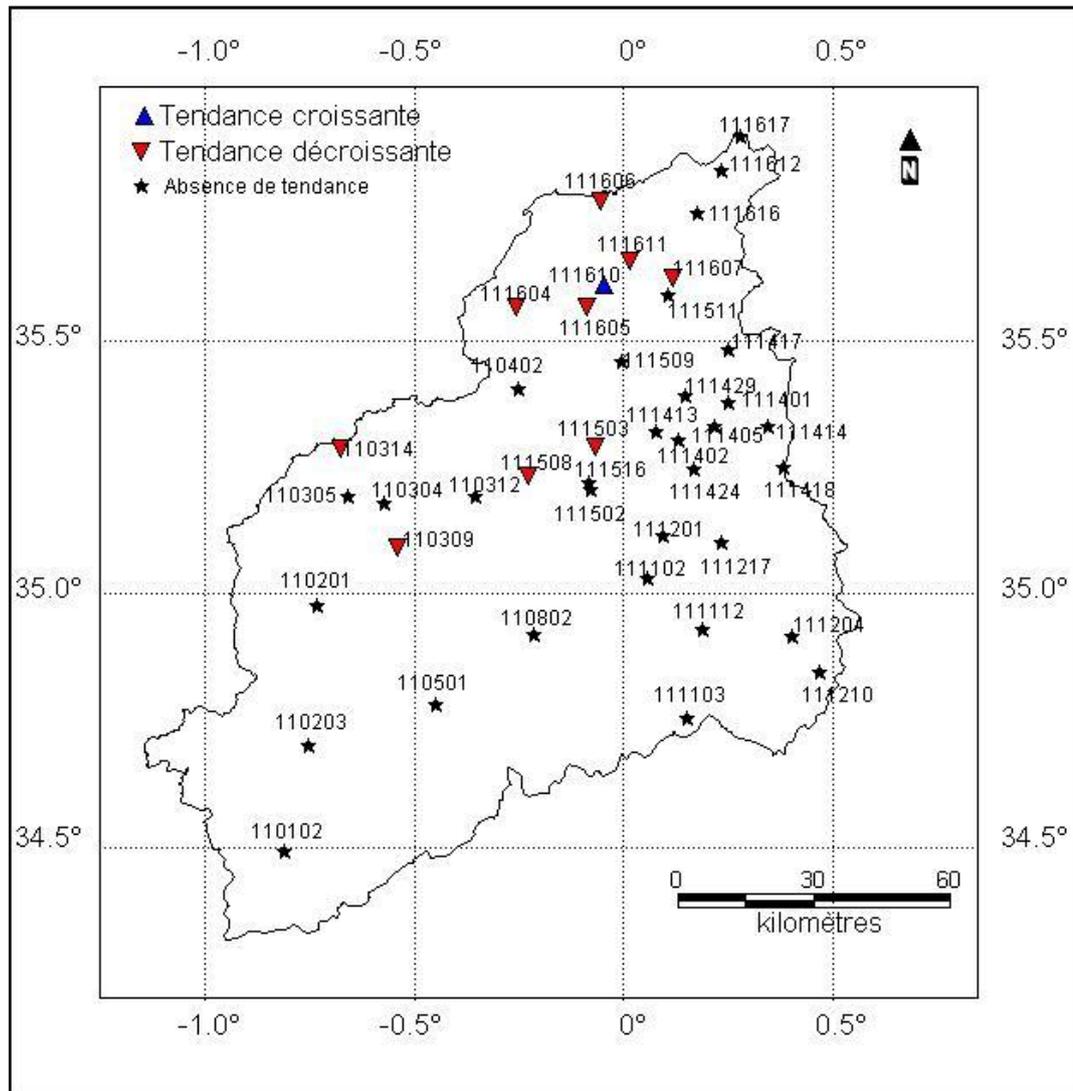
**Figure 5.62 :** Carte des tendances de l'automne ( $\rho$  de Spearman)

L'absence de tendance règne sur la Figure 5.62 de la saison de l'automne. Seulement six stations possèdent des tendances positives. Il est question des stations de Ras Elma (110102), Merine (110501), Daoud Youb (110802), Ain Fares (111417), Mascara (111429) et Mocta Douz (111610).



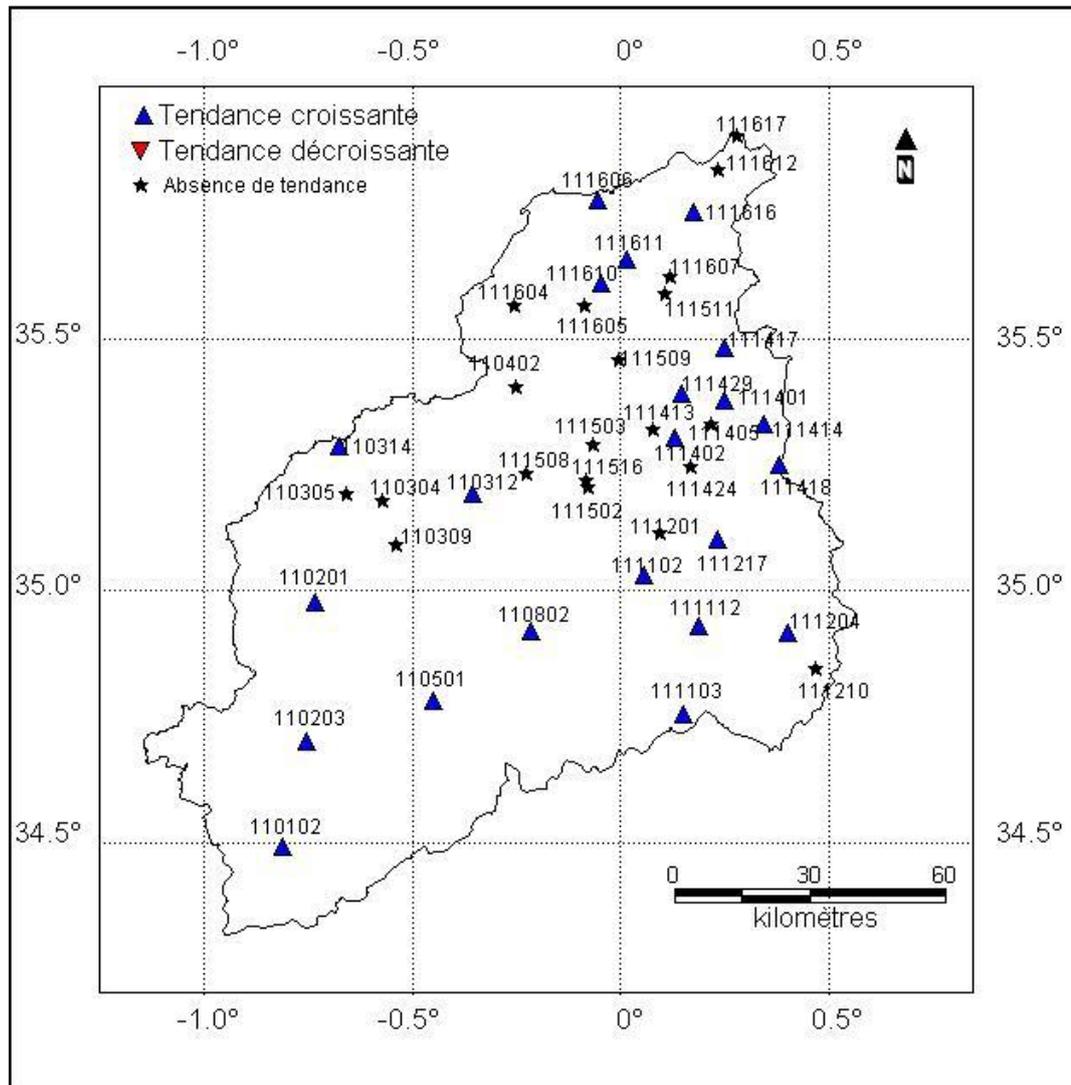
**Figure 5.63 :** Carte des tendances de l'hiver ( $\rho$  de Spearman)

La Figure 5.63 montre la suprématie de la tendance négative sur la région Centre-Nord. Il est important de signaler que presque tous les  $\rho$  de Spearman ont une valeur négative et qu'aucune station n'a de tendance croissante. Les stations en relation sont El Hacaiba (110203), Sarno Bge (110304), Sidi Belabbes (110305), Mostefa Benbrahim (110312), Ain Trid (110314), Cheurfas Bge (110402), Oued Taria (111201), Ain Tifrit (111204), Froha (111402), Matemore (111405), Sidi Kada (111414), Ghriss (111424), Bouhanifia BGE (111503), Sfisseg (111508), Mohammadia GRHA (111511), Oggaz (111604), Bouhenni (111605), Samouria (111607), Ferme Blanche (111611) et Ferme Assorain (111617).



**Figure 5.64 :** Carte des tendances du printemps ( $\rho$  de Spearman)

Neuf stations, situées toutes au Centre Nord du bassin de la Macta, évoluent vers la diminution de la pluviométrie durant la saison du printemps. Ces dernières sont Hassi Daho (110309), Ain Trid (110314), Bouhanifia BGE (111503), Sfisseg (111508), Oggaz (111604), Bouhenni (111605), Fornaka (111606), Samouria (111607) et Ferme Blanche (111611). La station Mocta Douz (111610) détient, à elle seule, une évolution positive.



**Figure 5.65 :** Carte des tendances de l'été ( $\rho$  de Spearman)

La Figure 5.65 affiche les tendances de la saison de l'été. Elle marque l'omnipotence de l'évolution vers la hausse de la pluviométrie. Aucune région n'est épargnée par cette évolution. Les stations en rapport sont Ras Elma (110102), Sidi Ali Benyoub (110201), El Hacaiba (110203), Mostefa Benbrahim (110312), Ain Trid (110314), Merine (110501), Daoud Youb (110802), Meftah Sidi Boubekeur (111102), Ain El Hadjar (111103), Hammam Rabi (111112), Ain Tifrit (111204), Beniane (111217), Maoussa (111401), Froha (111402), Sidi Kada (111414), Ain Fares (111417), Nesmoth MF (111418), Mascara (111429), Fornaka (111606), Mocta Douz (111610), Ferme Blanche (111611) et Marais de Sirat (111616). Aucune station ne présente une autre évolution.

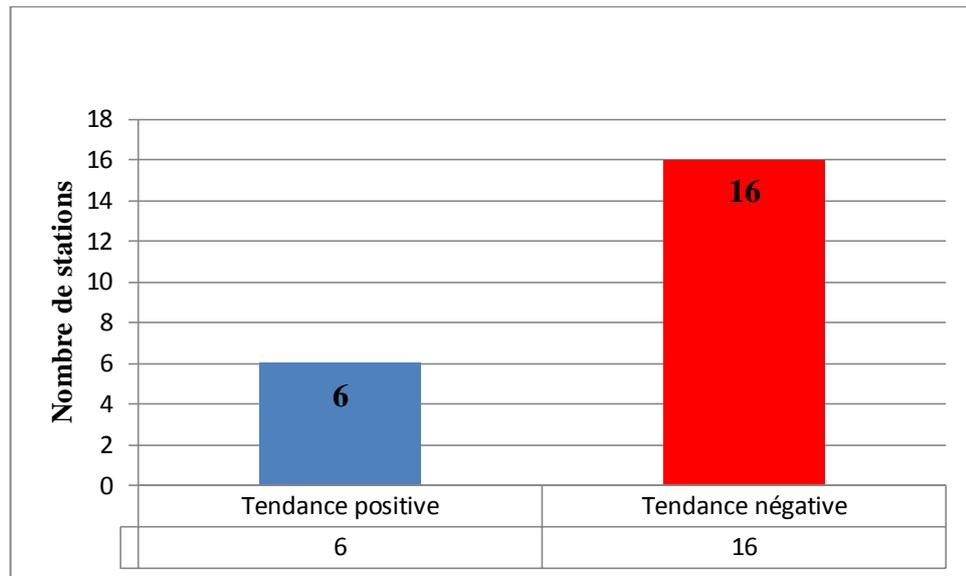
#### 5.4.3.2.1. Conclusion

Nous avons utilisé le  $\rho$  de Spearman pour identifier l'évolution de la pluviométrie saisonnière. La saison de l'automne est marquée par l'absence de tendance de la majorité des

stations. La saison d'hiver est caractérisée par un régime pluviométrique en baisse, surtout les stations situées au Centre-Nord du bassin versant de la Macta. Le printemps contient neuf stations avec une orientation vers le bas, et déclare, à notre avis, une décroissance future de cette saison. L'été est marqué par un régime pluviométrique vers le haut et touche toutes les régions du bassin.

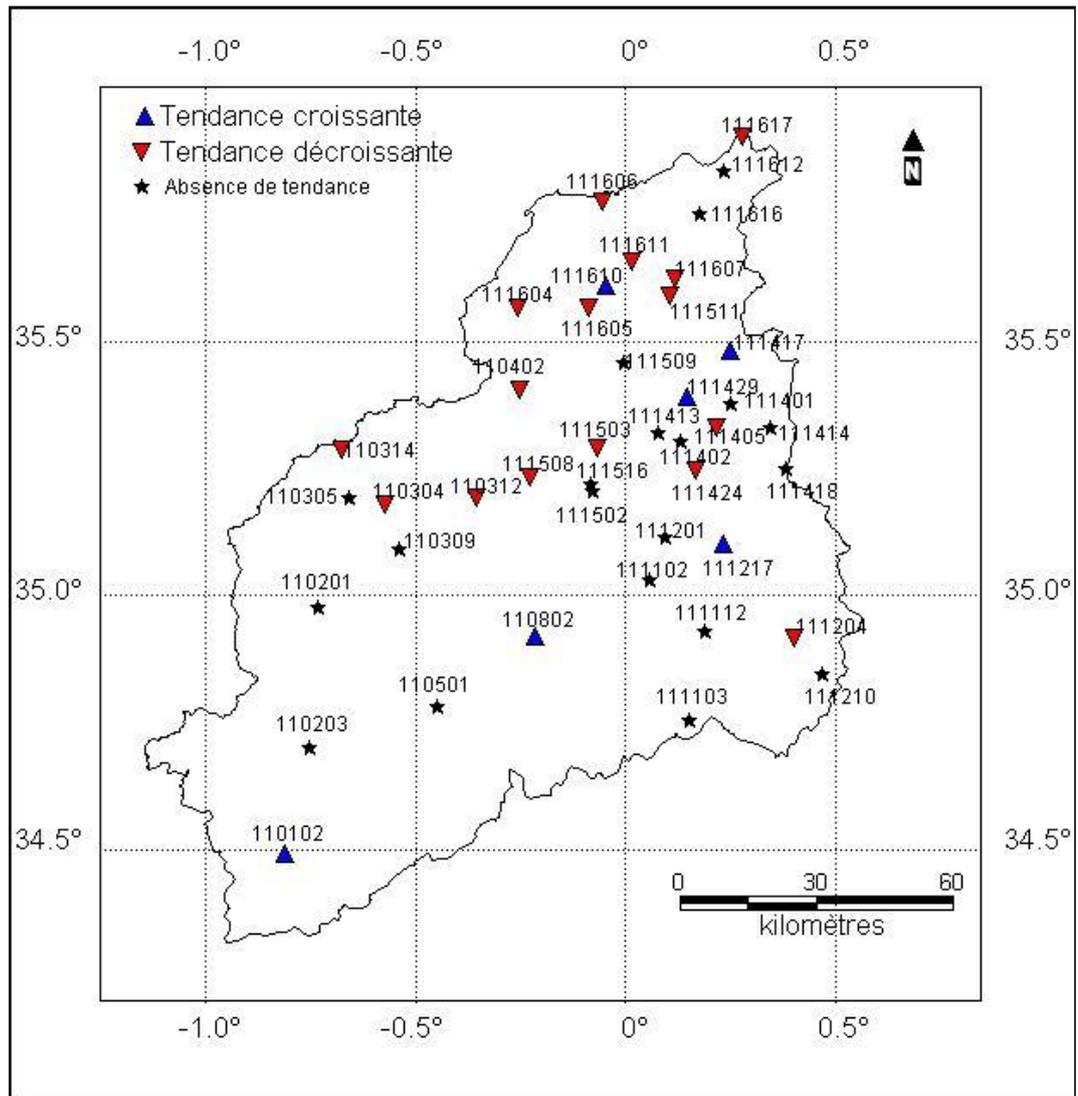
#### 5.4.3.3. Etude de la tendance annuelle

Le calcul du  $\rho$  de Spearman et sa normalisation ( $Z$ ) permet de caractériser les régimes des pluviométries annuelles. Un test unilatéral avec un seuil de signification égale à 0.10 est utilisé. Nous dénombrons ensuite le nombre de stations ayant une tendance croissante ou décroissante (Figure 5.66).



**Figure 5.66 :** Nombre de stations pour chaque type de tendance annuelle ( $\rho$  de Spearman)

Seize stations ont une tendance décroissante contre six ayant une tendance croissante. La Figure 5.67 présente la position géographique des tendances de stations.



**Figure 5.67 :** Carte des tendances annuelles ( $\rho$  de Spearman)

La tendance décroissante s’installe surtout dans la partie Centre-Nord du bassin de la Macta. Cette décroissance annuelle est dû surtout à la décroissance hivernale. Cela montre, que d’un point de vue annuel, la tendance négative de l’hivers l’emporte sur la tendance positive de l’été. Les stations dont la tendance est croissante sont Ras Elma (110102), Daoud Youb (110802), Beniane (111217), Aïn Fares (111417), Mascara (111429) et Mocta Douz (111610).

#### 5.4.4. Conclusion

L’utilisation du  $\rho$  de Spearman a aidé à déterminer la tendance de la pluviométrie mensuelle, saisonnière et annuelle de chaque station.

L’étude de la pluviométrie mensuelle a montré la décroissance de la majorité des stations Centre-Nord durant le mois de mars. Neuf stations, pendant le mois de juin, sont aussi en décroissance.

Les mois d'août et septembre présente une tendance croissante. Les autres mois de l'année sont dominés par l'absence de tendance.

Concernant les saisons, le mois de mars a eu du poids sur la saison de l'hiver où la majorité des stations Centre-Nord ont des pluviométries en baisse. En revanche, le mois d'août et septembre prennent le dessus sur la saison de l'été et marquent ainsi une hausse de la pluviométrie de toutes les parties du bassin versant de la Macta.

La tendance annuelle est dominée, au Centre Nord, par la décroissance.

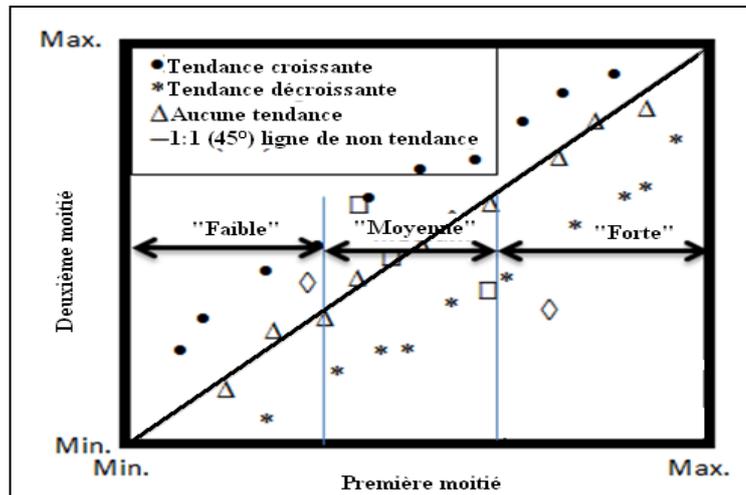
## **5.5. Etude des tendances par l'Analyse innovante de la tendance de la pluviométrie**

### **5.5.1. Introduction**

Après avoir utilisé le  $r$  de Bravais Pearson, le  $\tau$  de Kendall et le  $\rho$  de Spearman, nous utilisons dans cette partie une nouvelle méthodologie. Cette procédure est appelée analyse innovante de la tendance. Cette dernière qui est simple et efficace, est suggérée par Şen (2012). Cette méthode permet de calculer la pente de l'évolution de la moyenne arithmétique de la différence entre la deuxième et la première moitié de la série. L'objectif principal est d'identifier la tendance de 42 séries de précipitations mensuelles dans le bassin versant Macta.

### **5.5.2. Méthodologie**

L'approche utilisée divise la série de données en deux parties. Les enregistrements dans chaque moitié sont classés par ordre croissant et sont ensuite représentés sur un graphique à deux axes. La logique est simple. Si ces deux parties ont le même ordre et la même amplitude de séquences de données, leurs points de dispersion seront autour de la ligne 1:1 ( $45^\circ$ ), qui représente une absence de tendance significative. Par contre tout point au-dessus (au-dessous) de cette ligne implique l'existence d'une tendance vers l'augmentation (diminution) (Figure 5.68).



**Figure 5.68** : Modèle de la méthode de tendance innovante (Elouissi et al., 2016)

Puisque la dispersion des points est de type non-paramétrique, le coefficient de corrélation n'est pas efficace dans cette recherche de tendance.

Le modèle de la Figure 5.68 a toutes les alternatives possibles qui peuvent être obtenus comme types de tendance. La zone triangulaire supérieure (au-dessus de la ligne 1:1) est le domaine de la tendance croissante. Si tous les points de dispersion se trouvent dans cette zone, alors la série temporelle a une composante croissante. Au contraire, si les points de dispersion se situent dans la région triangulaire inférieure, une composante de tendance à la baisse existe dans la structure de la série chronologique. Cependant, la proximité des points de dispersion autour de la ligne droite 1:1 implique l'absence d'une tendance significative. Il est possible d'afficher le modèle de tendance innovant en trois parties : "faible", "moyenne" et "haute" comme le montre la Figure 5.68. La sélection quantitative des limites de groupe diffère d'un endroit à un autre (Elouissi et al., 2016).

### 5.5.3. Résultats et discussion

L'application de l'analyse des tendances innovantes est utilisée pour 42 stations météorologiques dispersées à différents endroits du bassin versant la Macta d'une manière représentative. Les calculs des tendances et des points d'interception sont atteints grâce à un logiciel écrit en Matlab (et en VBA Excel) et les résultats sont présentés sur la Figure 5.69 (a et b), la Figure 5.70, la Figure 5.71 et le Tableau 5.9. Ces derniers comprennent les moyennes arithmétiques ( $m_1$  et  $m_2$ ) des deux moitiés (1970-1990 et 1991-2011), les écarts types ( $s_1$  et  $s_2$ ), les pentes de la tendance ( $S$ ) et les valeurs d'interception.

La pente de la tendance est calculée selon l'expression suivante (Şen, 2014).

$$S = \frac{(m_2 - m_1)}{(n/2)} \quad (5.13)$$

où n est le nombre de données,  $n = 12 \times 42 = 504$  mois.

Le modèle innovant offre des possibilités d'interprétation linguistiques pour la tendance des valeurs "faibles", "moyennes" et "élevées". La plus grande plage de valeurs de données est divisée en trois parties égales. La position des points de dispersion des données au-dessus ou au-dessous de la ligne de non tendance 1:1 permet de déterminer si la tendance est croissante, décroissante ou absente dans chacune des trois parties. En prenant ces points en considération, les interprétations nécessaires sont donnés dans la dernière colonne du tableau 1, où o implique aucune tendance significative, + (-) montre une augmentation (diminution) significative, ++ (-- ) indique une augmentation (diminution) de manière plus significative que la partie précédente. Enfin +++ (---) implique une très importante augmentation (diminution) par rapport aux deux parties précédentes.

En général, il existe quatre types de modèles distinctifs de tendances innovantes (Figure 5.69 "a et b", Figure 5.70 et Figure 5.71). De ce fait on peut trouver une tendance générale à la hausse, une tendance générale à la baisse, une tendance à la hausse dans les grandes valeurs et une tendance à la baisse dans les petites valeurs de la pluviométrie. Ces modèles sont également utiles pour les interprétations de caractéristiques de variabilité comme expliqué en détail par Şen (2014). La variabilité est liée à la position du barycentre des deux écarts type. Si le barycentre de l'écart type est au-dessous (au-dessus) de la ligne de non tendance (ligne 1:1), alors il y a une diminution (augmentation) de la variabilité au sein de la série d'enregistrements.

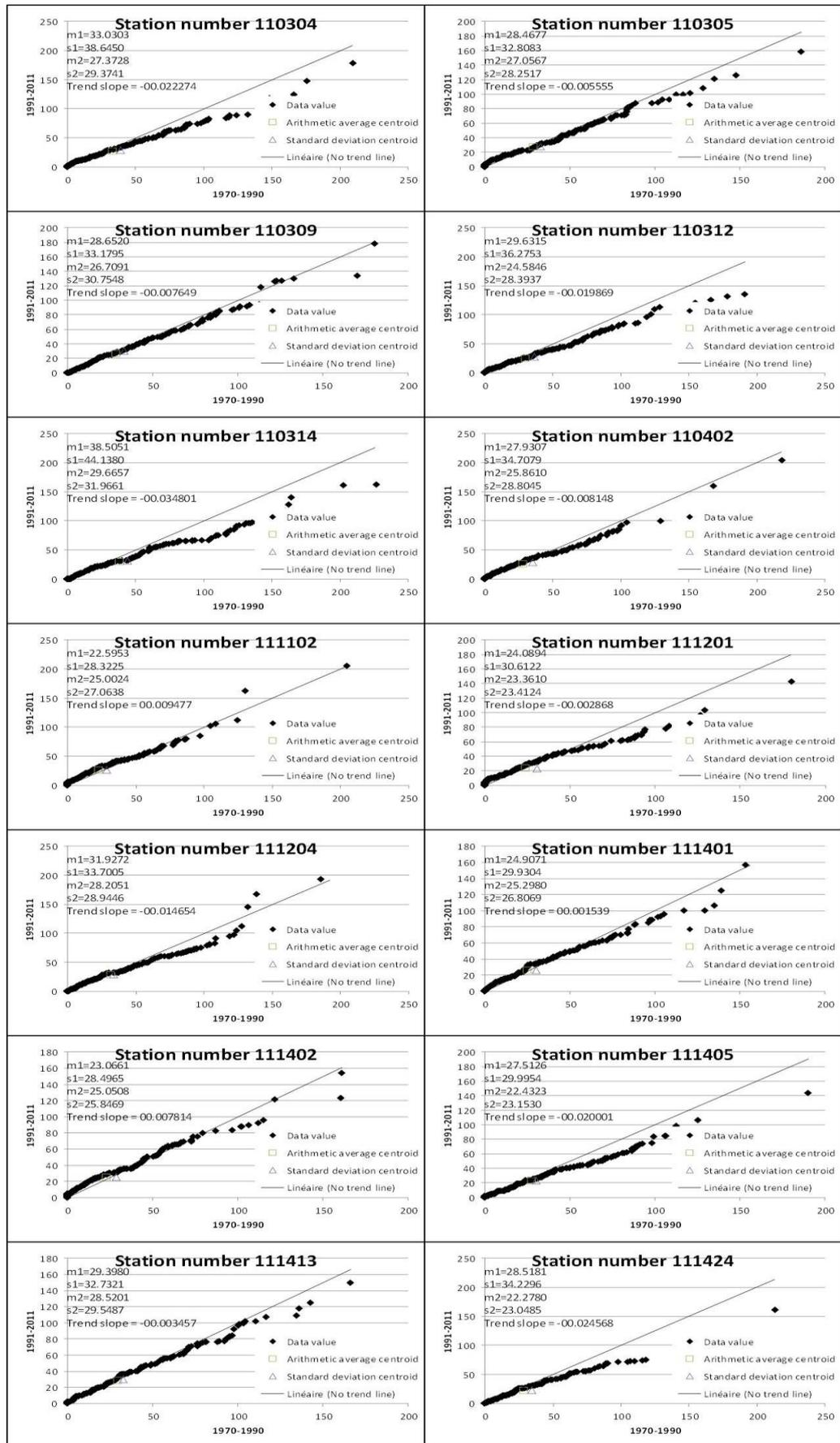


Figure 5.69 : Tendances innovantes descendantes (a)

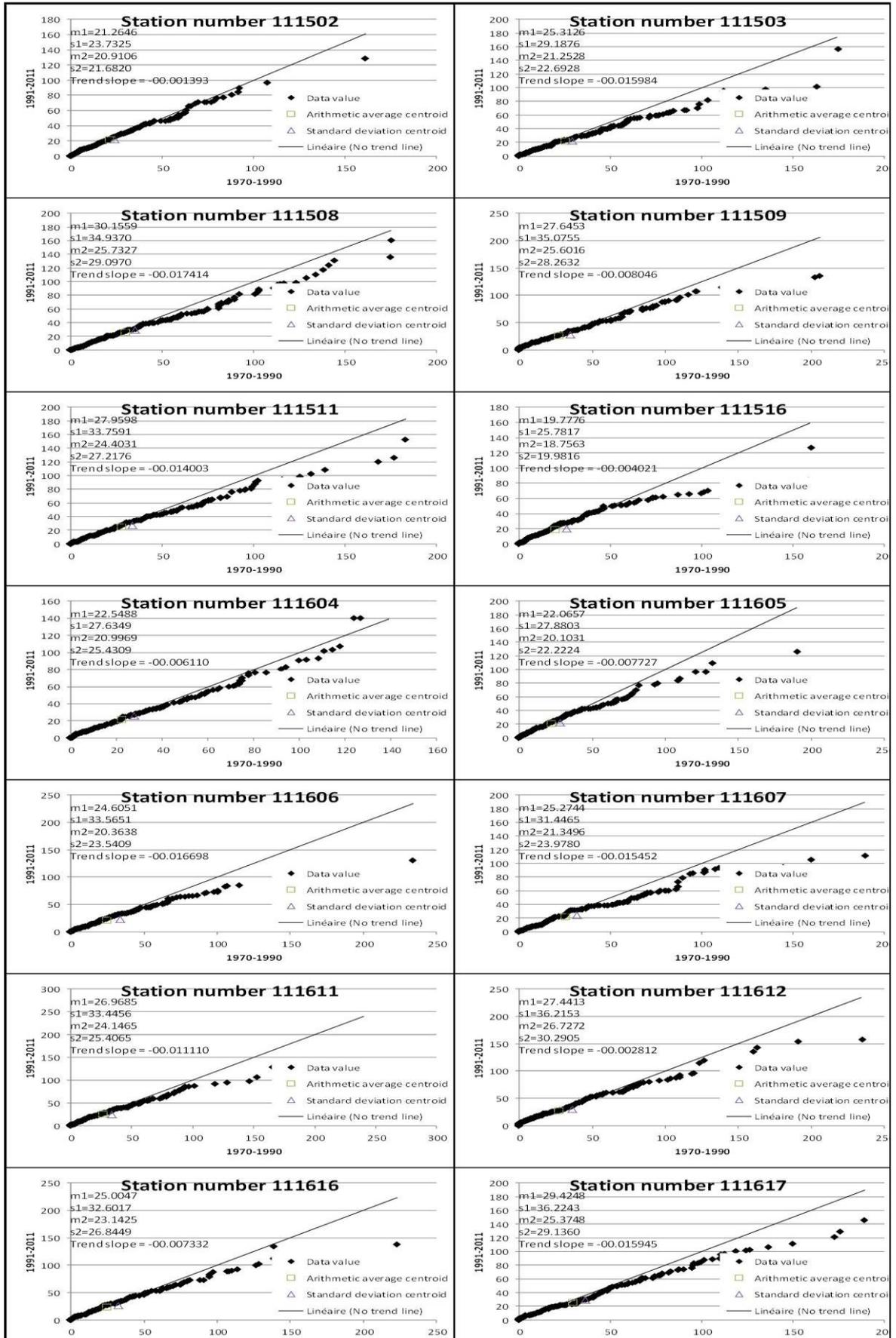


Figure 5.69 : Tendances innovantes descendantes (b)

La Figure 5.69 (a et b) présente les stations ayant une tendance décroissante. La majorité des points de dispersion se trouvent au-dessus de la ligne 1:1. Certaines stations affichent des décroissances au niveau des précipitations moyennes et élevées (110304, 110314, 111201, 111405, ...), alors que d'autres ont une décroissance au niveau des pluies élevées seulement (111401, 111502, 111509). On peut aussi rencontrer des décroissances au niveau des précipitations moyennes alors que les précipitations élevées sont en croissance (111204).

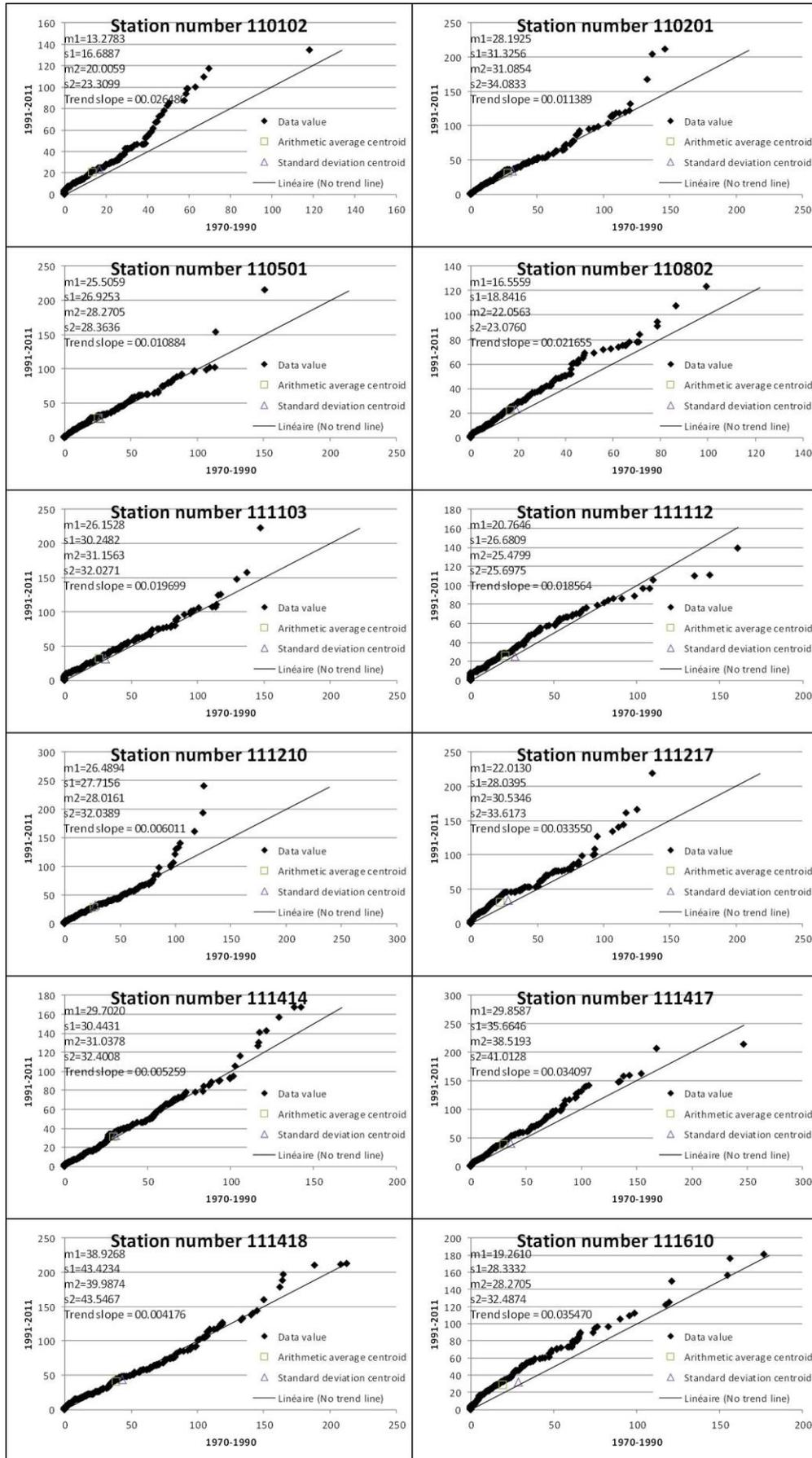


Figure 5.70 : Tendances innovantes ascendantes

Certaines stations ont des tendances croissantes comme le montre la Figure 5.70. La majorité d'entre elles présentent des augmentations au niveau des précipitations moyennes et élevées. La station 111610 affiche des accroissements des quantités enregistrées dans toutes les catégories de la pluviométrie (faibles, moyennes et fortes).

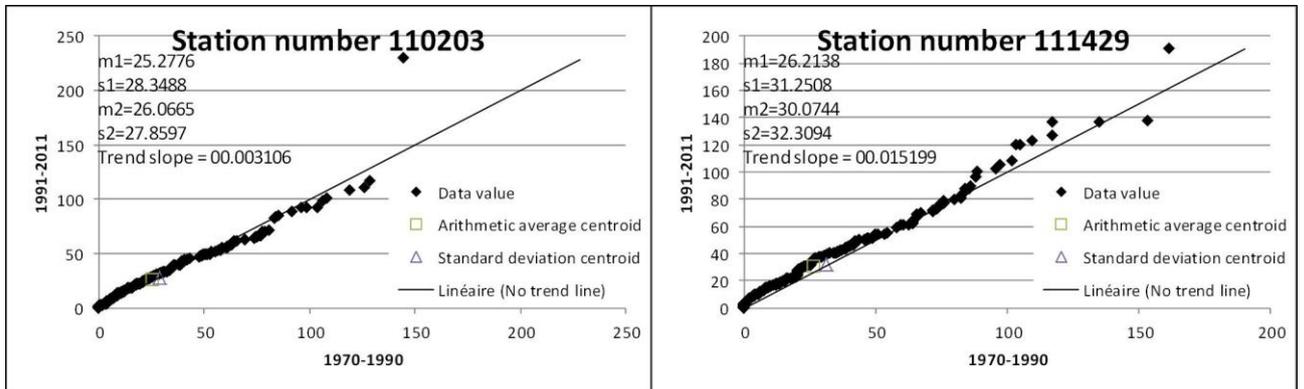


Figure 5.71 : Tendances innovantes (absence de tendance)

Les stations 110203 et 111429 ne présentent pas de tendance claire et c'est pourquoi nous les avons classées avec la catégorie d'absence de tendance.

**Tableau 5.9** : Les paramètres de l'analyse de tendance innovante

Code	1970-1990		1991-2011		Tendance		Interprétation		
	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Pente	Interception	Faible	Moyenne	Haute
110102	13.2783	16.6887	20.0059	23.3099	0.0265	9.9047	+	++	++
110201	28.1925	31.3256	31.0854	34.0833	0.0114	26.7421	o	o	+
110203	25.2776	28.3488	26.0665	27.8597	0.0031	24.8855	o	o	o
110304	33.0303	38.6450	27.3728	29.3741	-0.0223	35.8711	o	--	-
110305	28.4677	32.8083	27.0567	28.2517	-0.0056	29.1770	o	o	-
110309	28.6520	33.1795	26.7091	30.7548	-0.0076	29.6284	o	o	-
110312	29.6315	36.2753	24.5846	28.3937	-0.0199	32.1633	-	--	---
110314	38.5051	44.1380	29.6657	31.9661	-0.0348	42.9422	-	--	---
110402	27.9307	34.7079	25.8610	28.8045	-0.0081	28.9746	o	o	-
110501	25.5059	26.9253	28.2705	28.3636	0.0109	24.1208	o	o	+
110802	16.5559	18.8416	22.0563	23.0760	0.0217	13.7960	+	++	+++
111102	22.5953	28.3225	25.0024	27.0638	0.0095	21.3896	o	-	-
111103	26.1528	30.2482	31.1563	32.0271	0.0197	23.6507	+	+	++
111112	20.7646	26.6809	25.4799	25.6975	0.0186	18.4025	+	+	-
111201	24.0894	30.6122	23.3610	23.4124	-0.0029	24.4604	o	-	-
111204	31.9272	33.7005	28.2051	28.9446	-0.0147	33.7942	o	--	+
111210	26.4894	27.7156	28.0161	32.0389	0.0060	25.7210	o	o	+
111217	22.0130	28.0395	30.5346	33.6173	0.0335	17.7386	+	+	++
111401	24.9071	29.9304	25.2980	26.8069	0.0015	24.7114	o	-	--
111402	23.0661	28.4965	25.0508	25.8469	0.0078	22.0723	+	o	--
111405	27.5126	29.9954	22.4323	23.1530	-0.0200	30.0643	o	-	--
111413	29.3980	32.7321	28.5201	29.5487	-0.0035	29.8403	o	o	-
111414	29.7020	30.4431	31.0378	32.4008	0.0053	29.0325	o	o	+
111417	29.8587	35.6646	38.5193	41.0128	0.0341	25.5173	+	++	-
111418	38.9268	43.4234	39.9874	43.5467	0.0042	38.3967	o	o	+
111424	28.5181	34.2296	22.2780	23.0485	-0.0246	31.6525	o	-	--
111429	26.2138	31.2508	30.0744	32.3094	0.0152	24.2766	o	o	o
111502	21.2646	23.7325	20.9106	21.6820	-0.0014	21.4438	o	-	-
111503	25.3126	29.1876	21.2528	22.6928	-0.0160	27.3524	-	--	---
111508	30.1559	34.9370	25.7327	29.0970	-0.0174	32.3790	o	-	--
111509	27.6453	35.0755	25.6016	28.2632	-0.0080	28.6699	o	-	--
111511	27.9598	33.7591	24.4031	27.2176	-0.0140	29.7465	o	-	--
111516	19.7776	25.7817	18.7563	19.9816	-0.0040	20.2929	o	-	--
111604	22.5488	27.6349	20.9969	25.4309	-0.0061	23.3304	o	-	--
111605	22.0657	27.8803	20.1031	22.2224	-0.0077	23.0525	-	--	---
111606	24.6051	33.5651	20.3638	23.5409	-0.0167	26.7350	-	--	---
111607	25.2744	31.4465	21.3496	23.9780	-0.0155	27.2454	-	--	---
111610	19.2610	28.3332	28.2705	32.4874	0.0355	14.7430	+	+	+
111611	26.9685	33.4456	24.1465	25.4065	-0.0111	28.3891	o	-	--
111612	27.4413	36.2153	26.7272	30.2905	-0.0028	27.8026	o	-	--
111616	25.0047	32.6017	23.1425	26.8449	-0.0073	25.9407	o	-	--
111617	29.4248	36.2243	25.3748	29.1360	-0.0159	31.4604	-	--	---

Le Tableau 5.9 contient les paramètres de l'analyse innovante de la tendance. Certaines stations ont des tendances décroissantes (croissantes) dans les trois parties de la pluviométrie (faible, moyenne et haute). Alors que d'autre ont des tendances différentes dans leurs parties. L'analyse du Tableau 5.9 et des figures de tendances (Figure 5.69 "a et b", Figure 5.70 et Figure 5.71) permet de déterminer les stations ayant une tendance croissantes (12 stations) et décroissantes (28 stations). Cependant, deux stations sont classées dans le groupe de non tendance (Figure 5.71).

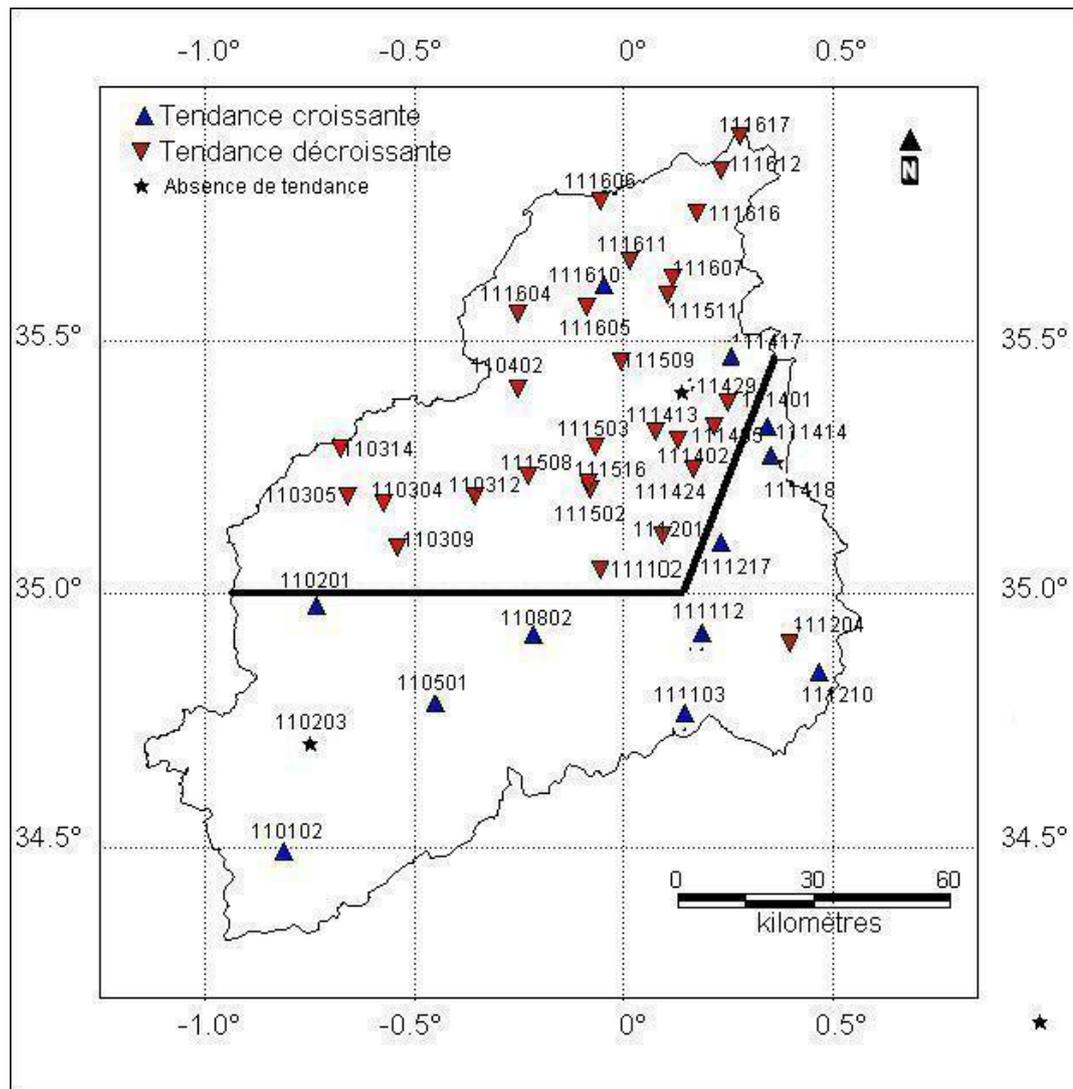
Sur la Figure 5.70 la majorité des points de dispersion se trouvent au-dessus de la ligne droite 1:1, et donc, il y a une tendance générale à la hausse. Dans ces graphiques, la moyenne arithmétique et le barycentre des écarts-type se situent au-dessus de la ligne de non tendance, ce qui indique une croissance de la moyenne et aussi de l'écart-type. Il est évident qu'au niveau des fortes valeurs des précipitations, la tendance est plus efficace, car les points sont plus loin de la ligne 1:1. Ce cas est valable pour les stations 110102, 110201, 110501, 110802, 111103, 111210, 111217 et 111414, qui sont dans la partie moyenne du bassin versant de la Macta, où le climat continental est efficace. Certaines stations ont une baisse ou aucune tendance significative au niveau des précipitations faibles et moyennes, mais la tendance est accrue à grandes valeurs. Ce point peut être l'information préliminaire sur l'augmentation de la fréquence des crues de ces stations à l'avenir.

Plus de la moitié (67%) des stations ont une composante tendancielle décroissante (Figure 5.69 a et b). Les points de dispersion de ces graphiques se trouvent, majoritairement, sous la ligne de non tendance 1:1. On peut en déduire que, dans chacune de ces stations, la tendance de la pluviométrie est à la baisse. Ces stations sont 110304, 110305, 110309, 110312, 110314, 110402, 111102, 111201, 111401, 111402, 111405, 111413, 111424, 111502, 111503, 111508, 111509, 111511, 111516, 111605, 111606, 111607, 111611, 111612, 111616 et 111617.

Il faut souligner la spécificité des stations 111204 et 111604, qui ont une baisse de la pluviométrie au niveau des valeurs moyennes mais une légère hausse pour les fortes valeurs.

La plus part des stations ont une décroissance au niveau des plus grandes hauteurs de la pluviométrie alors que leurs hauteurs moyennes et faibles sont sur ou sous la ligne de non tendance.

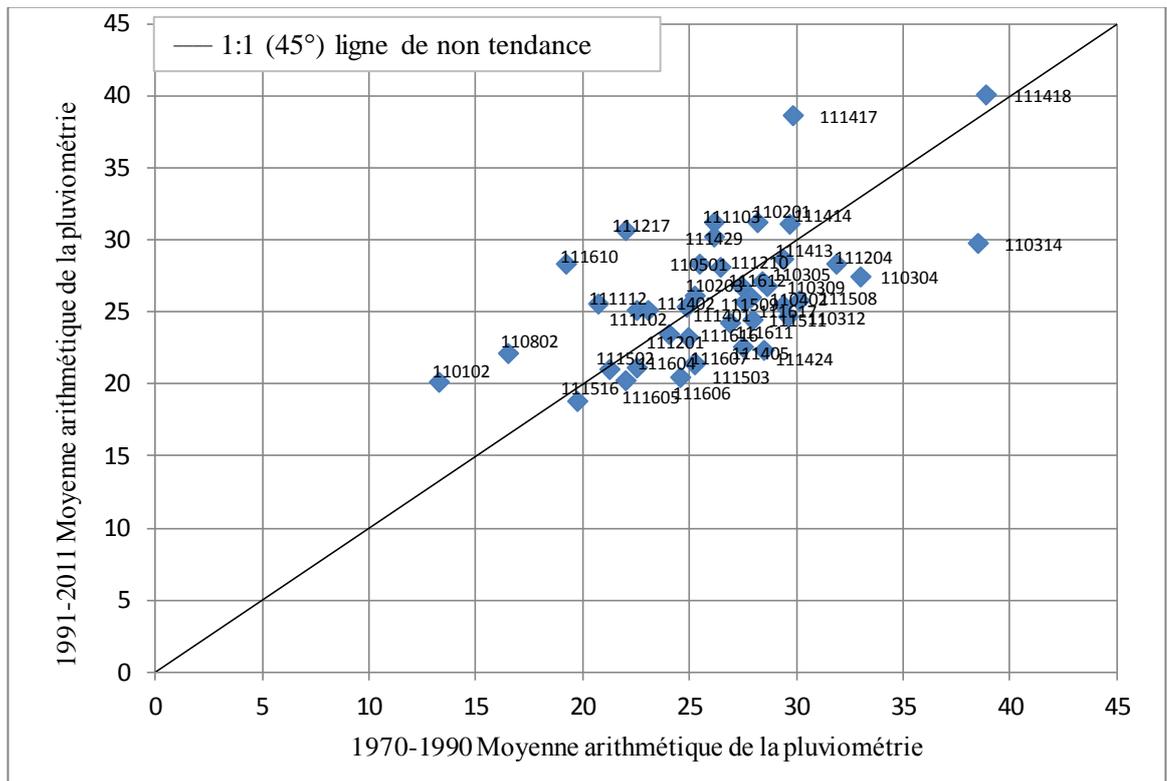
Pour de plus amples interprétations, les tendances des cas croissants et décroissants sont indiquées respectivement par les symboles  $\Delta$  et  $\nabla$  sur la carte de la Figure 5.72.



**Figure 5.72 :** Répartition spatiale de la tendance de la pluviométrie mensuelle

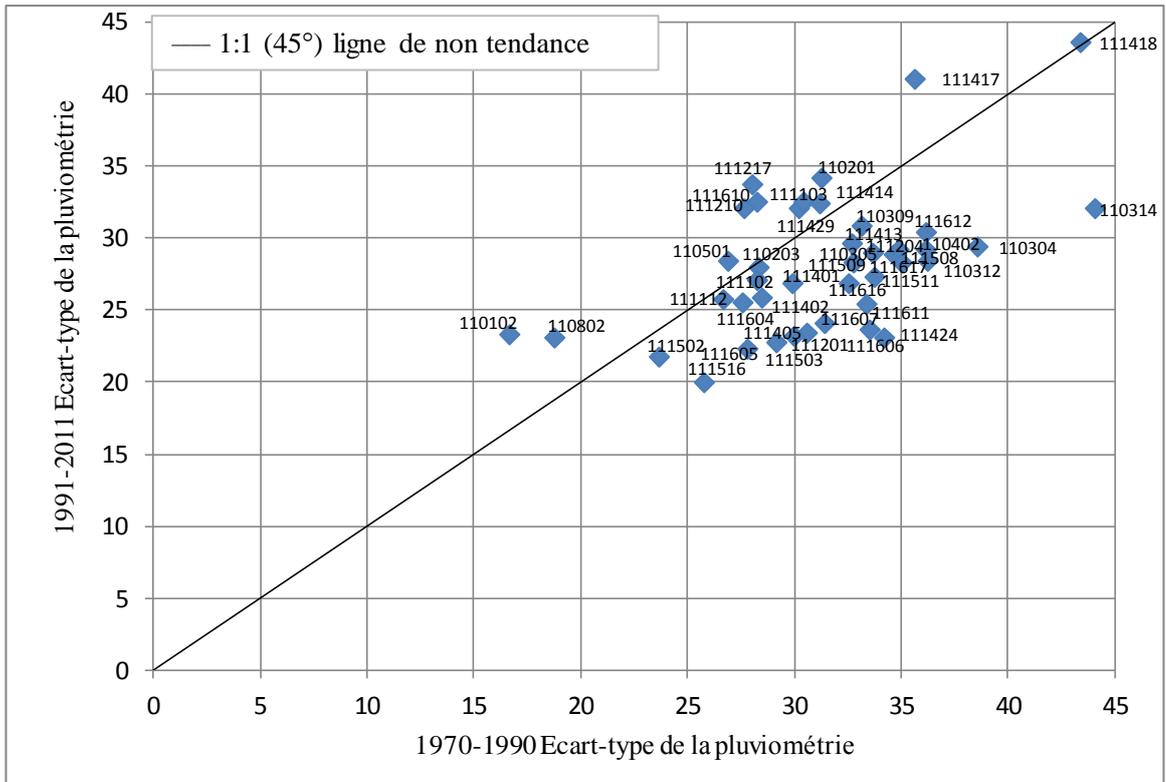
Après l'insertion des symboles de la tendance croissante ( $\Delta$ ), décroissante ( $\nabla$ ) et neutre ( $\star$ ) sur la carte de la Figure 5.72, il est clair que la partie nord, près de la zone côtière de la mer Méditerranée dans le bassin de la Macta, est sous un régime à la baisse. Alors que dans le sud, les tendances sont en augmentation. La principale raison, à notre avis, est que l'impact du changement climatique est apparemment moins dur dans les zones de haute altitude. Pour information, neuf des 12 stations de la tendance croissante ont une altitude supérieure à 600m (alors que 13 parmi 42 station ont une altitude > 600m). D'autre part, d'un point de vue météorologique, la partie nord du bassin versant de la Macta est subjective au climat méditerranéen, qui est marqué par une réduction de la pluviométrie de 20 à 30% (Meddi et al, 2002). Au sud, une tendance continentale continue, entraînant une aridité marquée, des hivers froids, et en particulier des étés chauds (Meddi et al., 2009).

Afin d'être en mesure de décrire la variabilité des tendances dans le domaine Macta, trois autres graphiques sont présentés concernant la variabilité régionale des moyennes arithmétiques, des écarts-types et des pentes de tendances (Figure 5.73, Figure 5.74 et Figure 5.75).



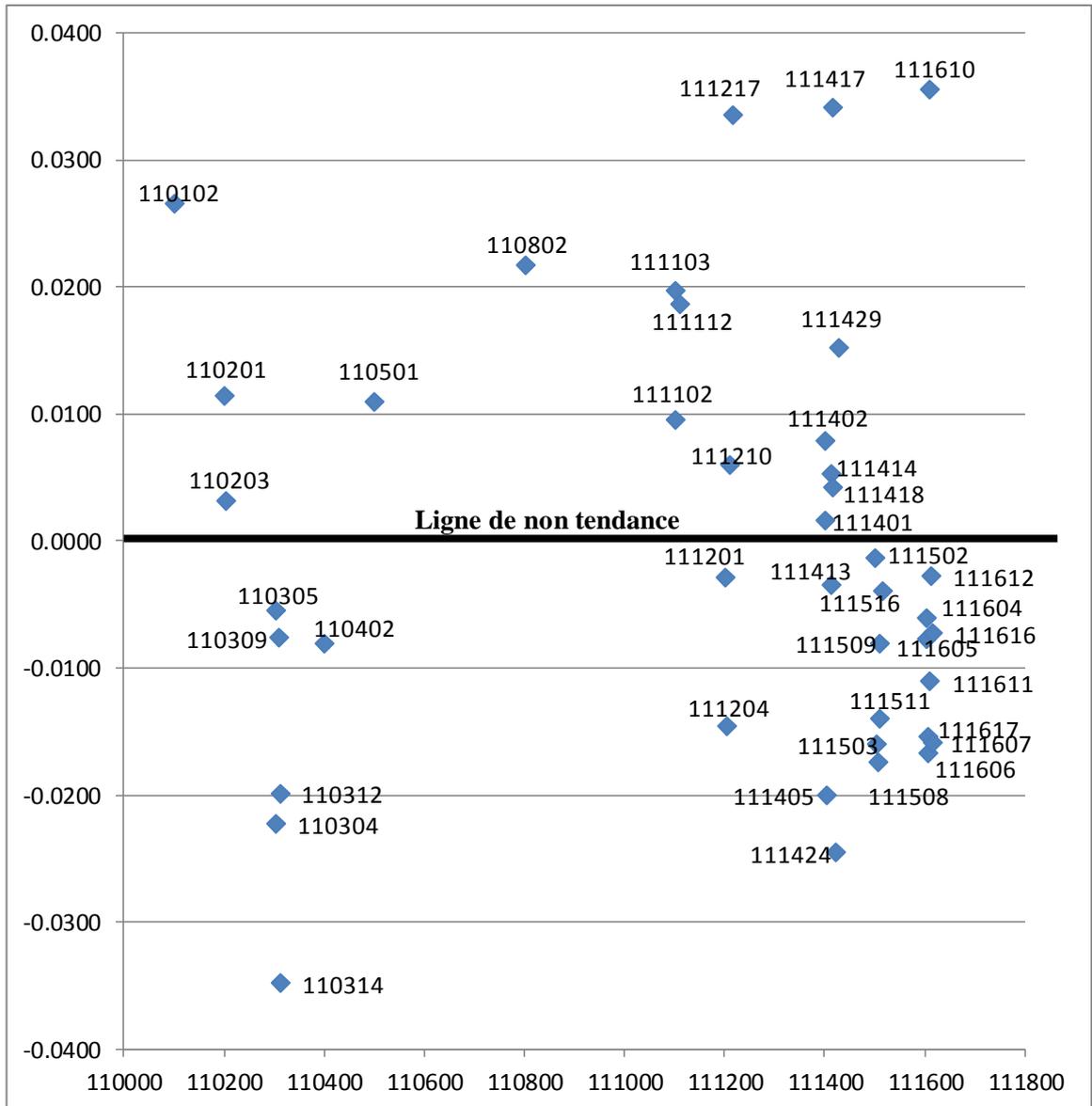
**Figure 5.73:** Graphe de l'identification de la variabilité régionale (moyenne arithmétique)

Bien que la carte de la Figure 5.72 montre l'emplacement des tendances croissantes et décroissantes, elle ne peut refléter la comparaison entre elles comme la magnitude de la pente de la tendance. La Figure 5.73 est très utile à cet effet, car elle détermine la fluctuation des moyennes entre les deux périodes. Plus une station est proche (loin) de la ligne 1:1 moins (plus) est le changement au niveau des moyennes. Par exemple, la station 111417 semble la plus touché par la variation de sa moyenne puisqu'elle passe de 29.85mm à 38.85mm. La majorité des stations semblent être proche de la ligne droite 1:1 et donc la variation de leurs moyennes est faible.



**Figure 5.74:** Graphe de l'identification de la variabilité régionale (écart-type)

La Figure 5.74 est utile pour la comparaison de la variabilité régionale en utilisant les écarts-type. Dans cette figure, la station la plus proche de la ligne de non tendance est celle ayant une plus faible variabilité et inversement. La station 110314 est la plus éloignée de la ligne oblique et donc c'est la station qui a eu plus de variabilité de ces enregistrements. Elle a une plus faible variabilité car elle se trouve au-dessous de la ligne. Cela veut dire que ses valeurs varient moins durant la deuxième période. La même constatation est faite pour la station 110102 mais en inversant le principe. Les stations 111418 et 110203 se trouvent exactement sur la ligne et donc elles n'ont subi aucun changement dans leurs variabilités.



**Figure 5.75:** Graphe de l'identification de la variabilité régionale (pente de la tendance)

Enfin, la Figure 5.75 indique la position des pentes des stations par rapport à la ligne de non tendance (pente=0). Les stations se trouvant à la même hauteur ont la même pente. Les stations 110312, 111405 et 111506 ont des pentes égales. La station 110314 (111610) a eu la plus grande décroissance (croissance) puisqu'elle a la plus faible (grande) pente.

#### 5.5.4. Conclusion

Dans l'analyse innovante des tendances, chaque série de la pluviométrie mensuelle est divisée en deux parties égales (deux périodes), puis les valeurs ordonnées sont représentées les unes contre les autres sur un système de coordonnées cartésien, de telle sorte que la première demi-série se trouve sur l'axe des abscisses. Sur ce modèle, les points de dispersion indiquent la nature de la

tendance. Si les points sont au-dessus (au-dessous) de la ligne droite 1:1 ( $45^\circ$ ) alors une tendance à la hausse (baisse) est cachée dans la série originale des données. Ce concept est appliqué à des relevés mensuels de précipitations de 42 stations météorologiques du bassin versant de la Macta. La longueur de chaque série est de 42 ans (de 1970 à 2011). Le modèle de tendance est présenté pour chaque station en indiquant les paramètres calculés (pente de la tendance, moyennes arithmétiques et écarts-type). Non seulement les tendances, mais aussi les variabilités au sein de chaque station météorologique sont mesurées et les résultats sont présentés dans différentes figures. L'étude indique la variation des tendances temporelles à chaque station, en plus de la variation de la tendance spatiale. Les comparaisons des pentes des tendances sont présentées sur le modèle, ce qui donne l'opportunité de comparaisons. Le modèle fournit également des tendances détaillées au niveau des valeurs des précipitations mensuelles faibles, moyennes et élevées. On remarque aussi la formation d'une région de baisse de la pluviométrie dans la partie Nord, près de la zone côtière de la mer Méditerranée, du bassin la Macta. Alors qu'au Sud, une autre région d'augmentation des précipitations est formée.

## 5.6. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude la variabilité de la pluviométrie. Quatre méthodes sont utilisées. Le  $r$  de Bravais Pearson, le  $\tau$  de Kendall, le  $\rho$  de Spearman et enfin la méthode innovante de Şen. En utilisant les trois premières méthodes, nous avons déterminés les tendances mensuelles, saisonnières et annuelles.

L'étude des tendances mensuelles a révélée des concordances globales entre les trois méthodes. Toutes s'accordent sur la décroissance du mois de mars et de la croissance du mois d'août. Le nombre de stations peut être quelque peu différent d'une méthode à une autre.

En ce qui concerne les tendances saisonnières, la concordance sur la décroissance de la saison de l'hiver et le printemps, contre la croissance de la saison de l'été.

D'un point de vue annuel, toutes les trois méthodes s'harmonisent sur la tendance à la baisse des stations situées au Centre-Nord du bassin de la Macta et la tendance à la hausse des stations situées au Sud de la Macta.

La méthode de l'analyse innovante des tendances étudie toute la série pluviométrique (tous mois confondus) et donc les résultats touchent la tendance globale de chaque station. D'une manière générale les résultats s'accordent avec ceux trouvés avec les trois méthodes précédentes en marquant une baisse de la pluviométrie au Centre-Nord et une hausse au Sud de la Macta.

## VI. Chapitre 6 : Prévision de la pluviométrie

### 6.1. Introduction

Les impacts du changement climatique sont parmi les effets significatifs futurs les plus importants sur les domaines socio-économiques, culturels et politiques de toute société. Il est donc nécessaire de connaître les impacts futurs qui ne peuvent être modélisées que par des scénarios logiques et rationnels. Les informations sur le changement climatique sont disponibles à l'échelle mondiale en tant que sortie des modèles climatiques globaux (ou Modèle de Circulation Générale, en anglais, General Circulation Model "GCM")   des résolutions très grossières<sup>1</sup>. Les GCM produisent des données futures artificielles concernant diverses variables météorologiques (température, précipitations, humidité relative, la vitesse du vent, l'irradiation, etc.). Malheureusement, les produits finaux des GCM sont disponibles seulement au niveau d'un ensemble de nœuds distant d'une centaine de km les uns des autres alors que plusieurs processus régionaux se produisent à des échelles spatiales de 50 km et moins (Cholette, 2013). Il est donc nécessaire de réduire l'échelle de ces données à des niveaux plus petits et, si possible, à un seul point précis pour que la planification future puisse être réalisée à un niveau local, de sorte que les impacts du changement climatique peuvent être évalués à diverses activités humaines telles que la disponibilité des ressources en eau.

Ce passage d'une petite échelle vers une plus grande s'appelle réduction d'échelle, ou "downscaling". Cette méthode est reconnue par de nombreux chercheurs au cours des trois dernières décennies (Kim et al, 1984; Gates, 1985; Robinson et Finkelstein, 1989 ; Lamb, 1987). Depuis des mesures météorologiques et climatiques sont disponibles à un ensemble de stations au sol.

Le but de ce chapitre est d'élaborer la méthode de réduction d'échelle statistique (Statistical Downscaling, SD) et de proposer l'utilisation de la fonction de dépendance spatiale (SDF) pour un tel but. Cette dernière réduit les données de sorties des GCM, à l'échelle locale.

Les déficits hydriques, la croissance démographique et la migration supplémentaire vers les grands pôles augmentent les problèmes liés au stress hydrique.

Les résultats de cette étude devraient guider les administrateurs locaux vers plus d'alertes sur les répercussions des effets du changement climatique sur les ressources en eau.

### 6.2. Méthodologie

Un point important dans tout modèle de réduction d'échelle est d'envisager une procédure d'estimation spatiale où il y a plusieurs approches différentes ( en, 2010). Deux étapes principales

---

<sup>1</sup>La distance moyenne entre deux points de grille des MCGs varie de 100 à 250 km (soit de 1    2.5 ).

sont nécessaires dans un modèle de réduction d'échelle. La première est l'utilisation d'une fonction de dépendance spatiale (Spatial Dependence Function, SDF) pour transférer les données de sortie de GCM à partir des points les plus proches de la grille vers les stations étudiées. La deuxième étape consiste à ajuster les précipitations mensuelles du scénario régionalisé avec les données pluviométriques locales.

Dans cette thèse, la SDF dépend de mesures et leurs distances par rapport au point d'estimation. Dans toute méthode de downscaling, la méthode d'estimation spatiale occupe l'ingrédient le plus important.

Afin d'obtenir les quantités de précipitations à chaque station il est nécessaire de déterminer la SDF. Cette dernière représente la dépendance régionale entre la station concernée et les nœuds environnants du modèle utilisé. Dans de nombreuses procédures de mise à l'échelle les moyennes pondérées sont utilisées. C'est la méthode utilisée dans notre travail, où le mot poids (weight) est utilisé comme facteur de dépendance spatiale. L'équation (6.1) exprime le calcul de la moyenne pondérée (Şen, 2009b).

$$Z_p = \sum_{i=1}^n \alpha_i Z_i \quad (6.1)$$

Où  $\alpha_i$  sont les coefficients de pondérations;  $Z_p$  est le prédicand;  $Z_i$  sont les prédicteurs.

L'expression (6.1) peut être écrite sous sa forme la plus explicite (équation 6.2).

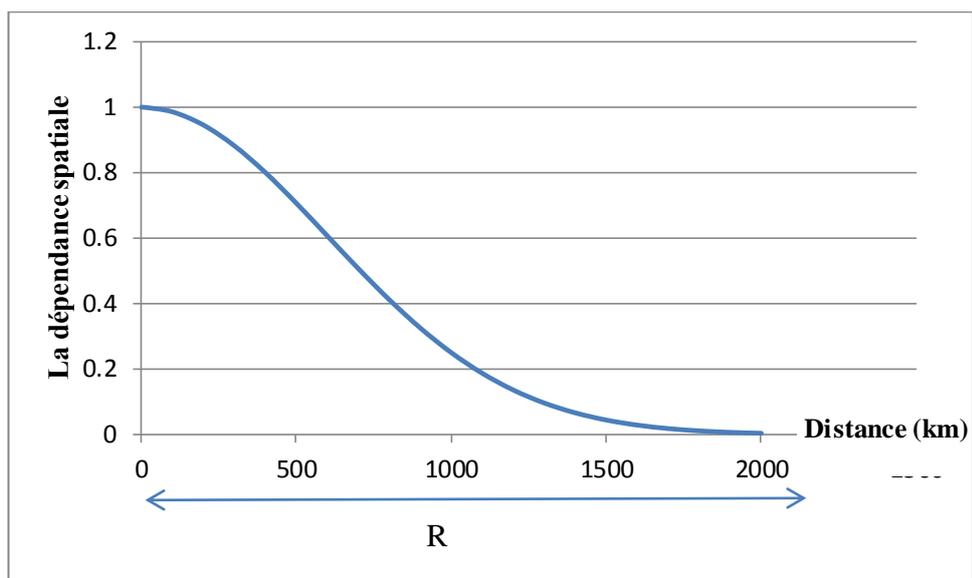
$$Z_p = \sum_{i=1}^n \left( \frac{W_i}{W_T} \right) Z_i \quad (6.2)$$

Où  $W_i$  est le poids attaché au  $i^{\text{ème}}$  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.

Logiquement, la SDF indique le changement de la dépendance régionale avec les distances. Par conséquent, la dépendance régionale est inversement proportionnelle avec la distance. Donc, si la distance est nulle, la valeur de la SDF est égale à 1, puis avec l'augmentation de la distance, la valeur de la SDF diminue jusqu'à atteindre zéro. La forme mathématique de la SDF entre le poids,  $w$ , et la distance,  $d$ , a été obtenue par l'équation 6.3 et elle est représentée sur la Figure 6.1.

$$w = \exp \left[ - \left( \frac{d}{850} \right)^2 \right] \quad (6.3)$$

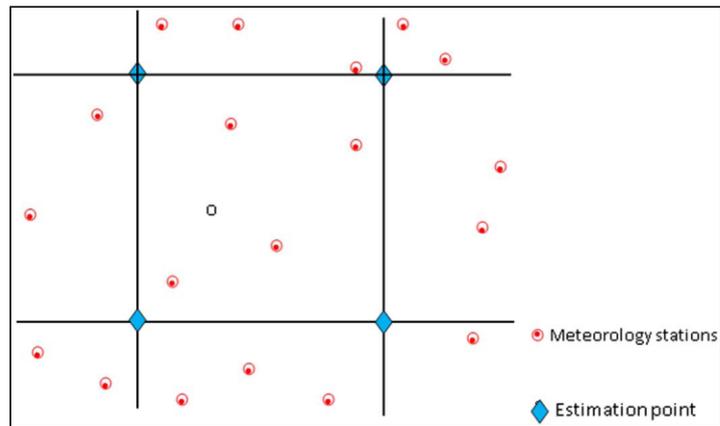
L'expression 6.3 a déjà été mentionnée dans la littérature par Barnes (1964) comme fonction géométrique spatiale, mais il n'a pas donné la façon de calcul empirique à partir des données disponibles.



**Figure 6.1 :** Les différentes formes de la fonction de dépendance spatiale (SDF)

La Figure 6.1 montre le rayon d'influence (R) d'un point donné. Thiebaut et Pedder (1987) ont soulevé le désavantage de cette méthode. Elle ne parvient pas à distinguer entre la localisation des stations. Deux stations à égale distance d'un point de la grille auront le même poids, ce qui peut conduire à des biais importants. Signalons, que ce biais est minimisé avec l'utilisation de plusieurs nœuds pour une même station.

La méthodologie de réduction d'échelle utilisée dans ce travail est celle proposée par Şen et al. (2012). Elle est appelée la méthode de réduction d'échelle quadratique (Quadrangle Downscaling Methodology, QDM). Pour chaque station donnée, les quatre nœuds du GCM les plus proches entourant la station sont utilisés. La structure de ce modèle est représentée sur la Figure 6.2 de façon schématique.



**Figure 6.2 :** La structure de la méthode de réduction d'échelle quadratique (Şen et al., 2012)

Les données de la pluviométrie estimées sont corrigées des effets de relief. Une variété de méthodes de correction statistiques ont été développées et certaines inter-comparaisons ont été effectuées entre ces méthodes sous différents champs (Teutschbein and Seibert, 2013; Watanabe et al, 2012; Lafon et al, 2013.). Plusieurs méthodes ont été développées, de la méthode linéaire simple, les méthodes de delta, à la correction multiplicative (Hay et al., 2000 ; Graham et al., 2007); à la correction mensuelle non linéaire (Bordoy and Burlando, 2013) et finalement les lois de puissance (Leander and Buishand 2007; Hurkmans et al., 2010). Certaines ne portent que sur l'erreur de la différence des moyennes, tandis que d'autres couvrent à la fois la moyenne et la variance. D'autres se concentrent sur la correction de la moyenne et l'écart type avec les fréquences des jours humides, que l'on appelle la cartographie de la distribution (Teutschbein and Seibert, 2013).

Dans ce travail, la régression linéaire multiple est utilisée. Cette dernière est une généralisation de la régression linéaire simple. Nous cherchons à expliquer, avec le plus de précision possible, les valeurs de la pluviométrie annuelle d'une station (variable à expliquer "Y<sub>i</sub>"), à partir des quatre nœuds du GCM (variables explicatives). Le modèle théorique ainsi formulé prend la forme :

$$Y_i = a_0 + a_1 X_{i1} + a_2 X_{i2} + a_3 X_{i3} + a_4 X_{i4} \quad (6.4)$$

Avec

Y<sub>i</sub> la pluviométrie estimée d'une station météorologique,

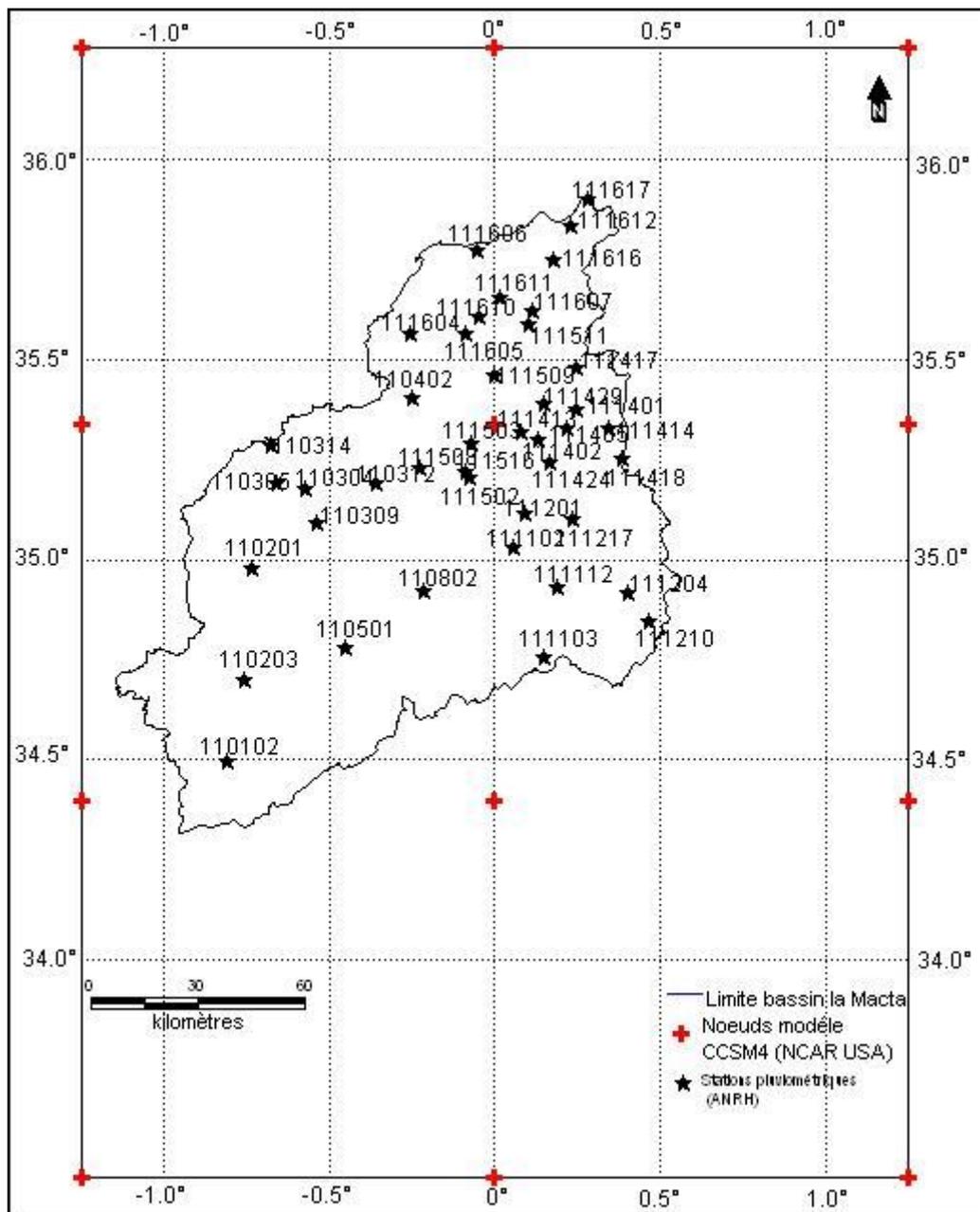
X<sub>i1</sub>, X<sub>i2</sub>, X<sub>i3</sub> et X<sub>i4</sub> sont les valeurs de la pluviométrie estimée au niveau des nœuds du GCM,

a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub> et a<sub>4</sub> sont les paramètres de la régression linéaire multiple à déterminer.

### 6.3. Résultats et discussion

Dans cette étude, le modèle CCSM4 (Community Climate System Model, version 4) du centre national pour les recherches atmosphériques (National Center for Atmospheric Research, NCAR, USA) est utilisé. Les données estimées à l'horizon 2100 sont téléchargé du centre de distribution de données du GIEC.

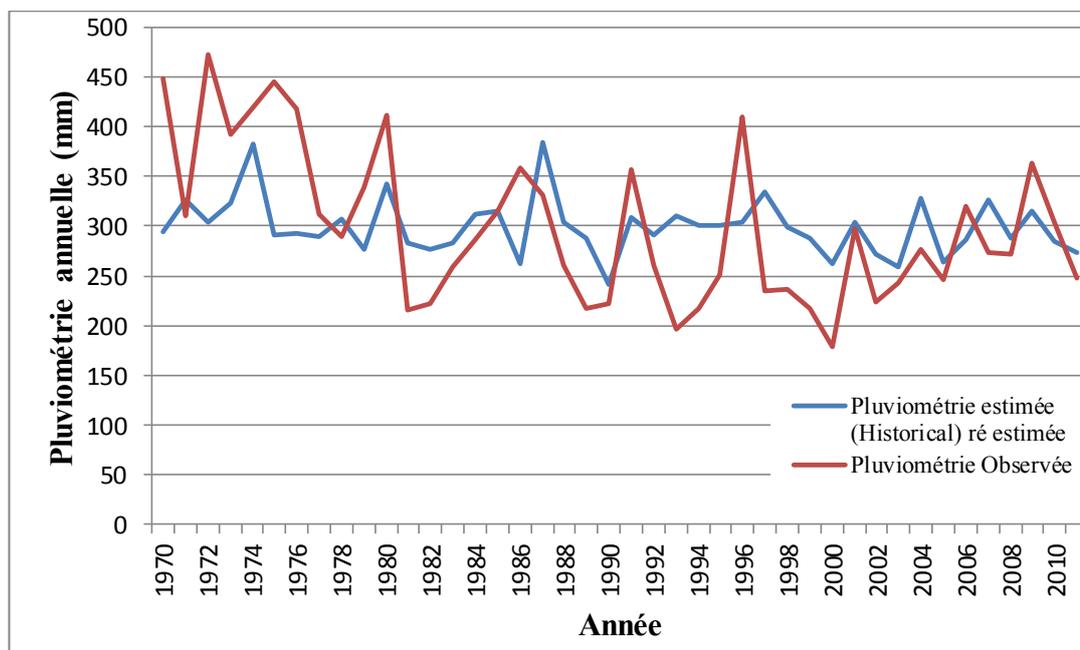
La Figure 6.3 montre la disposition des stations étudiées dans le bassin versant de la Macta et additionnellement, la localisation des nœuds du modèle CCSM4. Les dimensions de la grille de ce modèle sont 105x115km.



Cependant, la distance entre les stations pluviométriques est relativement très faible. Il est donc nécessaire de réduire les sorties du GCM à chaque emplacement de station. A chaque nœud du modèle global du NCAR (CCSM4) est considéré les prévisions des quatre scénarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP 8.5).

Nous calculons la distance séparant chaque station aux nœuds du GCM. A partir de ces distances nous pouvons déterminer les nœuds les plus proches à chaque station. A cet égard, quatre points de la grille du GCM sont affectés pour chaque station. Les coefficients (poids)  $W_i$  sont calculés en utilisant l'équation 6.3. Pour chaque scénario du GCM, nous estimons les valeurs de la pluviométrie mensuelle de 2010 à 2100 pour nos stations utilisées.

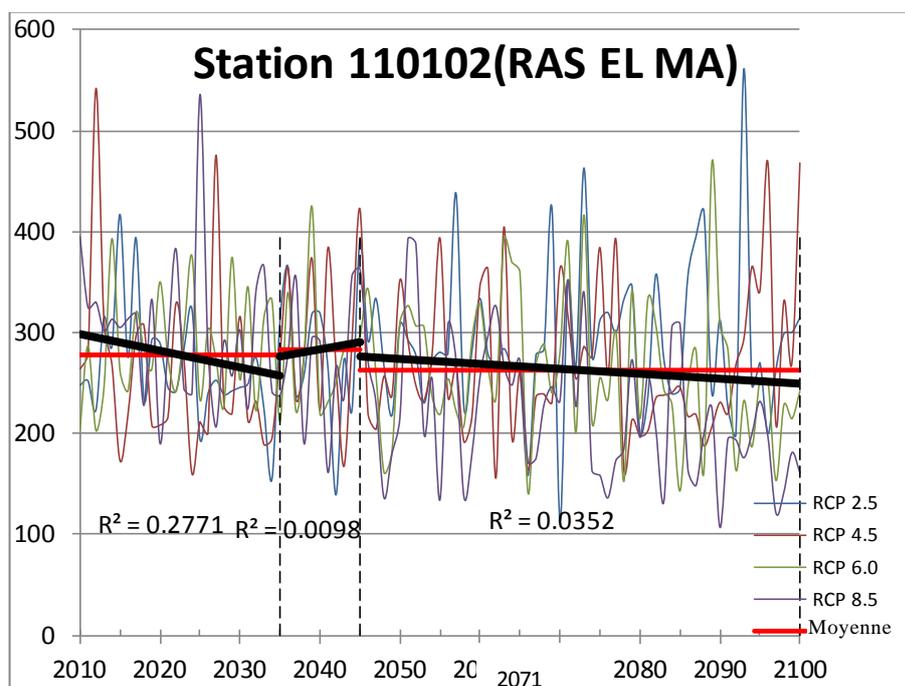
Les valeurs estimées doivent ensuite être corrigé. Cette correction utilise les données observées et les données estimées (Historical data) de la période 1970-2011. Une régression linéaire multiple est appliquée à chaque station. Les paramètres de la droite de régression sont utilisées pour ré estimer la pluviométrie annuelle de nos stations. La comparaison entre les valeurs observées et ré estimées de la station de Matemore (111405) montre l'existence de biais mais l'allure générale est respectée (Figure 6.4).



**Figure 6.4 :** Comparaison entre les valeurs observées et ré estimées de la période 1970-2011

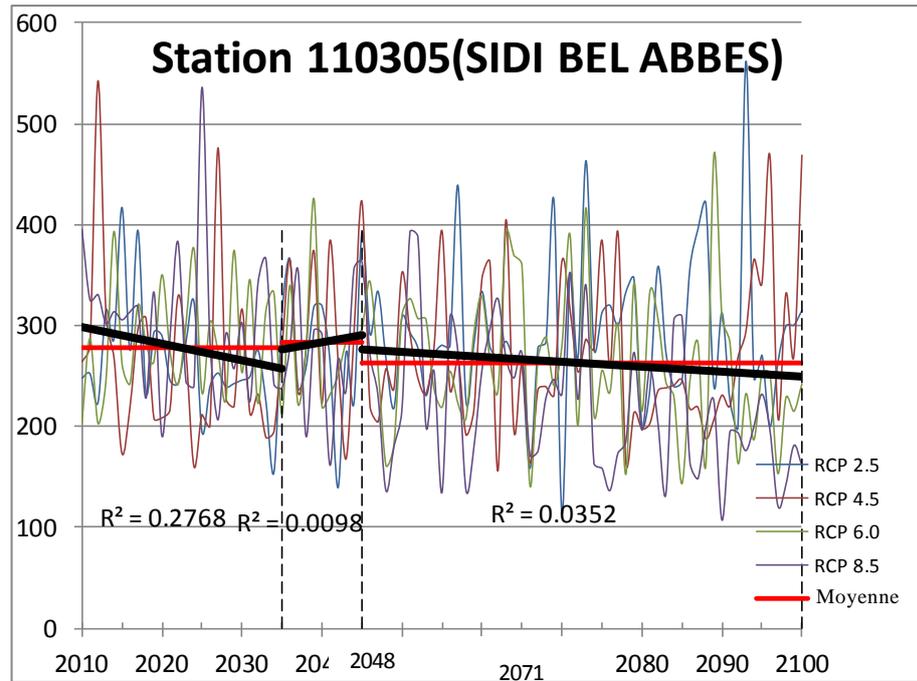
Nous avons sélectionné cinq stations modèles situées au Nord, Est, Ouest et Sud pour décrire les prévisions du futur (Figure 6.5 à Figure 6.9). Les cinq figures contiennent les quatre scénarios du cinquième rapport (AR5) du GIEC. Nous avons utilisé la moyenne de ces scénarios pour décrire la tendance future (lignes noir). Toutes les prévisions peuvent être divisées en trois

périodes. Pour chacune de ces périodes, nous déterminons la tendance (lignes noirs) et la moyenne (lignes rouges).



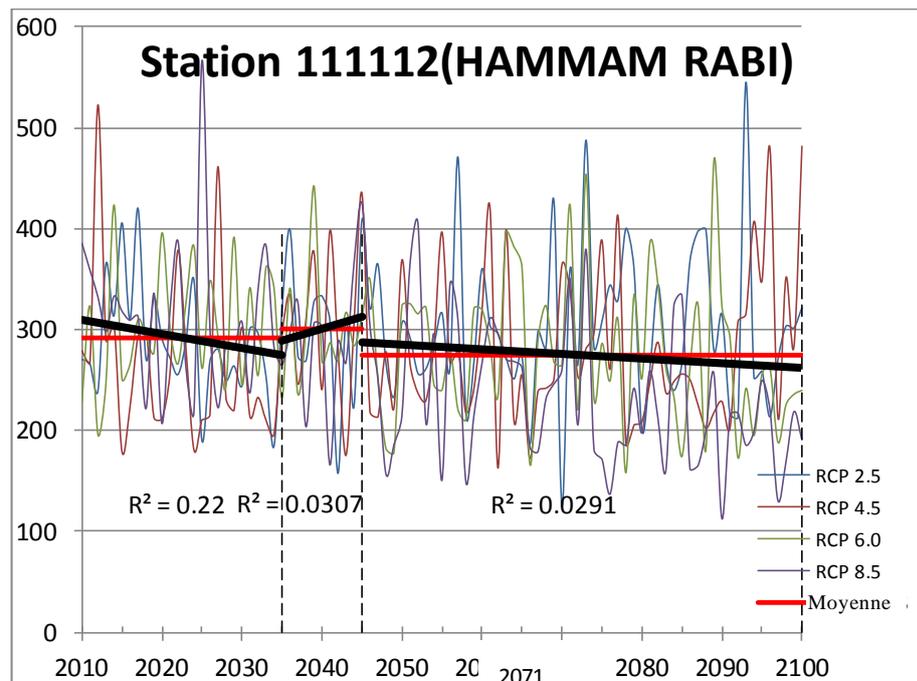
**Figure 6.5:** Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station Ras El ma)

Bien que la Figure 6.5 ait des périodes sèches et humides en alternance des valeurs futures des précipitations pour les différents scénarios, il est évident que la station de Ras El Ma a une tendance décroissante en utilisant les précipitations moyennes des quatre scénarios. Il apparaît une tendance à la baisse jusqu'en 2035 suivi d'une autre tendance d'augmentation jusqu'en 2045 et au-delà une autre tendance à la baisse l'emporte. Les coefficients de corrélation de la première et la troisième période sont significatifs pour un seuil de signification de 0.05, par contre celui de la deuxième période ne l'est pas. Ceci augmente la probabilité de l'installation d'une sécheresse jusqu'à l'an 2100. En prenant en compte ces résultats les ressources en eau futures peuvent être planifiées et gérées d'une manière appropriée et les risques attachés mieux dirigées. Remarquons aussi que la moyenne des trois périodes est en diminution malgré que la deuxième affiche une petite augmentation. Les valeurs des moyennes sont respectivement 277.9mm, 283.2mm et 262.8mm.



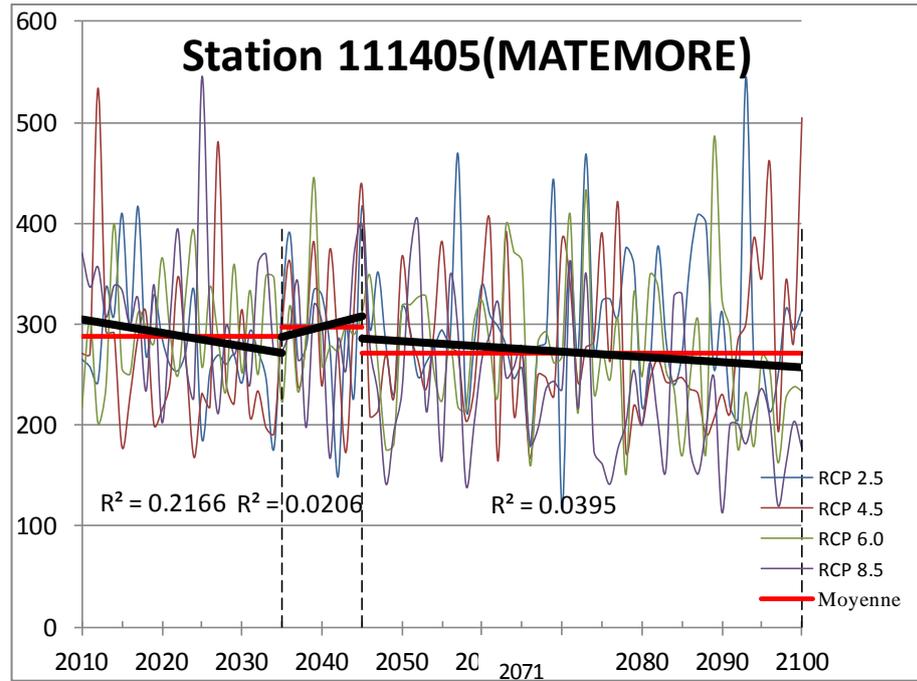
**Figure 6.6:** Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station SBA)

La Figure 6.6 possède les mêmes caractéristiques que la figure précédente. La tendance décroissante prime sur les périodes 2010-2035 et 2045-2100. Les moyennes des trois périodes sont selon l'ordre de 278.1mm, 283.4mm et 263.0mm.



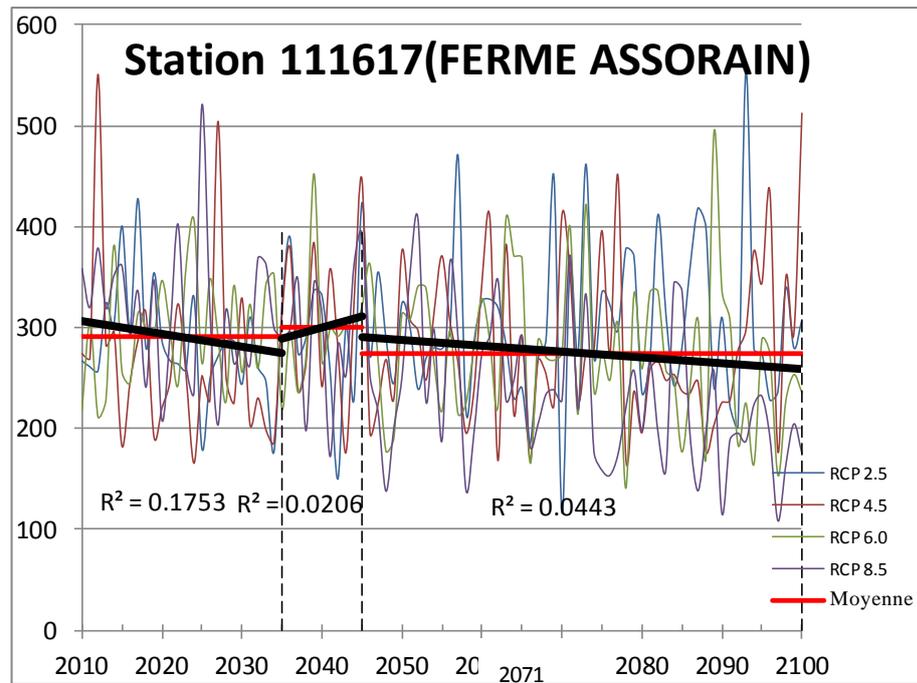
**Figure 6.7:** Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station Hammam Rabi)

Les mêmes prévisions sont pour la station de Hammam Rabi semble. La tendance décroissante jusqu'à 2035, puis une légère croissance et finalement une baisse s'installe jusqu'à 2100. La moyenne des périodes représente les tendances affichées avec 291.8mm pour la première, 300.7mm pour la deuxième puis descend à 274.7mm durant la troisième période.



**Figure 6.8:** Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station Matemore)

La station de Matemore ne fait pas l'exception à la règle et possède les mêmes caractéristiques que les autres stations. Deux périodes de décroissance (2010-2035 et 2045-2100) séparées par une période de croissance (2035-2045). Les coefficients de corrélation de la première et la troisième période sont significatif pour un  $\alpha=0.10$ . Les moyennes des trois périodes sont de 288.1mm, 297.2mm et 271.5mm.

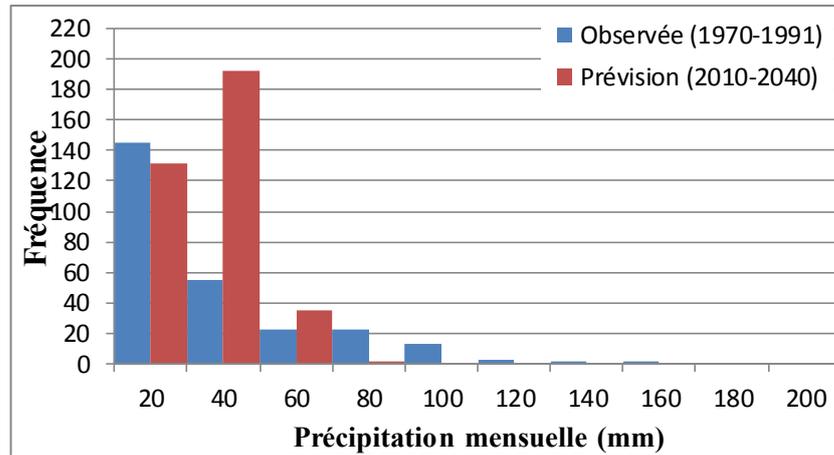


**Figure 6.9:** Les données de la pluviométrie annuelle à l'horizon 2100 (Station Ferme Assorain)

Les prévisions de la station Ferme Assorain, qui se trouve au Nord de notre bassin a les mêmes caractéristiques que la majorité des stations étudiées. Ainsi, nous remarquons une décroissance (avec un  $r$  significatif pour  $\alpha=0.10$ ) jusqu'à 2035, puis une période de croissance, qui n'est pas très clair ( $r$  non significatif) et puis la décroissance s'installe à partir de 2045. Les moyennes des trois périodes sont 291.1mm, 300.3mm et 274.2mm.

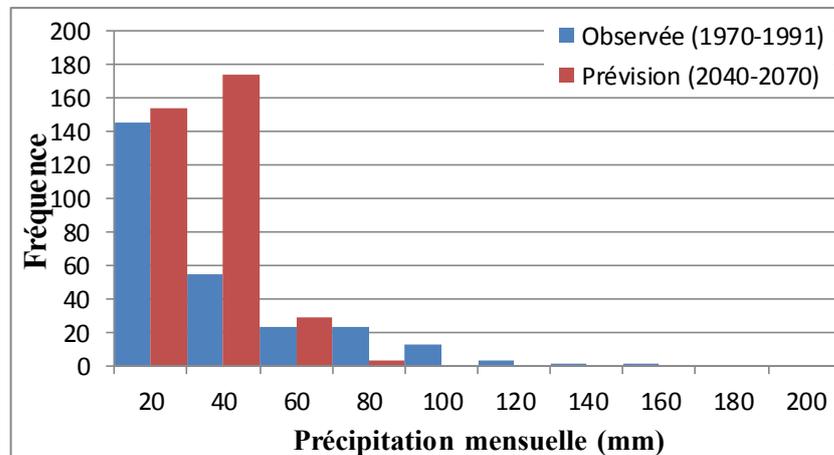
Puisque nos stations se ressemblent beaucoup dans leurs prévisions, nous allons prendre la station de Matemore (111405) comme exemple pour continuer nos analyses.

Pour une meilleure évaluation de la sécheresse et de risques d'inondation des précipitations futures trois graphes d'histogrammes (chacun d'une durée de 30 ans) sont construit (Figure 6.10 à Figure 6.12). Un premier coup d'œil sur ces graphiques indique que les précipitations de la période de référence (1970-1991) apparaissent plus ou moins sous la forme de fonction de distribution logarithmique négative, ce qui implique que les occurrences de précipitations faibles sont plus fréquentes que les occurrences de précipitations moyennes ou élevées avec les fréquences les plus faibles pour les valeurs les plus élevées. Par contre, les précipitations futures ont une forme de fonction parabolique inverse, ce qui suppose que les événements de précipitations faibles sont moins fréquents que celle moyennes, alors les précipitations élevées sont moins fréquentes. Une autre remarque importante est que certaines hauteurs de précipitation n'existent plus dans les valeurs prévues du futur.



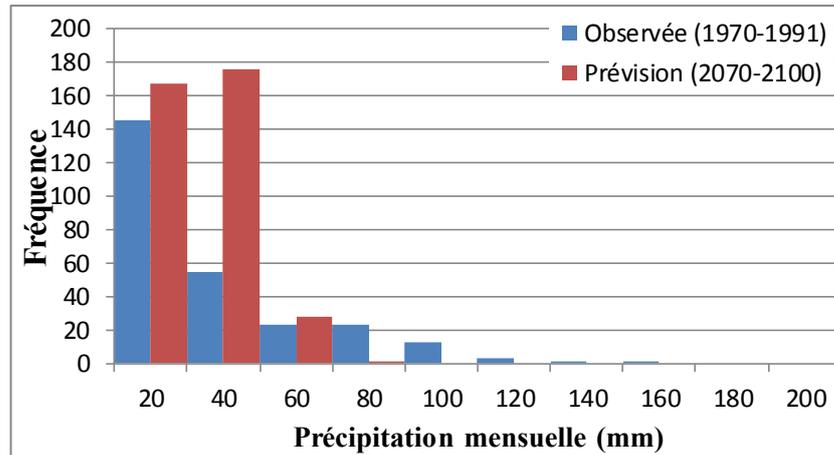
**Figure 6.10:** Fréquences des précipitations mensuelles (période de référence Vs 2010-2040)

La Figure 6.10 compare entre les fréquences de la pluviométrie mensuelle observée et estimée. Elle montre un équilibre entre les tranches de la pluviométrie de 0 à 20mm. Néanmoins, la tranche de 20 à 40 mm, est marquée par une nette augmentation de la fréquence durant la période 2010-2040 pour atteindre environ 190 occurrences. Nous remarquons aussi la disparition des précipitations fortes au cours de la période 2010-2040.



**Figure 6.11:** Fréquences des précipitations mensuelles (période de référence Vs 2040-2070)

Les mêmes constatations faites sur la Figure 6.10 peuvent être faite sur Figure 6.11. Les occurrences des précipitations entre 0 et 20mm sont de l'ordre de 150 pour les deux périodes. Les évènements pluvieux de 20 à 40mm ont une légère diminution pendant la période 2040-2070 avec presque 175 fois.



**Figure 6.12:** Fréquences des précipitations mensuelles (période de référence Vs 2070-2100)

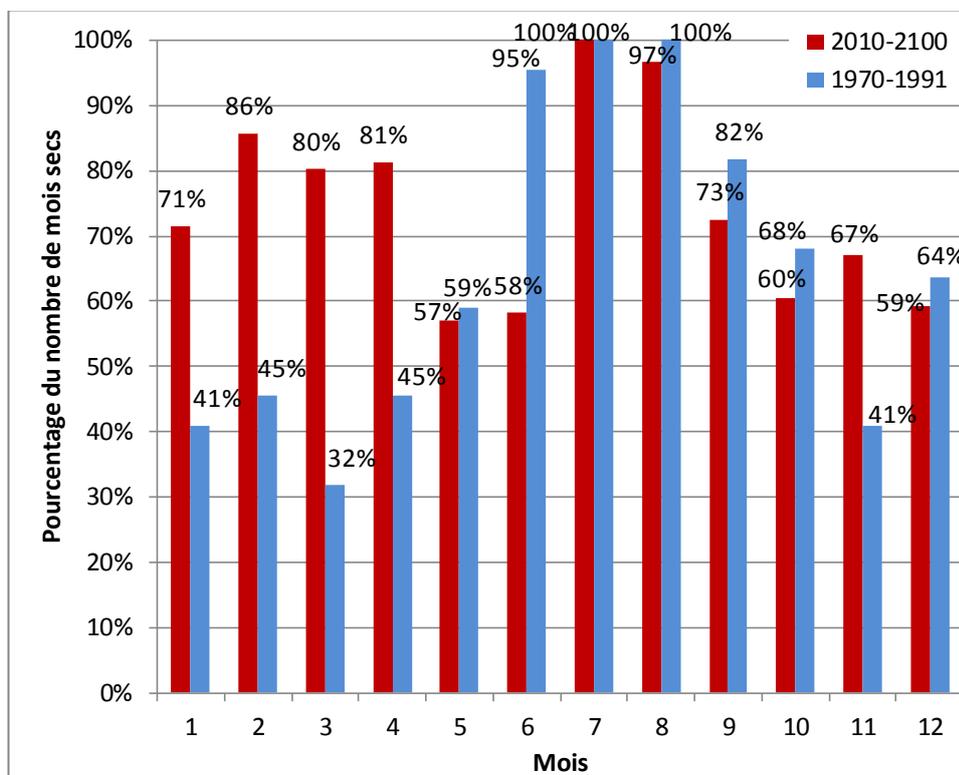
La Figure 6.12 se distingue par l'augmentation des fréquences des précipitations faibles (de 0 à 20mm) pour aboutir à plus de 160 fois au cours de la période 2070-2100.

La comparaison entre la Figure 6.10, Figure 6.11 et Figure 6.12 permet de représenter les événements futurs possibles suivants liés à la station de Matemore :

- Les occurrences de précipitations sèches ou basses sont relativement faibles au cours de la période de 2010 à 2040 que 2040-2100. Il est presque 27% d'augmentation dans les périodes de sécheresse, ce qui implique que le manque d'eau et le stress peuvent jouer un rôle plus important qu'à présent,
- Les événements de précipitations humides ou élevées (>80mm) sont pratiquement inexistantes dans les événements de précipitation futurs. Cela suppose que, dans l'avenir, les occurrences d'inondation ou de crues ne sont pas attendues,
- La gamme de précipitation moyenne diminuera de moins de 10% entre la période 2010 à 2040 et 2040-2100. Par conséquent, il est probable que cette catégorie de précipitation restera inchangée au futur.

Pour diminuer l'impact des changements climatiques, Il est important d'augmenter la capacité de mobilisation des eaux. La gestion des précipitations moyennes devient plus qu'une nécessité pour un développement durable. Il faut donc stocker l'eau supplémentaire, pendant les périodes de précipitations moyennes, en surface ou souterrains pour les utiliser dans les périodes sèches. L'utilisation de système de distribution d'eau efficace est très importante pour minimiser le gaspillage.

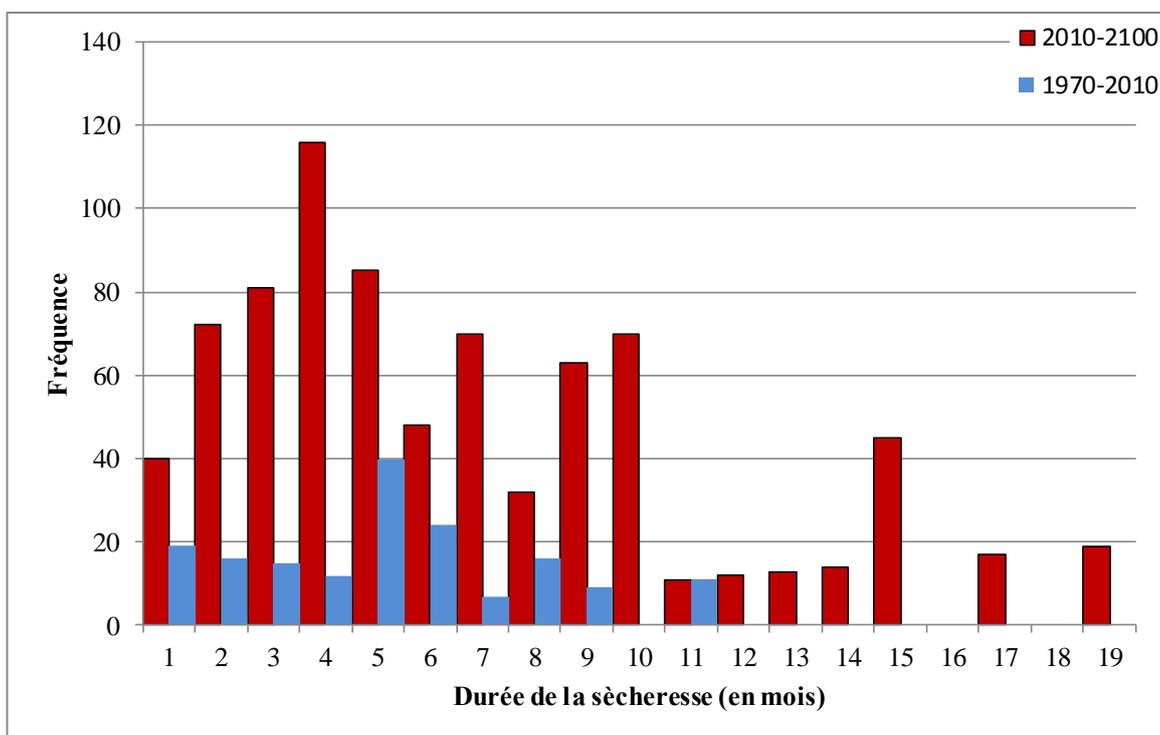
Outre les caractéristiques précitées de la série temporelle des précipitations futures, les fréquences de sécheresse sont présentées dans la Figure 6.13. Nous caractérisons les sécheresses du point de vue météorologique, qui est le nombre maximum de jours secs consécutifs. Un jour est considéré comme sec si les précipitations quotidiennes lui correspondant n'ont pas excédé 1 mm (Guiot, 2014). Pour notre travail, nous avons pris une moyenne de 30 jours pour tous les mois et nous avons donc considéré un mois sec si sa pluviométrie n'excède pas 30mm.



**Figure 6.13:** Pourcentage du nombre de mois secs (<30mm) par mois

La Figure 6.13 montre une augmentation des fréquences de sécheresse durant le 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période de référence (1970-1991) pour les mois de janvier (71% contre 41%), février (86% contre 45%), mars (80% contre 32%), avril (81% contre 45%) et novembre (67% contre 41%). Les mois de juillet et août resteront les mois les plus secs et garderont donc la même place qu'ils ont actuellement. Les mois de septembre, novembre et décembre connaîtrons une diminution de leurs fréquences de sécheresse.

La Figure 6.14 présente les fréquences des sécheresses pour des durées variables de la période observée (1970-2010) et la période future (2010-2100).



**Figure 6.14:** Fréquence de la durée de la sécheresse en mois

Pour la région de Mascara, les changements appréhendés par le modèle CCSM4, de la période 2010-2100, suggèrent une augmentation significative du nombre de mois secs (précipitation journalière  $\leq 1\text{mm}$ , donc précipitation mensuelle  $\leq 30\text{mm}$ ), par rapport à la période de référence, ainsi que du nombre de mois secs consécutifs. Des durées de sécheresses plus longues et plus fréquentes sont prévues dans la région de Mascara. Les sécheresses de quatre mois sont les plus probables. La région étudiée aura des sécheresses d'une durée de presque deux années (19 mois). Ceci est la durée de la sécheresse météorologique, alors que la sécheresse hydrologique peut être plus. La gestion des ressources en eau peut soit diminuer l'ampleur de la sécheresse soit l'aggraver.

#### 6.4. Conclusion

Les conséquences des changements climatiques sur la fréquence ainsi que sur l'intensité des précipitations auront un impact direct sur les périodes de sécheresse et par conséquent sur différents secteurs économiques tels que le secteur de l'agriculture (Bouagila, 2013).

Les impacts des changements climatiques devraient affecter différentes valeurs socio-économiques d'une société en particulier et l'humanité en général dans les prochaines décennies. Il est donc une nécessité de faire de la planification future des ressources en eau en fonction de la modélisation fiable des situations générales.

Plusieurs paramètres météorologiques, notamment les précipitations, sont obtenues par différents centres de recherches dans le monde à des petites échelles (généralement 300x300km).

Avec une telle échelle il n'est pas possible de faire des évaluations régionales ou locales. Le travail de ce chapitre propose de faire une réduction d'échelle statistique en se basant sur la fonction de dépendance spatiale qui permet d'avoir les données du GCM au niveau de la station de Matemore (Mascara) (ou à n'importe quel point). L'étude est basée sur les données des précipitations mensuelles du modèle CCSM4 du centre de recherche NCAR (USA). La période simulée concerne les événements de 2010 à 2100. Ce travail montre que la pluviométrie annuelle de la station de Matemore aura deux périodes à tendances décroissantes (avec des coefficients de corrélation significatif pour  $\alpha=0.10$ ) respectivement 2010-2035 et 2045-2100. Une période avec une hausse relative s'insère entre les deux suscitées. Les moyennes des trois périodes sont respectivement 288.1mm, 297.2mm et 271.5mm.

L'étude des fréquences des précipitations mensuelles montre les occurrences de précipitations sèches ou basses sont relativement faibles au cours de la période de 2010 à 2040 que 2040-2100. Il est presque 27% d'augmentation dans les périodes de sécheresse. Certaines valeurs de précipitations élevées ( $>80\text{mm}$ ) n'existent plus dans les estimations futures. La gamme de précipitation moyenne diminuera de moins de 10% entre la période 2010 à 2040 et 2040-2100. Par conséquent, il est probable que cette catégorie de précipitation reste inchangée au futur.

Le modèle CCSM4 et sa réduction d'échelle projettent des mois secs de plus en plus nombreux. Les mois de janvier, février, mars, avril et novembre seront les plus touchés. Cependant, les mois de septembre, novembre et décembre seront moins touchés par la sécheresse et auront moins d'épisodes secs.

L'évolution de la pluviométrie mensuelle pour le 21<sup>ème</sup> siècle prévoit une augmentation du nombre de mois secs consécutifs. Des sécheresses d'une durée de quatre mois sera très fréquentes, avec des extrêmes allant jusqu'à 19 mois secs successifs.

## 7. Conclusion et perspectives

### 7.1. Conclusion générale

Ce travail de thèse avait été abordé avec l'idée d'étudier l'évolution des précipitations et de comprendre, à l'aide d'arguments simples, les tendances, actuelles et futures, au niveau du bassin versant de la Macta (Nord-Ouest Algérien).

Dans un premier chapitre nous avons résumé les théories expliquant le phénomène de changement climatique en déterminant la terminologie associée, et nous avons montré l'impact de l'activité humaine sur les changements actuels. Le deuxième chapitre était consacré aux modèles de circulation générale (MCG ou en anglais GCM). Nous avons surtout expliqué brièvement le concept de fonctionnement, les différents modèles existants, leurs applications, leurs limites et enfin les incertitudes actuelles.

Les données de la pluviométrie mensuelle de 42 stations ont été retenues. Les stations sont distribuées d'une manière plus ou moins uniforme dans le bassin versant de la Macta. La période de l'étude s'étale entre 1970 à et 2011. Nous avons déterminé que les données suivent la loi racine-normale. L'étape de vérification des données nous a permis d'éliminer les valeurs très probablement erronées. Les données manquantes ont été reconstituées à l'aide des macros Hydrolab.

Par l'estimation de la pluviométrie mensuelle pour les périodes de retour 10, 100 et 1000 ans pour deux périodes 1970-1991 et 1992-2011, nous avons démontré que les valeurs attendus diminuent dans la deuxième période pendant les mois de mars, février et juin. Alors que les valeurs estimées de la deuxième période, pour le mois d'aout, sont supérieur à celle de la première période.

Plusieurs auteurs ont démontré que l'Algérie enregistre une diminution de la pluviométrie (Meddi et al., 2002 ; Assaba et al., 2013). Dans ce contexte, nous avons étudié les tendances des séries mensuelles, saisonnières et annuelles. Trois méthodes ont été utilisées. Le  $r$  de Bravais Pearson, le  $\tau$  de Kendall et le  $\rho$  de Spearman.

L'étude de la pluviométrie mensuelle montre un accord sur la tendance décroissante de la majorité des stations durant le mois de mars et la croissance de celles-ci pendant le mois de juin. L'analyse des tendances des précipitations saisonnières a prouvé que la saison de l'hiver et le printemps sont les plus touché par la sécheresse. Meddi (2002) confirme que 40% de la diminution de la pluviométrie se situe au niveau de l'hiver et du printemps. Medjerab (2005) affirme que le printemps enregistre une diminution des précipitations. Nous avons aussi décelé une croissance pendant la saison de l'été.

D'un point de vue annuel, toutes les trois méthodes s'harmonisent sur la tendance à la baisse des stations situées au Centre-Nord du bassin de la Macta et la tendance à la hausse des stations

situées au Sud de la Macta. Meddi (2003) constate qu'à partir de 1980, l'ensemble du pays, et surtout sa partie ouest, est touché par une réduction de la pluviométrie qui dépasse 60%.

L'utilisation de la méthode innovante de l'analyse des tendances de Şen (2012), a permis de déterminer les tendances de nos stations. Chaque série est divisée en deux parties. Les deux moitiés ordonnées sont ensuite comparées. D'une manière générale, les stations situées au Centre Nord de la Macta ont une pluviométrie plus faible par rapport à la première moitié. Par contre les stations du Sud ont des pluviométries à la hausse.

En fin, le dernier chapitre a été consacré pour estimer les précipitations futures. Ces dernières sont produites par les modèles de circulation générale (MCG ou GCM). Ces derniers sont le principal outil pour comprendre comment le climat mondial pourrait changer à l'avenir. Cependant, ceux-ci ne fournissent actuellement pas d'informations fiables sur les échelles au-dessous de 200 km (Meehl et al., 2007). Les sorties des GCMs sont disponibles seulement au niveau de nœuds distant de quelque centaines de kilomètre. C'est pourquoi une réduction d'échelle (downscaling) pour les précipitations est nécessaire, indépendamment de la région et la saison. Pour répondre à ces besoins spécifiques, il y a eu des efforts considérables pour développer davantage de méthodes de réduction d'échelle dynamique et statistique.

Nous avons utilisé la méthode de réduction d'échelle statistique en se basant sur la fonction de dépendance spatiale. Les données estimées du modèles CCSM4 du centre de recherche NCAR pour la période 2010-2100 ont été utilisées. Nous avons pu descendre à l'échelle de nos stations et donc avoir pour chacune d'elles les prévisions souhaitées. La station de Matemore (111405) a été prise comme exemple.

Les résultats de la réduction d'échelle statistique ont abouti à construire trois périodes à tendances alternées. La première (2010-2035) et la troisième (2045-2100) ayant des tendances décroissantes ( $r$  significatif pour  $\alpha=0.10$ ) alors que la troisième affiche une tendance croissante (non significative). Les moyennes obtenues des trois périodes sont respectivement 288.1mm, 297.2mm et 271.5mm.

L'étude montre une augmentation des évènements pluviométriques faibles ( $<40\text{mm}$ ) surtout au cours de la période de 2040-2100. Cette augmentation est de l'ordre de 27%. D'un autre côté, les précipitations élevées ( $\geq 80\text{mm}$ ) sont totalement absentes dans les prévisions futures. La gamme de précipitation moyenne n'a pas de modification significative entre la période de référence et la période de prévision ce qui laisse à penser que cette catégorie de précipitation restera inchangée au futur.

Le phénomène de La sècheresse a été aussi étudiée. Nous prévoyons des mois secs de plus en plus nombreux. Les mois de janvier, février, mars, avril et novembre seront les plus touchés.

Cependant, les mois de juin, septembre, octobre et décembre seront moins touchés par la sécheresse et auront mois d'épisodes secs. Nous envisageons une augmentation du nombre de mois secs consécutifs au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Notre étude a montré que la région de Mascara aura très fréquemment des sécheresses d'une durée de quatre mois. L'allongement des périodes de sécheresse pourrait s'accroître en atteignant 19 mois secs consécutifs.

## 7.2. Perspectives

Toutes les approches de réduction d'échelle contiennent des erreurs. Ces lacunes sont causées par la disponibilité et la qualité des données, la qualité des GCMs et aussi des limites des méthodes de réduction d'échelle. Dans les régions où les réseaux de mesure de la pluviométrie sont clairsemés, l'installation de nouvelles jauges va améliorer la situation à long terme. Cependant, dans de nombreuses régions, notamment notre pays, des réseaux existent, mais les données ne sont pas mises à disposition. Ici, des efforts devraient être entrepris pour rendre ces données facilement disponibles (Haylock et al., 2008). La qualité des projections climatiques des GCM est en constante amélioration, et la dernière génération de modèles montrent une meilleure représentation de la variabilité du climat (Shaffrey et al., 2009).

Les résultats obtenus sont prometteurs et nous espérons que d'autres études plus approfondies suivront. L'utilisation de plusieurs GCMs pourra diminuer les erreurs. La comparaison des résultats de plusieurs méthodes de réduction d'échelle donnera la possibilité de mieux corriger les biais entre les valeurs estimées et observées.

La généralisation de l'utilisation de ces techniques devrait inclure l'étude des extrêmes. Cependant, ces méthodes impliquent la plupart du temps une connaissance statistique et informatique considérable.

## Références bibliographiques

- Adam D. (2008).** La concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère s'accélère et atteint 387 ppm. The Guardian, 12 mai 2008.
- Adam C. M., Chau T. A. Pham, Francois W. Primeau, Jasper A. Vrugt, J. Keith Moore, Simon A. Levin et Michael W. Lomas (2013).** Strong latitudinal patterns in the elemental ratios of marine plankton and organic matter. Nature Geoscience, 17 mars 2013 (DOI 10.1038/ngeo1757).
- Agence européenne pour l'environnement (AEE) (2012).** Rapport «Climate change, impacts and vulnerability in Europe». Changement climatique, impacts et vulnérabilité en Europe.
- Ahmad et al., (2001).** Troisième Rapport (TAR) du Groupe de travail II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (Genève, Suisse, 13-16 février 2001), 101p
- Agoumi A. (2003).** Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques. Winnipeg : International Institute for Sustainable Development (IISD), 11 p.
- Alley R. et al. (2007).** Résumé à l'intention des décideurs. Rapport du Groupe de travail I du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
- Anteur D., Labani A., Mederbal K. et Gliz M. (2014).** Contribution à l'évaluation et à la cartographie de la sensibilité à l'érosion hydrique des sols du sous bassin versant de l'oued de saïda (ouest de l'Algérie). European Scientific Journal September 2014 edition vol.10, No.27 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431
- A.N.R.H. (Février 1997).** Evaluation de la sensibilité des sols à l'érosion par télédétection et SIG (application aux bassins versants de khalouia et Ghriss).
- Assaba M., Laborde J.P. et 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.
- Aulay, M. et al. (2000).** L'essentiel en écologie. Département des sciences biologiques de l'université de Essex. Pp : 328, 332, 335, 336
- Azzaz H. (2001).** Impact des changements climatiques sur les ressources en eau. Mémoire de magister, centre universitaire de Mascara.
- Badeau v., Dupouey j.l., Cluzeau c. et Drapier J. (2007).** Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100, Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 3, «Forêts et milieux naturels face aux changements climatique », pp. 62-66.
- Badin É., Delbecq D. Et Demarthonb F. (2013).** Les experts du climat. CNRS Journal. n° 274 septembre-octobre 2013.
- Banque mondiale (2016).** Émissions de CO<sub>2</sub> (tonnes métriques par habitant). Centre d'analyse des informations relatives au dioxyde de carbone, division des sciences de l'environnement, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, États-Unis.  
<http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EN.ATM.CO2E.PC?locations=DZ>
- Bao Z et al. (2012).** Sensitivity of hydrological variables to climate change in the Haihe River basin, China. Hydrol. Processes, Vol. 26(15): 2294–2306.
- Barber V. A., Juday G. P. & Finney B. P. (2000).** Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. Nature405, p. 668–673.
- Barnes S. L. (1964).** A technique for maximizing details in numerical 276 weather map analysis. J. Appl. Meteorol., 3, 396–409.

- Baruch J.O. (2007).** 10 Idées reçues sur le climat. La recherche, l'actualité des sciences. Mensuel n°142 daté octobre 2007 à la page 80.
- Benzater B. (1996).** Etude hydrologique du bassin versant de l'oued El Hammam. Mémoire magister, centre universitaire de Mascara.
- Berolo (2010).** Estimation des précipitations mensuelles décennales et centennales. Travaux de Recherche par W. Berolo. Géoazur, UNS, Nice, France.
- Boé J. (2007).** Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France. Thèse de doctorat, Physique du climat, Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- Bokoye A. I. (2007).** DESCRIPTION SOMMAIRE DES MÉTHODES DE MISE A ECHELLE STATISTIQUE (MAS). Environnement Canada (Montréal, Québec).
- Bordoy R. and Burlando P. (2013).** Bias correction of regional climate model simulations in a region of complex orography. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 82–101, 2013.
- Bosquet et Sylvain (2014).** Le verdissement des toitures pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur conforte une biodiversité à Londres.
- Bouagila B. (2013).** Caractérisation des périodes de sécheresse sur le domaine de l'Afrique simulée par le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC5) » Mémoire. Montréal (Québec, Canada), Université du Québec à Montréal, Maîtrise en sciences de l'atmosphère. 69p
- Boulghobra N. (2003).** Protection de la ville de Skikda contre l'inondation essai de «P.P.R.I.», thèse de magister, université de Batna.
- Bouyssel F. (2015).** Aperçu de la prévision numérique du temps à travers les outils mis en œuvre à Météo-France. CNRM-GAME/GMAP Météo-France. Météorologie : de l'atmosphère à l'espace. 18-19 juin 2015, Meudon
- Braconnot P., Dufresne J.-L., Salas y Méliá D., et L. Terray (2007).** Analyse et modélisation du changement climatique. 2ème édition du Livre blanc Escrime.
- Brazel A., Gober P., Seung-Jae L., Grossman-Clarke S., Zehnder J., Hedquist B. and Comparri E. (2007).** Determinants of changes in the regional urban heat island in metropolitan Phoenix (Arizona, USA) between 1990 and 2004. *Climate Research*, 22, 171-182.
- Briand F. (1993).** Pollution of the Mediterranean Sea. Pollution Research and Environmental Monitoring. Analysis, recommendations and assessment of the scientific and technological options. STOA Report. European Parliament. 225p.
- Briatte F. (1982).** Traitement et analyse des relevés météorologiques utilisés par la dendroclimatologie en région méditerranéenne Française. Univ. De Droit, d'Econ et sci. Aix-Marseille, France.
- Bryssea K., Oreskesb N., O'Reillyc J., Oppenheimerd M. (2013).** Climate change prediction: Erring on the side of least drama? *Global Environmental Change (ELSEVIER)*. Science Direct. Volume 23, Issue 1, February 2013, Pages 327–337
- Cantat O. (2004).** L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191, 75- 102.
- Caillat A., Dutang C., Larrieu M. V. et NGuyen T. (2008).** COPULE DE GUMBEL. Groupe de travail ISFA 3 sous la direction de Stéphane Loisel. Pp6.
- Carter T.R. (2007).** Finnish Environment Institute, Box 140, FIN-00251 Helsinki, Finland. GENERAL GUIDELINES ON THE USE OF SCENARIO DATA FOR CLIMATE

- IMPACT AND ADAPTATION ASSESSMENT. Version 2. June 2007. Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment (TGICA) (IPCC).
- Cazenave A. et Berthier E. (2010).** La montée des océans: jusqu'où ?. Pour la Science, n° 388, février 2010, p. 20-27.
- Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (2006).** La montée du niveau des mers. Extrait de la Lettre du Changement global n°19 - Programme International Géosphère Biosphère (IGBP) - Programme Mondial de Recherches sur le Climat (WCRP) - Programme International «Dimensions Humaines» (IHDP) - Diversitas - Earth System Science Partnership (ESSP).
- Charles, S. P., Bates, B. C. Whetton, P. H. and Hughes, J. P. (1999).** Validation of downscaling models for changed climate conditions: case study of southwestern Australia. *Climate Research*, 12, 1-14.
- Charveriat C. (2000).** Natural Disasters in Latin America and the Caribbean: An Overview of Risk. Inter-American Development Bank (IADB). Working Paper #434. Washington, DC.
- Charron I. (2014).** Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation. Ouranos, 86 p.
- Cholette Méliissa (2013).** Méthode de télécopage appliquée au modèle régional canadien du climat (mrcc5) pour une étude de faisabilité de ce modèle à très haute résolution. Mémoire de la maîtrise en sciences de l'atmosphère. Université du Québec à Montréal. 110p.
- CITEPA. (2015).** Centre International Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique. Format SECTEN - avril 2015.
- 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*. vol. 51 / 3-4 | 2011.
- Cohen, S. J. (1990).** Bringing the global warming issue closer to home: the challenge of regional impact studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71, 520-526.
- Collins W, R. Colman, J. Haywood, M. Manning et Ph. Mote. (2007).** Réchauffement climatique, le temps des certitudes. *Science*, no 360, octobre 2007, p. 68-75.
- Commission Européenne de l'Environnement (2010).** Notre Avenir, Notre Choix. 6<sup>ème</sup> programme communautaire d'action pour l'Environnement 2001-2010. Office des publications officielles des Communautés européennes, 2001 ISBN 92-894-0262-8.
- Connor Steve (2010).** Fabricated quote used to discredit climate scientist. *The independent journal*.
- Corte-Real, J., Qian, B. and Xu, H. (1996).** Circulation patterns, daily precipitation in Portugal and implications for climate change simulated by the second Hadley Centre GCM. *Climate Dynamics*, 15, 9021-935.
- Coulibaly P., Anctil F. et Bobée. B. (2001).** Multivariate reservoir inflow forecasting using temporal neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 6(5), 367-376.
- CSIRO. (2015).** Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), [https://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl\\_hist\\_last\\_decades.html](https://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_hist_last_decades.html)
- Dacher P. (2012).** CHANGEMENT CLIMATIQUE : LES NOUVELLES SIMULATIONS FRANÇAISES POUR LE PROCHAIN RAPPORT DU GIEC. Conférence de presse Jeudi 9 février 2012, à Paris. Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).
- Dakiche A. Avril (1996).** Bassin versant de la Macta, synthèse bibliographique, inventaire des données. Institut National des ressources Hydrauliques (A.N.R.H.).

- Dagnélie (1973).** Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. VOL. 1 P., Les Presses Agronomiques de Gembloux, 1973.
- D'Aleo J., Madhav K., Kininmonth W., Essex C., Wibjörn K., Olavi K., Ian Clark, Murty T. et J. J. O'Brien (2007).** Independent Summary for Policymakers, IPCC Fourth Assessment Report. There is no globally-consistent pattern in long-term precipitation trends, snow-covered area, or snow depth. Many places have observed a slight increase in rain and/or snow cover. There is insufficient data to draw conclusions about increases in extreme temperature and precipitation. Fraser Institut. 64p.
- Debaeke P, S. Pellerin, J. Le Gouis, A. Bispo, T. Eglin, A. Trévisol (2014).** Les défis de l'agriculture, Pour la Science, no 437, mars 2014, p. 70-73.
- Denhez Frédéric et Michel Petit. (2005).** Atlas de la menace climatique : le réchauffement de l'atmosphère : enjeu numéro un de notre siècle, *Les éditions Autrement*, 80 p..
- Delecolle R., Soussana J.F., Legros J.P. (1999).** Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. C.R. Acad. Agric. Fr., vol. 85,1999, pp. 45-51.
- Delmas-Marty M., d'Ambrosio L., Devaux C. et Martin-Chenut K. (2015).** LE DÉRÈGLEMENT CLIMATIQUE : UN DÉFI POUR L'HUMANITÉ 12 propositions juridiques pour la Conférence de Paris sur le climat. Creative Commons. Octobre 2015. 25p.
- Djediai H., décembre (1997).** Etat de la qualité des eaux superficielles du bassin versant de la Macta. Projet de coopération Algéro-Français.
- Dodge Y et Rousson V. (2004).** Analyse de régression appliquée. Dunod, 2004. Pp 107.
- Douglas EM and Fairbank CA (2011).** Is precipitation in Northern New England becoming more extreme? Statistical analysis of extreme rainfall in Massachusetts, New Hampshire, and Maine and updated estimates of the 100-year storm. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 16(3): 203–217.
- Droesbeke J J. (1988).** Eléments de statistique. Ed. Univ. de Bruxelles, Belgique.
- Dufresne J.L. et C. Youinou (2007).** 100 réponses sur le réchauffement de la planète, Tournon.
- Dufresne J.L. (2010).** L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit! CNRS-Université Paris 6
- Ehsanzadeh E., Ouarda TB., and Saley HM (2011).** A simultaneous analysis of gradual and abrupt changes in Canadian low streamflows. *Hydrol. Processes*, Vol. 25(5): 727–739.
- Elouissi A. (2004).** Impact des changements climatiques sur la régionalisation pluviométrique pour le bassin de la Macta. Mémoire de magister, centre universitaire de Mascara.
- Elouissi A., Şen Z. & M. Habi (2016).** Algerian rainfall innovative trend analysis and its implications to Macta watershed. *Arabian Journal of Geosciences*. ISSN 1866-7511. Volume 9, Number 4. *Arab J Geosci* (2016) 9:1-12. DOI 10.1007/s12517-016-2325-x
- Environnement Canada (2014).** <http://www.ec.gc.ca/climate/>
- Estienne P. et Godrd A. (1982).** Climatologie. Ed. Armand Colin. Paris.
- FAO (Food and Agriculture Organisation) Rome (2010).** Site Internet d'Aquastat (Aquastat est le système mondial d'information sur l'eau et l'agriculture de la FAO): <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexfra.stm>.
- Ferey M.P. (2001).** CHANGEMENTS CLIMATIQUES: Les pays du Sud plus vulnérables. Agence France-Press. 12 novembre 2001. Marrakech
- Fieux M. (2010).** L'océan planétaire, ENSTA, 2010 (ISBN 978-2-7225-0915-3).
- Fatichi S, Ivanov VY, Caporali E (2013).** Assessment of a stochastic downscaling methodology in generating an ensemble of hourly future climate time series. *Clim Dyn* 40:1841–1861

- François P. (2001). Changements Climatiques.** <http://www.planetecologie.org/>
- Gates W. L. (1985).** The use of general circulation models in the analysis of ecosystem impacts of climate change. *Climate Change*, 7, 267-284.
- Garbrecht J Van Liew M and Brown GO (2004).** Trends in precipitation, streamflow, and evapotranspiration in the Great Plains of the United States. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 9(5): 360–367.
- Gibbs W.J. (1987).** Defining climate. *WMO bulletin*, 36, 316-322.
- Gilbert R.O. (1987).** *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, Wiley, NY.
- Giorgi F., Jones C et Asrar G. (2009).** L'expérience CORDEX: répondre aux besoins d'information climatologique à l'échelle régionale. *ONM. Bulletin Eau – Climat – Eau*. Volume 58 (3). Juillet 2009.
- Glossaire Du GIEC Sur Le Changement Climatique (2006).**  
[http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/)
- Gonzalez-Rouco, J. F., Heyen, H., Zorita, E. and Valero, F. (2000).** Agreement between observed rainfall trends and climate change simulations in southwest of Europe. *Journal of Climate*, 13, 3057-3065.
- Graham L. P., Andréasson J. and Carlsson B. (2007).** Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods—a case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, 81, 293–307, 2007.
- Guiot Joel (2014).** Rapport : climat du sud de la France au 21e siècle. Direction Générale de l'Energie et du Climat. Sous la direction de Jean Jouzel.
- Guivarch Céline (2015).** Les scénarios du changement climatique pour le prochain siècle Scénarii économiques. Ecole de printemps mednet 9 juin 2015.
- Guppy V. (2006).** Environnement. <http://www.econologie.com/>
- Gupta A (2007).** *Large Rivers: Geomorphology and Management*, Wiley, Chichester, U.K.
- Haan J Huang G Zhang H Li Z and Li Y (2014).** Heterogeneous Precipitation and Streamflow Trends in the Xiangxi River Watershed, 1961–2010. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 19(6): 1247–1258.
- Haktanir T and Citakoglu H (2014).** Trend, Independence, Stationarity, and Homogeneity Tests on Maximum Rainfall Series of Standard Durations Recorded in Turkey. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 19(9), 05014009.
- Halimi A. (1980).** L'atlas Blidéen. Climat et Etages Végétaux. Office de pub. Univ. Alger.
- Hallouche B., M. Benyahia, K. Moueddene et A. Marok (2010).** Apport de l'hydrogéomorphologie dans la cartographie des zones inondables Exemple de la plaine de Sidi Bel Abbès (Algérie Nord occidentale). *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Volume 21, numéro 3, juillet-août-septembre 2010. DOI: 10.1684/sec.2010.0253.
- Haus C. (2005).** Programme des Nations Unies pour l'environnement. [secretariat@unfccc.int](mailto:secretariat@unfccc.int), [www.unfccc.int](http://www.unfccc.int)
- Hay L. E., Wilby R. L. and Leavesley G. H (2000).** A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United states. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 36(2): 387-397.
- Haylock, M., N. Hofstra, A. Tank, E. Klok, P. D. Jones, and M. New (2008).** A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006, *J. Geophys. Res.*, 113, D20,119, 2008.

- Helsel D.R. and R.M. Hirsch (2002).** Statistical Methods in Water Resources. U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR GALE A. NORTON, Secretary. P524.
- Hervé Zeller (2000).** Synthèse des interventions. Changement climatique : fantasme ou réalité. Centre national de référence / Centre collaborateur OMS des arbovirus et virus des fièvres hémorragiques Institut Pasteur, Paris. <http://www.eid.med.org/fr/>
- Hirsch R.M., J.R. Slack, and R.A. Smith (1982).** Techniques of trend analysis for monthly water quality data , Water Resources Research 18(1):107-121.
- Horton R. E. (1933).** The role of infiltration in the hydrological cycle, Trans. American Geophysical Union, 14, pp 446-460 1.1.1
- Huet Sylvestre (2014).** Comment cette structure a imposé son autorité scientifique. Journal Libération 2 Novembre 2014.
- Hughes, J. P. Guttorp, P. and Charles, S. P. (1999).** A non-homogeneous hidden Markov model for precipitation occurrences. Applied Statistics, 48, 15-30.
- Hurkmans R., Terink W., Uijlenhoet R., Torfs P., Jacob D. and Troch P. A. (2010).** Changes in streamflow dynamics in the Rhine basin under three high-resolution regional climate scenarios. Journal of Climate, 23, 679–699, 2010.
- Hydrolab (2010).** Ensemble de macro-commandes Excel développées par J. P. LABORDE aidé de N. MOUHOUS. Université de Nice-Sophia Antipolis et C.N.R.S.
- Imbrie J, K. Palmer Imbrie. (1979).** Ice Ages, Solving the Mystery, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1979, 224 p.
- Bard Edouard (2007).** Les géosciences au service de l'Homme : 100 ans de géologie à Nancy, 2007, 177-195.
- INRA, Institut National de Recherches Agronomiques (2013).** La Forêt face au réchauffement climatique. PUBLIÉ LE 16/01/2013
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001).** Edited by J.T. Houghton. Y. Ding. D.J. Griggs. M. Noguer. P.J. van der Linden. X. Dai. K. Maskell. C.A. Johnson.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007).** 4th Assessment Report. A picture of climate change the current state of understanding.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013).** Edited by Thomas F. Stocker Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner Melinda M.B. Tignor Simon K. Allen Judith Boschung, Alexander Nauels Yu Xia Vincent Bex Pauline M. Midgley and Working Group I Technical Support Unit, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Summary for Policymakers. Kendall MG (1975) Rank Correlation Methods, Oxford Univ. Press, New York.
- Jean M. J. (2002).** Réchauffement climatique. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Réchauffement\\_climatique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Réchauffement_climatique)
- John R. (2001).** Les forêts tropicales et le changement climatique. Consultant en foresterie. <http://www.rcfa-cfan.org/denegations>.
- Jones, P. D., Hulme, M. and Briffa, K. R. (1993).** A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. International Journal of Climatology, 13, 655-663.
- Joussaume S., D. Armand, P. Delecluse, B. Seguin, Venance J., R. Delmas, M. Gillet (2007).** Les recherches françaises sur le changement climatique. 19p.
- Jouzel (2011).** Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM.

- Jugie Gérard (2007).** Le Passage du Nord-Ouest devient navigable. Publié le 15/09/2007. Directeur de l'Institut Polaire de Brest.
- Juvanon du Vachat Regis (2005).** Impacts du changement climatique futur - Vulnérabilités clés et seuils critiques. Extrait de la Lettre du Changement global n°19 . Centre National de la Recherche Scientifique
- Karl E., Taylor, V. Balaji, Steve Hankin, Martin Juckes, Bryan Lawrence, and Stephen Pascoe (2012).** CMIP5 Data Reference Syntax (DRS) and Controlled Vocabularies.
- Katz, R. W., Parlange, M. B. And Naveau, P. (2002).** Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25, 1287-1304.
- Ken O. (2004).** Changements climatiques et de la santé humaine.  
<http://www.pollutionprobe.org>
- Kendall, M.G. (1938).** A new measure of rank correlation. *Biometrika* 30, 81-93.
- Kendall, M.G. (1975).** Rank Correlation Methods, 4th edition: Charles Griffin, London. 202 p.
- Khaldi A. (2005).** Impacte de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaire de l'Ouest algérien "Monts de Tlemcen-Saïda". Thèse de doctorat d'état. Faculté des Sciences de la terre, de Géographie et l'Aménagement du Territoire. Université d'Oran.
- Kiehl J. T.; Kevin E. Trenberth (1997).** Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (2): 197–208. February 1997. Bibcode: 1997BAMS. 78. 197K. doi:10.1175/1520-
- Kim J. W., Chang J. T., Baker N. L., Wilks D. S. and Gates W. L. (1984).** The statistical problem of climate inversion: Determination of relationship between local and large-scale climate. *Monthly Weather Review*, 112, 2069-2077.
- Kleinen, T. and G. Petschel-Held. (2007).** Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change, *Climatic Change*, 81, 283–312.
- Kreft S and David A (2014).** Global Climate Risk Index 2014. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? <http://germanwatch.org/en/download/8551.pdf> [28 July 2014].
- Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) (2003).** [www-igge.obs.ujf-grenoble.fr/~christo/gcm/MCG.htm](http://www-igge.obs.ujf-grenoble.fr/~christo/gcm/MCG.htm)
- Laborde JP (2013).** Eléments d'hydrologie de surface. Support de cours. Professeur émérite à l'Université de Nice - Sophia Antipolis, France.
- Ladurie Emmanuel Le Roy (2004).** Les dates de vendanges : un indicateur du climat du passé. Communiqué de presse, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France.
- Lafon T., Dadson S., Buys G. and Prudhomme C. (2013).** Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. *International Journal of Climatology*, 33, 1367–1381, 2013.
- Larsen J Ussing L and Brunø T (2013).** Trend-Analysis and Research Direction in Construction Management Literature. *ICCREM 2013*:73-82.
- Latif, M. et al. (2004).** Reconstructing, monitoring, and predicting multidecadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature. *J. Clim.* 17, 1605-1614 .
- Leander R. and Buishand T. A. (2007).** Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332, 487–496, 2007.

- Lehman Ann (2005).** *Jmp For Basic Univariate And Multivariate Statistics: A Step-by-step Guide.* Cary, NC: SAS Press. p. 123. ISBN 1-59047-576-3.
- Lorenzo-Lacruz J Vicente-Serrano SM Lopez-Moreno JI Moran-Tejeda E and Zabalza J (2012).** "Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005)." *J. Hydrol.*, Vol. 30(7): 463–475.
- Lott F. et L. Guez (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.*
- Lamb P. (1987).** On the development of regional climatic scenarios for policy oriented climatic impact assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 68, 1116-1123.
- Le Garff (1975).** *Dictionnaire de l'informatique.* Presses universitaires de France. 570 p. ISBN : 160 FRF.
- Le Queré C. et al. (2013).** The global carbon budget 1959–2011. *Earth Syst. Sci. Data*, 5, 165–185, 2013.
- Lebon E. (2002).** Changements climatiques: quelles conséquences pour la viticulture? Evolution des techniques et production d'AOC en Vallée du Rhône. Presented at the 6èmes rencontres rhodaniennes, Institut Rhodanien, Orange, 31–36.
- Lohmann U. (2006).** Aerosol Effects on Clouds and Climate. *Space Sci Rev* 125 (1-4): 129–137. Bibcode: 2006SSRv..125..129L. doi:10.1007/s11214-006-9051-8.
- Lubès H., Masson J.M., Raous P., Tapiou M. (1994).** Logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie, Notice Safarhy.
- Mann H.B. (1945).** Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13:163-171.
- Maplecroft (2014).** Climate Change Vulnerability Index 2014. <http://bit.ly/1km88bB> [28 July 2014].
- Marakchi F. (2000).** Intégration des données hydrologiques dans un système d'information géographique pour la gestion du bassin versant de la Macta, mémoire d'ingénieur, centre universitaire de Mascara.
- Martine T. (2000).** La climatologie générale. Université de paris panthéon-sorbonne. p 88
- Matari A. (2000).** La sécheresse dans l'Ouest algérien et ses impacts sur la ressource en eau. Séminaire International sur l'eau, l'environnement et la ville, Université d'Oran, 23 et 24 mai 2000.
- Mearns L.O., Rosenzweig, C. and Goldberg, R. (1997).** Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. *Climatic Change* 35: 367-396.
- Meddi M. (1992 ).** Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie). Doct. Thèse . Univ., Université Louis Pasteur, Strasbourg, Austria.
- Meddi M., Hubert, P. & Bendjoudi I. (2002).** Evolution du régime pluviométrique du nord-ouest de l'Algérie. (L'eau dans le bassin méditerranéen: Ressources et développement durable Monastir, Tunisie, Octobre 2002).
- Meddi M. et P. Hubert (2003).** Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du nord-ouest de l'Algérie. *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003).* IAHS Publ. no. 278, 2003.

- Meddi M., A. Talia et C. Martin (2009).** Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo*. Volume 3|2009. Varia 2009.
- Meddi H., Assani A (2014).** Study of Drought in Seven Algerian Plains. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 39(1):339–359
- MEDDTL (Ministère l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement) (2007).** Changement climatique et prévention du risque sur le littoral-Les Actes. Séminaire sur la prévention des risques naturels majeurs.
- Medjerab A. et L. Henia (2005).** Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord occidentale. *Revue Géographique de l'Est* [En ligne], vol. 45 / 2 | 2005, mis en ligne le 10 juin 2009, consulté le 21 juillet 2016. URL : <http://rge.revues.org/501>
- Meehl G.A. et al. (2007).** The WCRP CMIP3 multimodel ensemble -a new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383-1394. generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, Vol 463, p. 747-755, 2010.
- MeteoOffice. (2014).** Office de meteorology du Royaume Unis (UK). <http://www.metoffice.gov.uk/research/monitoring/climate/surface-temperature#how>
- Mondon S. et Imbard M. (2013).** Découvrir les nouveaux scénarios RC<sup>P</sup> et SSP utilisé par le GIEC. Observation national sur les effets du réchauffement climatique "ONERC".
- Monet M. V., M. Dkuove et M. Bouard (1928).** Rupture du barrage de l'Oued Fergoug (26 Novembre 1927). *La Houille Blanche. Revue internationamle de l'eau*. Number 4, Juillet-Août 1928. Pp 121. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1928022>
- Morsli, B. et al. (2004).** Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, 15 (1), 96–104.
- Moss R. et al. (2008).** Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 132 pp.
- Moss R.H., Edmonds J.A, Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K. et al. (2010).** The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, Vol 463, p. 747-755, 2010.
- Moussa R. (1991).** Variabilité spatio-temporelle et modélisation hydrologique, application au bassin de Gardon d'Anduze. Thèse, Université de Montpellier II, 314 p.
- Moussa S. et al. (2006).** Changements Climatiques et Sécurité Alimentaire. pp: 03, 04, 07, 08, 52, 56,57.
- Mutin G. (2011)** - L'eau dans le monde arabe : menaces, enjeux, conflits. Paris : Ellipses, 176 p.
- NASA. (2009).** Climate Forcings and Global Warming. January 14, 2009.
- Nations unies (1992).** Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques «CCNUCC», 1992.
- Nations unies (2016).** Portail du système des nations unies. Agir sur les changements climatiques. <http://www.un.org/fr/climatechange/consequences.shtml>
- NOAA National Centers for Environmental Information (2014).** State of the Climate: Global Analysis for Annual 2013, published online January 2014, retrieved on March 5, 2016 from <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201313>.

- Novotny EV and Stefan HG (2007).** Stream flow in Minnesota: Indicator of climate change. *J. Hydrol.*, Vol. 334(3–4): 319–333.
- OMM (1990).** Statistical Analysis of Series of Observations (R. Sneyers). Note technique N° 143, OMM–N° 415, Genève.
- OMM (1992).** Organisation météorologique mondiale. Vocabulaire Météorologique Internationale, WMO, 1992, 784 p.
- O’Neill et Schweizer (2011).** Projection and prediction: Mapping the road ahead. *Nature Climate Change*, Vol 1, p.352-353, 2011.
- Ouzeau G., M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, R. Vautard (2014).** Le climat de la France au XXIe siècle. Volume 4 Scénarios régionalisés: édition 2014 pour la métropole et les régions d’outre-mer. Sous la direction de Jean Jouzel. Ministère de l’Écologie, du Développement durable et de l’Énergie. France. 64p
- Pachauri R.K. and L.A. Meyer (2014).** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC team. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Palter JB (2015).** The Role of the Gulf Stream in European Climate. *Annual review of marine science*, 7, 113-137.
- Parnesan & Yohe (2003).** A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, vol. 401, *Nature*, 2003, p. 37.
- Parry M and T. Carter (1998).** Climate impact and adaptation assessment: a guide to the IPCC approach. No. of pages 166. ISBN 1-85383-266-9.
- Pfizenmayer A. and von Stoch H. (2001).** Anthropogenic climate change shown by local wave conditions in the North Sea. *Climate Research*, 19, 15-23.
- Philippe M. et al. (2006).** Changements climatiques: ce que le doute scientifique ne justifie plus. Institut d’Astronomie et Géophysique G. Lemaître, Université catholique de Louvain. <http://www.ipcc.ch>: GIEC
- Pierre M. (2007).** Actualités news environnement. Lutter contre le changement climatique est financièrement possible. <http://www.Actualité-news-environnement.Com/>
- Picon B. (2001).** Société et changement climatique : gérer l’incertitude, in *Changement climatique. Acte des tables rondes EID-Med (Montpellier, 15-05-2001).*
- Delaygue G., P. Thomas (2003).** Des cycles glaciaires-interglaciaires avant le Quaternaire? *Planet Terre Eduscol*.
- Planton S. et al. (2015).** Le climat de la France au XXIe siècle (Volume 5). *Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises*. 16 février 2015. Sous la direction de Jean Jouzel, CEA - LSCE/IPSL. Ministère de l’Écologie, du Développement durable et de l’Énergie. 68p.
- Preece D.A. (1976).** Le problème des données manquantes. University of Kent. Grande Bretagne.
- Puget J.L., R. Blanchet, J. Salençon et A. Carpentier (2010).** LE CHANGEMENT CLIMATIQUE. Rapport des interventions et discussions prononcées lors du débat sur le climat le 20 septembre 2010. Institut de France. Académie des sciences.
- Racsko P., Szeidl L. et Semenov M.A. (1991).** A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57, 27-41.
- Rakotomalala R. (2015).** Analyse de corrélation. Étude des dépendances - Variables quantitatives. Université Lumière Lyon 2. Pp 16-17

- Rahmstorf, S., Box J. Feulner, G. Mann, M. Robinson, Rutherford S., Schaffernicht E. (2015).** Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change* (online) [DOI:10.1038/nclimate2554]
- Reiter Paul (2007).** Dangers of disinformation. 11 janvier 2007.
- Remini B. (2005).** L'évaporation des lacs de barrages dans les régions arides et semi arides : exemples algériens. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 04, Juin 2005, pp.81-89.
- Remini W. et Remini B. (2003).** La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 02, Juin 2003, pp. 45-54.
- Réseau canadienne des scénarios de changements climatiques (RCSCC) (2015).** Définitions et explications de scénarios de changements climatiques. <http://ccds-dscc.ec.gc.ca/index.php?page=scen-definitions&lang=fr>
- Richardson Lewis Fry (1992).** *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge mathematical library. 2007, 236 p. (ISBN 978-0-521-68044-8 et 0-521-68044-1, OCLC 150337883.
- Robert B. (2000).** *Ecologie générale*. Université Pierre-et-Marie-Curie (paris VI). pp : 219, 220,221.
- Robert K. (2005).** Le petit âge glaciaire pour demain. <http://www.alertes-meteo.com/>
- Robinson P. J. and Finkelstein P. L. (1989).** *Strategies for development of climate scenarios*. Final Report to the U. S. Environmental Protection Agency. Atmosphere Research and Exposure Assessment Laboratory, Office of Research and Development, US EPA, Research Triangle Park, NC, 73 pp.
- Roland P. (2000).** Synthèse des interventions. *Changement climatique: fantasme ou réalité*. Géomorphologue à l'université Lumière, Lyon. <http://www.eid.med.org/fr/>
- Roussel G., P. Mérot, H. Quénot, P. Tréguer et J. Launay (2012).** Quelles sont les connaissances actuelles sur le changement climatique de l'échelle globale aux échelles régionales? Conseil Scientifique de l'Environnement de Bretagne (CSEB).
- Sanson J. (1949).** *Climatologie appliquée*. Ministère des travaux publics, des transports et du tourisme, secrétariat général à l'aviation civile et commerciale, France, Ed. BLONDEL LA ROUGERY, p. 2,129.
- Schmidli J, Frei C, Vidale PL (2006).** Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling. *Int J. Climatol.* 26:679–689.
- Seager Richard, D. S. Battisti, J. Yin, N. Gordon, N. Naik, A. C. Clement And M. A. Cane (2002).** Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters? *Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society*. Vol. 128 OCTOBER 2002 Part B No. 586. 128, pp. 2563–2586 doi: 10.1256/qj.01.128.
- Seguin B., Brisson N., Loustau D., Dupouey J.L. (2006).** Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt, in *L'Homme face au climat*, actes du symposium du Collège de France, Paris, 12-13 oct 2004, ed Odile Jacob, pp. 177-204.
- Seguin B. (2012).** Le changement climatique: conséquences pour les végétaux. *Quaderni* [En ligne]. URL : <http://quaderni.revues.org/525>
- Shaffrey L., et al. (2009).** UK HiGEM: The New UK High Resolution Global Environment Model. Model Description and Basic Evaluation, *J. Climate*, 22 (8), 1861–1896, 2009.
- Sharif M Archer D and Hamid A (2012).** Trends in Streamflow Magnitude and Timings in Satluj River Basin. *World Environmental and Water Resources Congress 2012: 2013-2021*

- Shawn M. C., S. Z. Dobrowski, J. A. Greenberg, J. T. Abatzoglou et A. R. Mynsberge (2011).** Report Changes in Climatic Water Balance Drive Downhill Shifts in Plant Species' Optimum Elevations, dans *Science*, vol. 331, no 6015, 21 janvier 2011, p. 324-327.
- Shindell D., G. Myhre, O. Boucher, P. Forster, F.M. Breon, J. Fuglestvedt. (2013).** Climate change 2013: The physical science basis. Chapter 8: Radiative Forcing in the AR5. Working group I. Contribution to the IPCC fifth assessment report (AR4).
- Siegel S. and Castellan Jr. J. (1988).** *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences.* McGraw-Hill Inc., Second Edition, 1988. Pp 243.
- Siegenthaler U and Sarmiento JL. (1993).** Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature* 365(6442):119-125. September 1993.
- Smith, J. B. and Tirpak, D. A. (1989).** The Potential Effects of Global Climate Change on the United States. Report to Congress, United States Environmental Protection Agency, EPA-230-05-89-050, Washington, DC, 409.
- Sophie L. et al. (1995).** Ecosystème naturels et cultivés, et changements globaux «dossier de l'Environnement de l'INRA n°8» ; P71, 72, 252,253
- Soussana J.F. (2013).** S'adapter au changement climatique Agriculture, écosystèmes et territoires. Edition Quae. p21. ISBN: 978-2-7592-2016-8. ISSN: 1777-4624.
- Spencer R.W. and W.D. Braswell (2008).** Potential biases in cloud feedback diagnosis: A simple model demonstration, *J. Climate*, 21, 5624-5628.
- SPI infra (2001).** Étude d'avant-projet détaillé de la protection de la ville de Sidi Bel Abbès contre les inondations. Sidi Bel Abbès : SPI infra, 2001.
- SRES (2000).** IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES), Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenham, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A. et al., 2000: Special Report on Emissions Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, 595 pp. <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>
- Stockton C.W. (1988).** Current research progress toward understanding drought. In proceed. Confer. On drought, water management an food production, 21-24 novembre 1988. Agadir Maroc : 21-35.
- Swingedouw D., L. Terray, C. Cassou, A. Voldoire, D. Salas-Me'lia, J. Servonnat (2010).** Natural forcing of climate during the last millennium: fingerprint of solar variability Low frequency solar forcing and NAO.
- Şen Z. and Habib, Z. (2000).** Spatial Precipitation Assessment with Elevation by Using Point Cumulative Semivariogram Technique. *Water Resources Management* **14**: 311–325.
- Şen Z. (2009a).** Precipitation downscaling in climate modelling using a spatial dependence function. *International Journal of Global Warming*. 2009 Vol. 1 No. 1/2/3
- Şen Z. (2009b).** *Spatial modeling principles in earth sciences*, Springer, 322. New York, 351.
- Şen Z. (2010).** Critical assessment of downscaling procedures in climate change impact models. *Int. J. Ocean and Clim. Syst.*, 1(2), 85–98.
- Şen Z. (2012).** Innovative Trend Analysis Methodology. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 17, No. 9: 1042–1046.

- Şen Z.; A. Al Alsheikh; A. S. A. M. Alamoud; A. A. Al-Hamid; A. S. El-Sebaay; and A. W. Abu-Risheh (2012).** Quadrangle Downscaling of Global Climate Models and Application to Riyadh. *Journal of irrigation and drainage engineering* © ASCE / October 2012.
- Şen Z. (2014).** Trend Identification Simulation and Application. *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 19, No. 3: pp. 635-642.
- Tabeaud M. et C. Magdelaine (2014).** Les variations climatiques naturelles de la Terre. Université Paris Panthéon Sorbonne.
- Teutschbein C. and Seibert J. (2013).** Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 5061–5077, 2013.
- Thiebaux H. J. and Pedder M. A. (1987).** *Spatial Objective Analysis*. Academic Press, 299 pp.
- Tierney et al. (2008).** Sédiments du Lac Tanganyika: retard CO<sub>2</sub>/ réchauffement de 3000 ans. *Science*, n° vol 322, 10 octobre 2008, p. 252-255
- Trenberth K. (2009).** Comprendre le climat mondial. Météo France.
- Twomey S. (1974).** Pollution and the planetary albedo. *Atmos. Environ.* 8 (12): December 1974. 1251–6. doi:10.1016/0004-6981(74)90004-3
- Urgelli B.. (2003).** Note sur la théorie de la serre, par R.W. Wood (1909). École normale supérieure de Lyon.
- Wagesho N Goel NK and Jain MK (2012).** Investigation of non-stationarity in hydro-climatic variables at Rift Valley lakes basin of Ethiopia. *J. Hydrol.*, Vol. 444: 113–133
- Watanabe S., Kanae S., Seto S., Yeh P. J.-F. Hirabayashi, Y. and Oki T. (2012).** Intercomparison of bias-correction methods for monthly temperature and precipitation simulated by multiple climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 117, 2012.
- Weyant J., C. Azar, M. Kainuma, J. Kejun, N. Nakicenovic, P.R. Shukla, E. La Rovere and G. Yohe (2009).** Report of 2.6 Versus 2.9 Watts/m<sup>2</sup> RCP Evaluation Panel, Geneva, Switzerland, IPCC Secretariat.
- Wilby R.L., Dawson C.W. and Barrow E.M. (2002).** SDSM -a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Environmental Modelling & Software*, 17, 147– 159.
- Wilks D. S. (1999).** Multi-site downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator. *Climate Research*, 11, 125-136.
- Wilks D.S. and R.L. Wilby (1999).** The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, 23, 329-357.
- Yue Rong (2011).** *Practical environmental statistics and data analysis*. ILM publications, SA trading division of international Labmate Limited. Pp 223-226.
- Zegdou M. (2003).** Les crues de l'oued Mékérra, leur impact sur la ville de Sidi Bel Abbes et les moyens de protection, mémoire d'ingénieur, centre universitaire de Mascara.