



*Université Cadi Ayyad  
Faculté des Sciences et  
Techniques- Marrakech*



*Observatoire Régional de  
l'Environnement et du  
Développement Durable*

## ***MEMOIRE***

Présenté pour obtenir le titre de :

**Licence es Sciences et Techniques**

***Eau et environnement***

# **Les changements climatiques à Marrakech (Maroc) Evolution récente et projections futures**

Par : KOURAISS Khaoula &  
AIT BRAHIM Yassine

Encadrés par :

- Mr BABQIQI Abdelaziz** (Observatoire Régional de l'Environnement et du Développement Durable)
- Mr SAIDI Mohamed El Mehdi** (Faculté des Sciences et Techniques - Marrakech)

Soutenu le 29/06/2010 devant la commission d'examen composée de :

- Mr SAIDI M. E., Professeur, FST Marrakech (Encadrant)
- Mr BABQIQI A., Directeur de l'OREDD (Encadrant)
- Mr AGOUSSINE M., Professeur, FST Marrakech (Examineur)
- Mme REDDAD A., Professeur, FST Marrakech (Examinatrice)

## *Remerciements*

*Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier notre Professeur **SAIDI Mohamed El Mehdi** qui a fait preuve d'une grande patience et disponibilité à notre égard et qui nous a permis, grâce à ses conseils, de mener à bien notre stage.*

*Nous adressons également notre gratitude à Mr. **BABQIQI Abdelaziz** qui nous a accueillis au sein l'Observatoire Régional de l'Environnement et du Développement Durable et qui a accepté de nous encadrer et nous diriger le long de ce travail. Un grand merci pour son précieux suivi du mémoire.*

*Nos sincères remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*Enfin, nos remerciements vont aussi à toutes les personnes du département de Géologie qui ont participé à notre formation ou à la réalisation de ce travail, ainsi qu'à nos collègues et nos amis qui ont eu la gentillesse de faire de ce stage un moment profitable.*

# SOMMAIRE

➤ Introduction générale .....	4
➤ Présentation générale de l'OREDD .....	5
➤ Objectifs de l'étude .....	5
➤ Source de données .....	7
➤ Méthodologie et outils .....	8

## Chapitre I :

### ***Le changement climatique récent observé au niveau mondial et national..... 9***

A. Au niveau mondial : .....	9
a. Le changement climatique récent observé .....	9
b. Facteurs naturels et anthropiques.....	10
c. Les prévisions climatiques futures .....	11
B. Au niveau national : .....	12
a. Influences sur le climat du Maroc .....	12
b. Variabilité du climat du Maroc .....	13
c. Engagements du Maroc .....	14

## Chapitre II :

### ***Etude de l'évolution du climat récent de Marrakech (1960–2005) ....15***

A. Etude de la climatologie générale de la ville de Marrakech .....	15
a. Indice xérothermique de Gaussen et diagramme ombrothermique .....	15
b. Indice d'aridité de De Martonne .....	16
c. Quotient pluviothermique et diagramme d'Emberger .....	18
B. Tendances des moyennes annuelles des températures minima, maxima et moyennes .....	20
C. Tendances des températures mensuelles maxima, minima et moyennes .....	23
D. Tendances des précipitations annuelles et mensuelles .....	26

### **Chapitre III :**

#### ***Etude des indices de changements climatiques à Marrakech (1960–2005)*** .....28

- A. Présentation générale des indices climatiques calculés .....28
- B. Evolution des indices climatiques SU35 et ID15 .....29
- C. Evolution des vagues de chaleur et de froid : WSDI et CSDI ..... 31
- D. Evolution des périodes maximales de sécheresse : CDD ..... 33
- E. Evolution de l'intensité des précipitations..... 34
- F. Evolution périodique du nombre de jours frais et de jours chauds ..... 34

### **Chapitre IV :**

#### ***Les projections futures des changements climatiques à Marrakech (2011-2099)*** .....36

- A. Présentation générale du logiciel utilisé : « SDSM » .....36
- B. Description des scénarios de changements climatiques A2 et B2 .....39
- C. Evolution du climat futur à Marrakech de 2011 à 2099 .....40
  - a. Tendances des précipitations annuelles .....40
  - b. Tendances des températures moyennes annuelles .....41
  - c. Tendances des températures maximales et minimales annuelles .....42

#### ➤ **Conclusion générale** .....44

#### **Références bibliographiques**.....45

#### **Glossaire**.....46

## **Introduction :**

Le changement climatique est l'un des défis les plus complexes du 21<sup>ème</sup> siècle. Aucun pays n'est à l'abri de ses effets et aucun pays ne peut, seul, faire face aux décisions politiques controversées, aux profondes transformations technologiques et autres enjeux indissociables et lourdes de conséquences à l'échelle de la planète.

En même temps que la planète se réchauffe, le régime des précipitations se modifie et des phénomènes extrêmes tels que sécheresses, inondations et incendies de forêts deviennent plus fréquents.

Le climat du Maroc est régulé principalement par deux centres d'action : l'anticyclone des Açores et les dépressions sahariennes. Son extension latitudinale, sa diversité géographique et son ouverture océanique jouent aussi un rôle crucial dans la détermination de ses types de climats. L'étude des indices d'aridité donne un climat semi-humide à semi-aride vers le nord et aride à désertique vers le sud du pays.

Le quatrième rapport du GIEC « Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat » prévoit une diminution au niveau des précipitations qui peut atteindre 20% pour la fin du siècle sur le Maroc. L'augmentation au niveau des températures est prévue atteindre 2.5°C à 5.5°C suivant les mêmes scénarios du GIEC vers la fin du siècle.

Notre approche consiste à faire ressortir des éléments qui caractérisent la variabilité du climat de la ville de Marrakech, étudier l'évolution du climat récent à travers les deux principaux paramètres, températures et précipitations et étudier des indices révélateurs des changements climatiques dans la ville, en vue de l'établissement de projections de changements futurs du climat, à l'aide d'un logiciel approprié, et les répercussions de ces changements sur nos ressources naturelles. Car si le climat évolue, la ressource en eau, l'agriculture, la pêche et les autres secteurs économiques seront évidemment parmi les activités à en subir les conséquences, au Maroc comme partout ailleurs dans le monde.

## **Présentation sommaire de l'Observatoire Régional de l'Environnement et du Développement Durable (OREDD) (lieu du stage) :**

L'OREDD est un organisme gouvernemental qui permet, entre autre, d'assurer le suivi permanent de l'état de l'environnement dans la région de Marrakech, de mesurer les résultats et la performance des actions initiées par les programmes de mise à niveau environnementale, de développer la prospective pour prévenir les tendances des milieux naturels en rapport avec les projets de développement et de définir les orientations stratégiques d'un développement local durable.

C'est donc un organisme qui s'efforce à concilier la protection de l'environnement et le développement durable de la région, en oeuvrant à combler le manque de données, d'informations fiables et d'études objectives qui peuvent servir d'indicateurs à la prise de décisions. Il est donc appelé à permettre de substituer la démarche globale et intégrée à la démarche unilatérale et sectorielle dans la gestion régionale de l'environnement et sera un outil de coopération entre les différents intervenants.

### **Objectifs de l'étude:**

L'objectif de ce travail est d'étudier l'évolution récente et future du climat de la ville de Marrakech (fig. 1) à travers deux principaux paramètres climatiques, les températures et les précipitations. Ceci par l'analyse de leurs tendances dans le temps, de la détermination de certains indices révélateurs de changements climatiques et de l'analyse de projections futures par l'utilisation de la technique statistique de réduction d'échelle SDSM (Statistical DownScaling Model) et les scénarios de changements climatiques provenant des modèles de circulation générale atmosphérique, dans le but de produire des scénarios à haute résolution et par pas de temps quotidien. Dans le présent travail, nous avons utilisé comme données sur le climat présent, les observations de la station météorologique de Marrakech (période 1960-2005) et les Ré-analyses (Données par point de grille qui sont la sortie d'un système d'assimilation des observations) de grande échelle NCEP (national Centers for Environmental Prediction, USA).

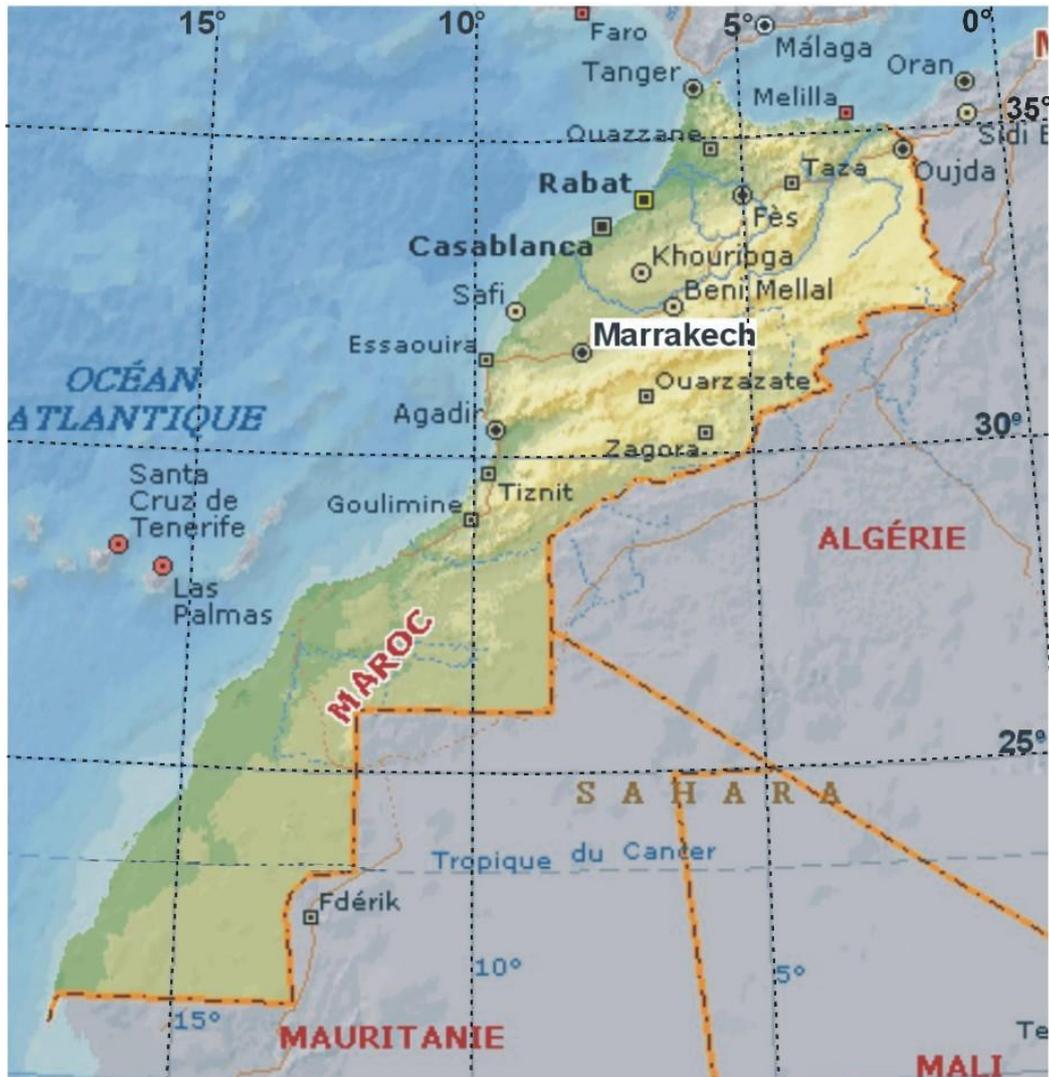


Figure 1 : position géographique de la ville de Marrakech

Pour le climat futur, nous avons eu recours aux scénarios de changements climatiques à basse résolution provenant du modèle anglais HadCM3 sur la période 1961-2099. Durant cette étude, nous nous sommes intéressés à la production des scénarios de changements climatiques futurs à haute résolution sur Marrakech par pas de temps quotidien sur toute la période 2011 - 2099 pour les paramètres : température moyenne, température maximale, température minimale et les précipitations.

Dans ce contexte, les objectifs que nous nous sommes fixés dans cette section sont les suivants:

- Caractériser le climat de Marrakech et ses modes de variabilité par rapport aux précipitations et températures provenant des modèles de circulation générale atmosphérique.
- Détecter et décrire le changement climatique récent qui a touché Marrakech et prédire le climat futur à partir d'un logiciel dédié à cet effet.

## **Sources de données :**

- **Données Observées :**

Ce sont des séries quotidiennes de données observées de températures moyennes, températures maximales, températures minimales et des cumuls de précipitations pour la période 1960 - 2005. Elles seront utilisées dans ce travail pour l'étude du changement climatique récent et ensuite pour la réalisation des scénarios de changements climatiques futurs à haute résolution.

- **Ré-analyses NCEP à basse résolution :**

Ces données sont le fruit d'un projet des Etats-Unis d'Amérique appelé «NCEP/NCAR». C'est un projet commun entre les NCEP (National Centers for Environmental Prediction) et le NCAR (National Center for Atmospheric Research) dont le but est de fournir de nouvelles Ré-analyses atmosphériques en utilisant les données historiques et les systèmes d'assimilations et produire l'analyse de l'état de l'atmosphère actuelle

- **Scénarios de changements climatiques HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version 3) à basse résolution :**

Ces scénarios de changements climatiques représentent une description du climat possible dans le futur, fondée sur des hypothèses à l'égard du fonctionnement du climat de la Terre, des niveaux futurs de la population mondiale, de l'activité économique et des émissions de gaz à effet de serre.

Dans cette étude, nous avons eu recours à deux scénarios de changements climatiques : un scénario A2 et un scénario B2.

**A2** : Il s'agit d'un scénario pessimiste qui décrit un monde où la population est en rapide augmentation, avec une croissance économique forte qui repose sur des technologies polluantes dans un monde devenu protectionniste avec des inégalités croissantes entre le Nord et le Sud. Il y a un recours persistant aux énergies fossiles, et une croissance économique inégale selon les régions.

**B2** : Il s'agit d'un scénario optimiste (moins pessimiste) qui décrit un monde où l'accent est placé sur les solutions locales, dans un sens de viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2. Il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse.

## **Outils et Méthodologie :**

Le Modèle de réduction d'échelle statistique (SDSM) est un outil d'aide à la décision afin d'évaluer les répercussions des changements climatiques locaux au moyen d'une technique robuste de réduction d'échelle statistique qui permet d'obtenir les données météorologiques quotidiennes à l'endroit en question pour une période future.

La technique consiste à utiliser des relations empiriques entre la variable observée à l'échelle locale appelée « predictand » (température moyenne, température maximale, température minimale et précipitations) et les variables à grande échelle appelées « prédicteurs », issues des modèles globaux de grande échelle, qui sont dans notre cas des données NCEP et HadCM3. Ceci permet de construire des scénarios de changements climatiques par pas de temps quotidien et à l'échelle de la station météorologique. Ces scénarios sont construits pour les mêmes paramètres température minimale, température maximale, température moyenne et précipitations pour la période 2011-2099.

## **Chapitre I :**

### **Le changement climatique récent observé au niveau mondial et national**

#### **A. Au niveau Mondial :**

##### **a. Le changement climatique récent**

Des progrès ont été réalisés dans la compréhension des changements climatiques à l'échelle spatiale et temporelle, grâce aux améliorations et à l'extension de nombreuses séries de données et des analyses de données, à une couverture géographique plus vaste, à une meilleure compréhension des incertitudes et à une plus grande variété de mesures.

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, car il ressort désormais des observations de l'augmentation des températures moyennes mondiales de l'atmosphère et de l'océan, de la fonte généralisée des neiges et des glaces, et de l'élévation du niveau moyen mondial de la mer.

Les observations effectuées depuis 1961 montrent que la température moyenne des océans du monde a augmenté jusqu'à des profondeurs d'au moins 3 000 mètres, et que les océans absorbent plus de 80% de la chaleur ajoutée au système climatique. Un tel réchauffement entraîne la dilatation de l'eau de mer, contribuant à la montée du niveau des mers.

Depuis les années 1970, des sécheresses plus sévères et plus longues ont été observées sur de larges étendues, en particulier dans les régions tropicales et subtropicales. Un assèchement accru dû à des températures plus élevées et des précipitations plus faibles a contribué aux modifications des sécheresses. Les modifications des températures de surface des mers, des structures des vents, et la décroissance du pack neigeux et de la couverture neigeuse ont également été associés aux sécheresses. (selon GIEC, 2007)

## **b. Les facteurs naturels et anthropiques du changement climatique :**

### **○ Les facteurs anthropiques :**

Les concentrations atmosphériques mondiales de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux ont fortement augmenté en conséquence des activités humaines entreprises depuis 1750. Elles dépassent aujourd'hui largement les valeurs préindustrielles déterminées à partir des carottes de glace couvrant plusieurs milliers d'années. L'augmentation mondiale de la concentration en dioxyde de carbone est essentiellement due à l'utilisation des combustibles fossiles et aux changements d'affectation des terres, tandis que la concentration accrue de méthane et d'oxyde nitreux est essentiellement due à l'agriculture.

Le dioxyde de carbone est le plus important gaz à effet de serre d'origine anthropique. La concentration atmosphérique mondiale de dioxyde de carbone a augmenté d'une valeur préindustrielle d'environ 280 ppm à 379 ppm en 2005.

Le rythme d'accroissement annuel de la concentration de dioxyde de carbone a été plus rapide au cours des 10 dernières années (1,9 ppm par an en moyenne pour 1995–2005) que depuis le début des mesures directes atmosphériques continues (1,4 ppm par an en moyenne pour 1960–2005), bien qu'il y ait une variabilité du taux de croissance d'une année sur l'autre.

### **○ Les facteurs naturels :**

Les variations climatiques, courantes, n'ont pas pour seule origine l'espèce humaine. La nature, aussi, a sa responsabilité. Les facteurs naturels les plus importants sont :

**L'activité solaire :** Elle fluctue en fonction d'un cycle d'une durée d'environ 11 ans qui correspond à celui des taches solaires (régions sur la surface du Soleil marquées par une température inférieure à leur environnement). Plus ces dernières sont nombreuses, et plus le Soleil envoie de l'énergie sur Terre. Un changement de température s'y produit alors. Ce phénomène semble toutefois avoir des effets plutôt limités sur le changement climatique comparé à l'activité anthropique.

**L'activité volcanique :** De violentes éruptions volcaniques ont probablement eu d'importants effets sur le climat à l'ère préhistorique

**Les causes astronomiques :** De légères modifications de la trajectoire de la Terre autour du Soleil pourraient être à l'origine des nombreuses périodes glaciaires qui ont marqué son histoire.

### c. Les prévisions climatiques futures :

Les projections estimées avaient suggéré une hausse des températures mondiales moyennes d'environ 0,15°C à 0,3°C par décennie pour les années 1990 – 2005. On peut désormais comparer ces projections aux valeurs observées, qui sont de l'ordre de 0,2°C par décennie : la fiabilité des projections à court terme en est donc renforcée.

Le réchauffement projeté pour le XXI<sup>e</sup> siècle fait apparaître des caractéristiques géographiques indépendantes du scénario utilisé, semblables à ce qui a été observé au cours des dernières décennies. Le réchauffement le plus important est attendu sur les terres émergées et aux latitudes élevées, et le moins important devrait apparaître dans le sud de l'océan indien et dans certaines parties de l'Atlantique nord.

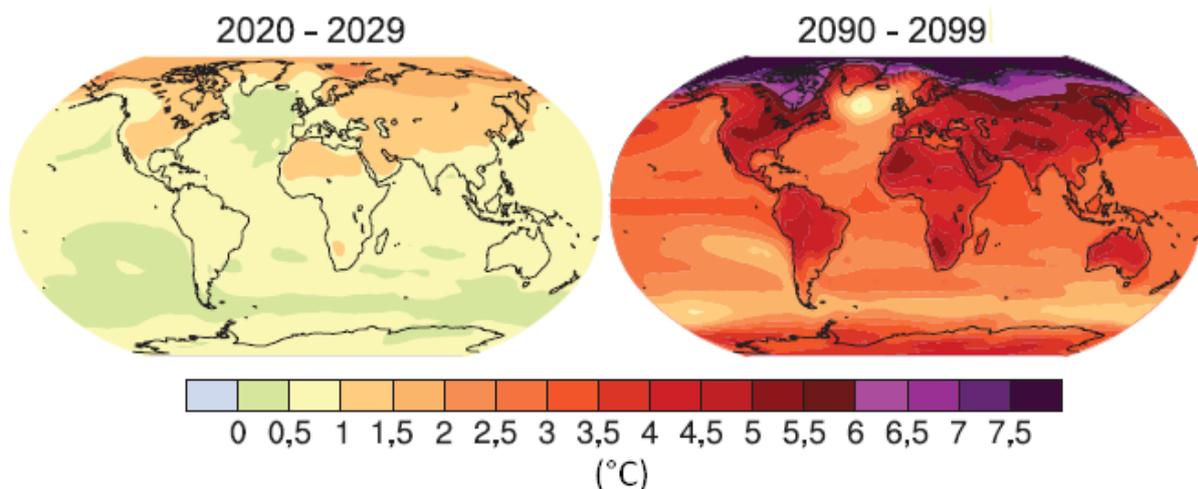


Figure 2 : Modifications des températures de surface simulées pour le début et la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

En se fondant sur un ensemble de modèles, il est probable que les futurs cyclones tropicaux deviendront plus intenses, avec des vents maximum plus forts et des précipitations plus fortes, liées à l'accroissement en cours de la température à la surface des mers tropicales.

Les émissions de dioxyde de carbone d'origine anthropiques passées et futures continueront à contribuer au réchauffement et à l'élévation du niveau de la mer pendant plus d'un millénaire, en raison des échelles de temps nécessaires pour retirer ce gaz de l'atmosphère. (Selon GIEC, 2007)

## **B. Au niveau national :**

### **a. Influences sur le climat du Maroc :**

Le Maroc figure parmi les pays d'Afrique qui disposent d'une riche mosaïque de types de climats avec des combinaisons diverses selon les lieux. Il est soumis aux influences méditerranéennes au Nord, océaniques à l'Ouest, continentales au centre, puis sahariennes de plus en plus vers le Sud-est et le Sud.

Le climat du Maroc est principalement caractérisé par un été chaud et sec où les précipitations sont quasiment absentes et l'évaporation particulièrement forte, et un hiver doux sur la bande littorale, froid à l'intérieur du pays, sur les chaînes de l'Atlas, du Rif et les hauts plateaux de l'Oriental.

Ces influences marquent fortement le climat : pluviométrie erratique, vague de froid et de chaleur avec des sécheresses fréquentes et imprévisibles, autant d'éléments qui se répercutent sur la vie économique et sociale du pays.

La gamme des pluviométries moyennes annuelles s'étend entre moins de 100 mm au sud du pays et 1200 mm dans les régions montagneuses du Moyen Atlas et du Rif, avec deux pics saisonniers, en hiver et au printemps, selon les régions.

L'une des caractéristiques principales du climat du Maroc est sa grande diversité, passant du type tempéré et humide (Tanger) au type désertique et sec (Ouarzazate, Layoune). Ces variations climatiques résultent de l'interaction entre plusieurs facteurs dont les principaux sont :

- Son extension latitudinale, de 21°N au 36°N au nord-ouest du continent africain, soit 15° de latitude, avec une grande ouverture, à la fois, sur la Méditerranée au nord (550km), et sur l'Océan Atlantique à l'ouest (plus de 3000km), et en marge du plus grand désert chaud du monde : le Sahara au sud.
- La topographie qui crée des zones climatiques fortement différenciées : les chaînes montagneuses de l'Atlas (altitude moyenne 3000m) constituent un obstacle aux vents dominants créant une zone désertique au sud-est, et celles du Rif (altitude moyenne 2000m) forment une barrière à l'influence méditerranéenne.

Sa position géographique entre deux grands centres d'action de la circulation générale atmosphérique: l'anticyclone des Açores, obstacle à la trajectoire des perturbations pluvieuses du front polaire, et la dépression saharienne.

#### **b. Variabilité du climat du Maroc :**

Le Maroc se situe au niveau des anticyclones subtropicaux qui ceignent le globe dans l'hémisphère nord, il est généralement en dehors de la trajectoire habituelle des perturbations pluvieuses qui circulent à des latitudes plus élevées.

La pluviométrie y est donc extrêmement aléatoire : elle présente d'énormes variabilités aux plans géographique, temporel, qualitatif et quantitatif.

Au Maroc, les précipitations, sont donc très irrégulières selon les régions et selon les années. Si importante soit-elle, cette variabilité fluctue aussi d'une saison à l'autre.

En raison de sa longitude, il se trouve situé à l'Est de l'anticyclone des Açores et reste donc soumis à l'influence des hautes pressions de l'Atlantique nord qui limitent à la bordure côtière atlantique et méditerranéenne l'influence des dépressions cycloniques de ce même front polaire. (Selon El Ouali A., 2010)

### **c. Engagements du Maroc :**

Une prise de conscience commence à émerger, mais dépasse rarement le stade d'intentions, ou de stratégies annoncées en grande pompe. Dans un pays miné par plus de 40% de taux d'analphabétisme, les mentalités sont difficiles à changer.

Mais à quel point le Maroc contribue-t-il au réchauffement climatique? Par définition, toute activité humaine émet du CO<sub>2</sub>. Un bilan des émissions carboniques réalisé en 1996 a permis d'établir que le marocain émettait en moyenne 1,82 tonnes de CO<sub>2</sub> par an. Bien moins qu'un qatari (52 tonnes/an) ou un américain (19 tonnes/an).

Le Maroc a signé la Convention Cadre sur les Changements Climatiques au Sommet de Rio en 1992, et l'a ratifiée le 28 décembre 1995. Il a également ratifié le Protocole du Kyoto le 25 janvier 2002 .

Le vendredi 05 décembre 2008, le pacte d'actionnaires du Fonds Capital Carbone Maroc (FCCM) a été lancé. Cette convention a pour mission de contribuer au développement de projets marocains se rattachant à la mise en œuvre du Protocole de Kyoto sur les changements climatiques et entrant dans le cadre du Mécanisme pour un Développement Propre (MDP).

Dans le cadre du respect de ses engagements en tant que Partie à la Convention Cadre sur les Changements Climatiques, le Maroc a déjà établi un inventaire national des sources d'émission et des puits des gaz à effet de serre pour l'année de référence 1994 selon la version 1996 révisée de la méthodologie du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat). Il en ressort que ses émissions ne dépassent pas 1.22 tonnes de CO<sub>2</sub> par habitant et par an.

Malgré sa contribution très peu significative aux émissions mondiales globales, le Maroc s'efforce de mener une politique environnementale et énergétique vigoureuse basée avant tout sur la sensibilisation du public ainsi que sur la mise en place d'un arsenal juridique et réglementaire adéquat.

## Chapitre II

### Etude de l'évolution et des tendances du climat récent de Marrakech pour la période 1960-2005

#### A. Etude de la climatologie de la ville de Marrakech

A partir des données de températures et de précipitations dont nous disposons, le calcul de quelques indices d'aridité nous permettra de caractériser le climat de Marrakech.

##### a- Indice xérothermique de Gaussen et diagramme ombrothermique

L'indice xérothermique de Gaussen définit les mois secs comme ceux où :  $P < 2T$

Avec  $P$  : la précipitation moyenne mensuelle en mm

Et  $T$  : La température moyenne du mois correspondant en °C

Pour la période 1960 – 2005, les précipitations et les températures mensuelles interannuelles correspondantes sont présentés dans le tableau suivant :

Mois	P	T	2T
J	33,9	12,2	24,5
F	36,7	13,9	27,9
M	41,5	16,2	32,4
A	37,4	17,7	35,4
M	<b>20,7</b>	21,0	<b>42,0</b>
J	<b>6,3</b>	24,4	<b>48,8</b>
J	<b>2,0</b>	28,5	<b>56,9</b>
A	<b>3,5</b>	28,4	<b>56,7</b>
S	<b>8,0</b>	25,3	<b>50,6</b>
O	<b>21,1</b>	21,2	<b>42,3</b>
N	37,8	16,4	32,8
D	31,1	12,8	25,7

Tableau 1 : Précipitations et températures à la station Marrakech

On constate que la période sèche à Marrakech s'étend du mois de **Mai à Octobre**, où le total mensuel des précipitations est inférieur au double de la température mensuelle.

Les mois les plus secs à Marrakech sont encore plus clairs sur le diagramme ombrothermique avec les 12 mois de l'année en abscisse et les précipitations et le double des températures mensuelles en ordonnées.

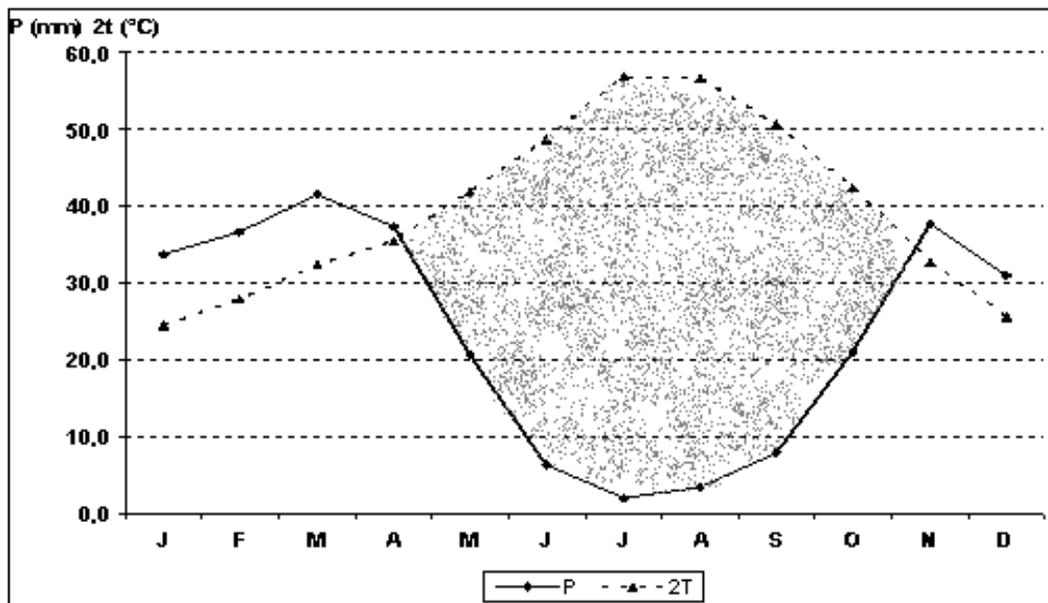


Figure 3: Le diagramme ombrothermique de Marrakech

Les mois arides précités (mai à octobre) sont donc visibles ici. Ils sont couverts par l'ombre d'aridité du graphique.

### b- Indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité annuel permet de définir le type de climat d'une station, il s'écrit :  $I = P/(T+10)$  avec P est la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et T la température moyenne annuelle (en °C).

L'aridité est d'autant plus grande que la valeur de I sera plus faible.

Si  $I < 10$ , le climat est aride

Si  $10 \leq I < 20$ , le climat est semi-aride

Si  $20 \leq I < 50$ , le climat est froid, tempéré ou tropical

Si  $I \geq 50$ , le climat est équatorial ou montagnard

L'indice d'aridité annuel a donné la valeur de 9,4 pour Marrakech, donc la ville a un climat **aride à tendance semi aride**.

Dans notre cas on peut également calculer les indices d'aridité mensuels (pour déterminer les mois les plus secs) en utilisant les hauteurs moyennes des précipitations mensuelles interannuelles ( $p$  en mm) et les températures mensuelles interannuelles ( $t$  en °C) de la période 1960 à 2005 dans la formule :

$$i = 12p / (t + 10)$$

Les résultats obtenus sont les suivants:

Mois	p	t	Indice de De Martonne
J	33,9	12,2	18,3
F	36,7	13,9	18,4
M	41,5	16,2	19,0
A	37,4	17,7	16,2
<b>M</b>	20,7	21,0	<b>8,0</b>
<b>J</b>	6,3	24,4	<b>2,2</b>
<b>J</b>	2,0	28,5	<b>0,6</b>
<b>A</b>	3,5	28,4	<b>1,1</b>
<b>S</b>	8,0	25,3	<b>2,7</b>
<b>O</b>	21,1	21,2	<b>8,1</b>
N	37,8	16,4	17,2
D	31,1	12,8	16,3

Tableau 2 : Précipitations, températures et indices mensuels de De Martonne à Marrakech

Les mois d'aridité marquée (ou l'indice de De Martonne est inférieur à 10) s'étendent également ici de mai à octobre. Le résultat donné par le diagramme ombrothermique donc est confirmé.

### **c- Quotient pluviothermique et diagramme d'Emberger :**

Le diagramme d'Emberger permet de délimiter les étages bioclimatiques et de placer une station dans l'un des étages d'Emberger (humide, subhumide, semi-aride, aride et saharien).

Le quotient pluviothermique s'écrit :  $Q = 2000 P / (M^2 - m^2)$

P : Précipitations moyennes annuelles en mm

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud en Kelvin ( $^{\circ}\text{C} + 273$ )

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid en Kelvin

Ce quotient croit avec les hauteurs des précipitations, mais décroît avec les amplitudes thermiques annuelles, c'est-à-dire les différences entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid.

Dans le cas de Marrakech, la valeur de ce quotient est 30.7, donc connaissant la moyenne des températures minimales du mois le plus froid ( $m = 5.9^{\circ}\text{C}$ ), on peut donc placer la ville de Marrakech dans le diagramme d'Emberger comme le montre la figure 4.

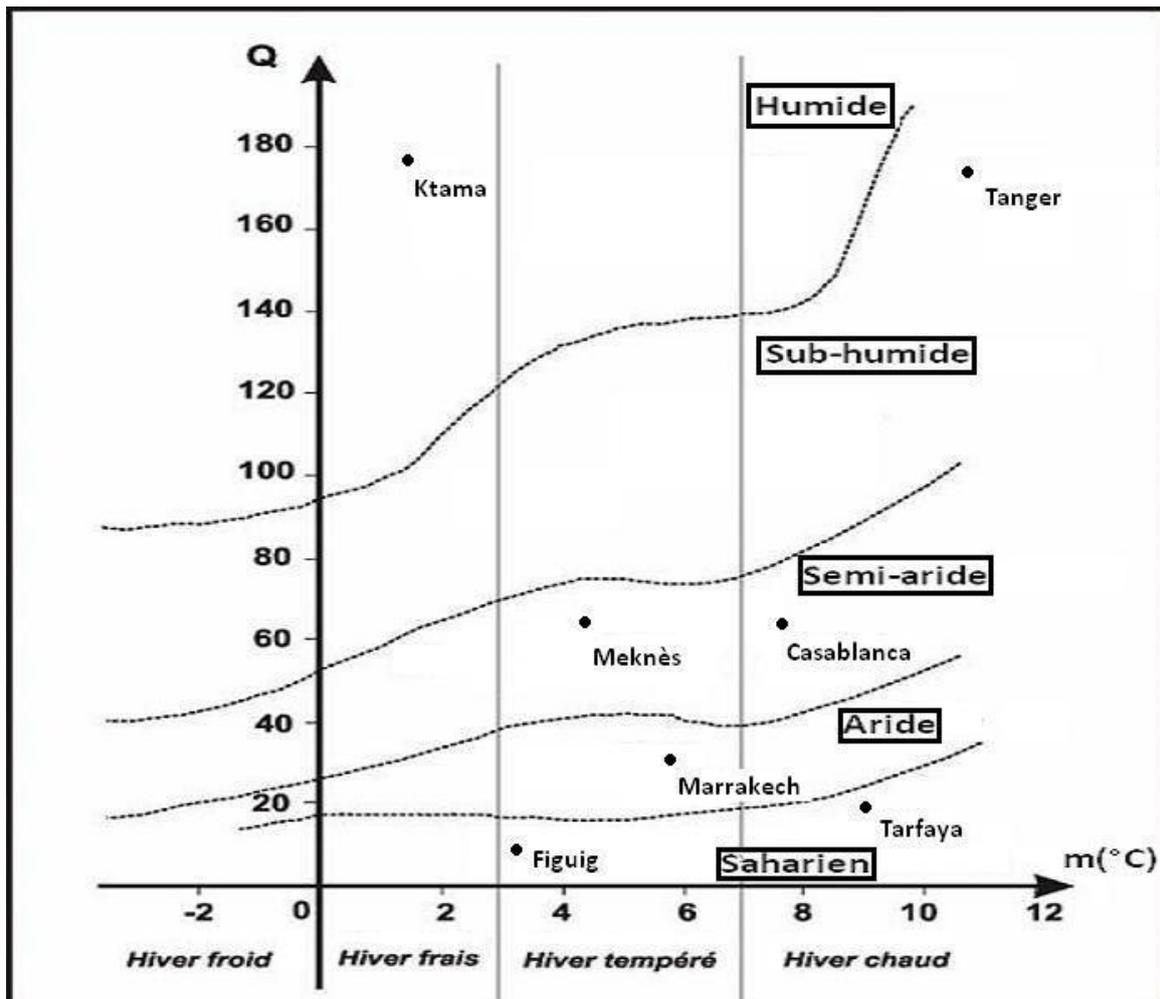


Figure 4 : Etages bioclimatiques d'Emberger et position de la ville de Marrakech

La ville se trouve donc dans l'étage bioclimatique aride, comme l'ont montré les indices précédents.

Les données de températures mensuelles nous ont permis de constater que l'écart thermique entre l'été et l'hiver est important (climat continental).

Quant aux données journalières de températures maximales et températures minimales, ils ont permis de constater une amplitude journalière à savoir une grande différence entre le jour et la nuit.

## B- Tendances des moyennes annuelles des températures minima, maxima et moyennes :

L'étude de l'évolution des moyennes annuelles des températures minima, maxima et moyennes a donné les résultats suivants :

### a. Tendance des moyennes annuelles des températures maxima :

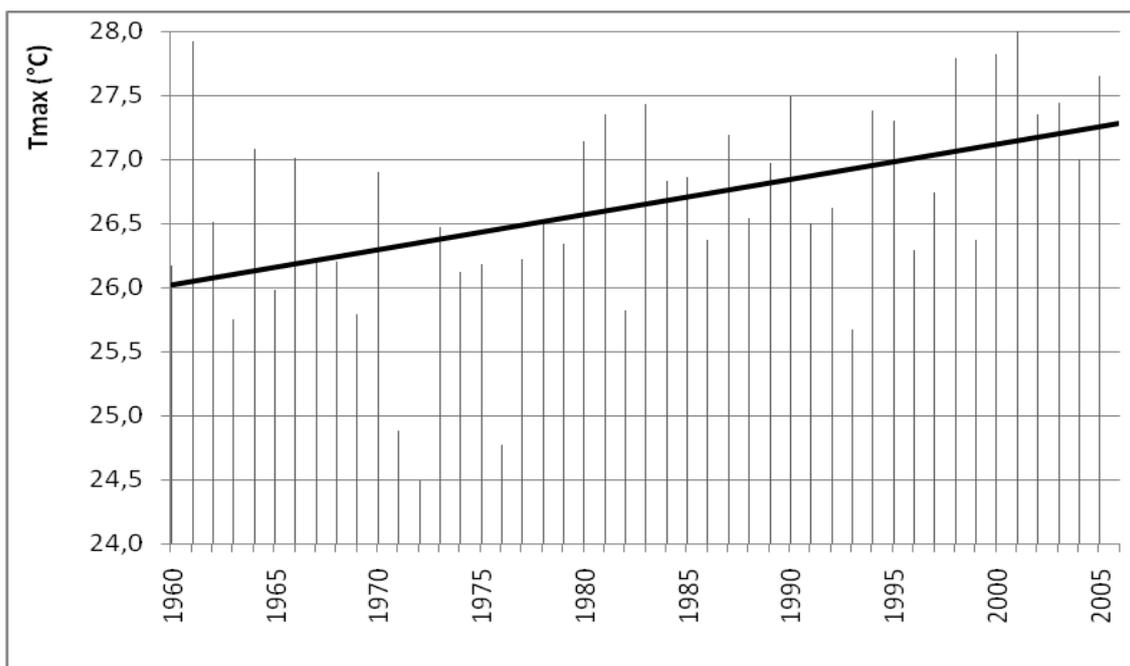


Figure 5 : Tendance des moyennes annuelles des températures maxima à Marrakech

Les températures maxima annuelles sont obtenues en faisant la moyenne de toutes les températures journalières, ces dernières sont mesurées aux stations météorologiques à l'aide du thermomètre à maxima. Ces données ont été fournies par la direction de la météorologie nationale et couvrent une période de 46 ans de 1960 à 2005.

La figure 5 montre tout d'abord une variabilité interannuelle des températures maxima annuelles ce qui confirme le caractère irrégulier du paramètre.

Par ailleurs, la droite de tendance dans le temps de ces températures maxima montre une augmentation avec une pente régulière de 1960 à 2005. Selon cette droite, La température maximale aurait augmenté d'une valeur initiale d'environ 26° à une température de 27,25°, soit 1,25°C d'élévation en 46 ans.

## b. Tendence des moyennes annuelles des températures minima :

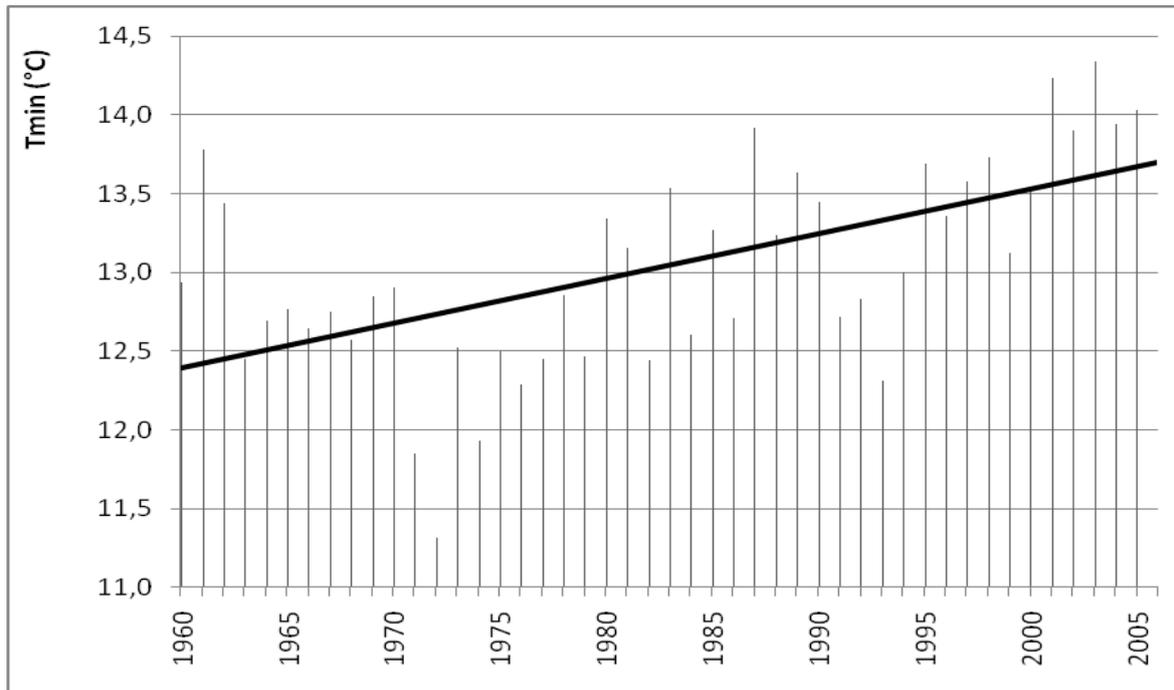


Figure 6 : Tendence des moyennes annuelles des températures minima à Marrakech

Les températures minima annuelles sont obtenues par le même principe que les températures maxima annuelles en utilisant un thermomètre à minima.

De même que les températures maxima annuelles, il existe une variabilité interannuelle des températures minima annuelles, cette irrégularité est illustrée par la figure 6.

En contrepartie, la droite de tendance dans le temps de ces température minima montre une augmentation qui donne comme élévation presque 1.3°C en 46 ans.

### c. Tendence des températures moyennes annuelles :

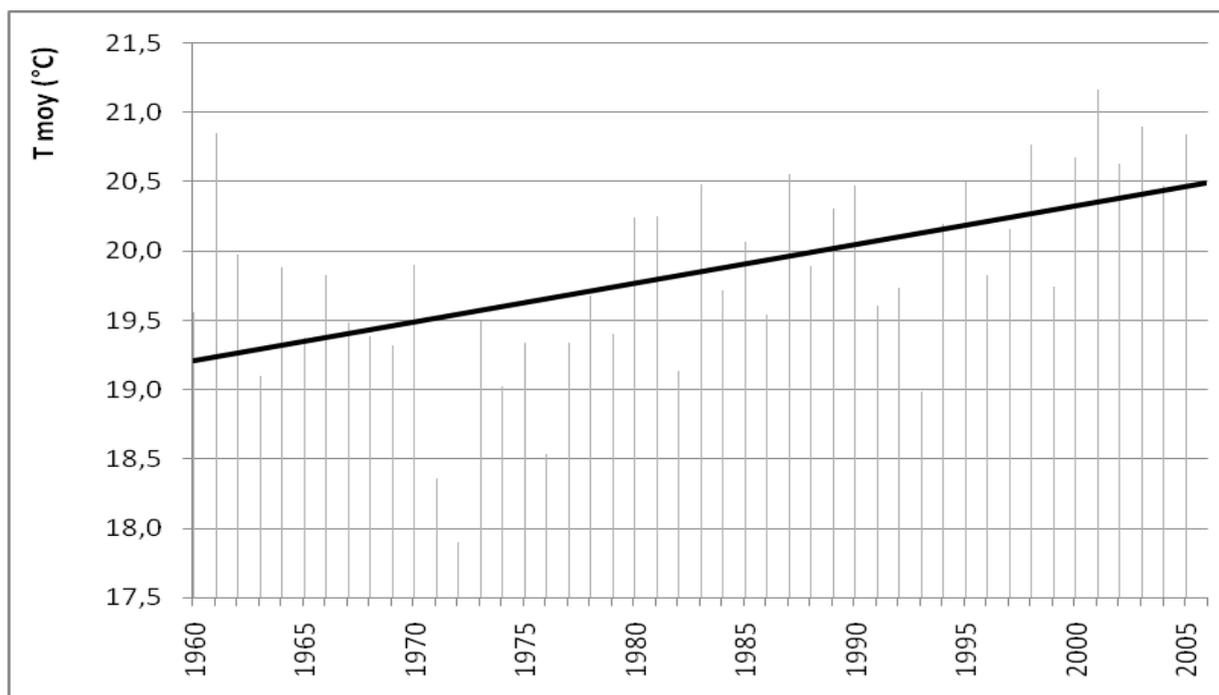


Figure 7 : Tendence des températures moyennes annuelles à Marrakech

Le caractère irrégulier des températures annuelles déjà mentionnées subsiste toujours dans les températures moyennes annuelles.

L'évolution interannuelle de ces moyennes donne une tendance positive confirmant les résultats précédents avec une élévation d'environ 1.25 °C en 46 ans.

## C- Tendence des températures mensuelles maxima, minima et moyennes :

### a. Tendence des températures maxima mensuelles

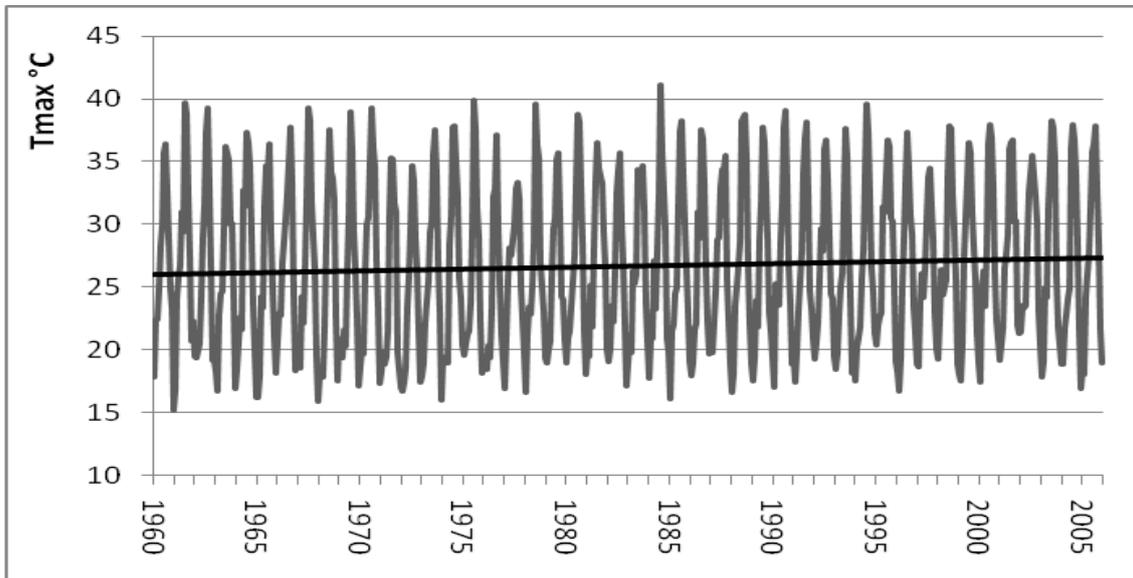


Figure 8: Tendence des températures mensuelles maxima à Marrakech

La figure 8 montre une grande variabilité des températures maxima des mois les plus chauds (les pics en haut) et aussi une grande variabilité des températures maxima des mois les plus froids (les pics en bas).

La variabilité interannuelle est également mise en relief, ce qui confirme le caractère continental du climat de Marrakech où les étés sont très chauds et les hivers sont très froids.

Cette amplitude thermique des températures maxima peut atteindre 25°C (15°C pour la température maxima moyenne du mois le plus froid à 40°C pour le mois le plus chaud).

Enfin, la tendance au cours des 46 ans de mesure est vers une légère augmentation des températures maxima moyennes mensuelles comme le montre la droite de tendance.

## b. Tendence des températures mensuelles minima

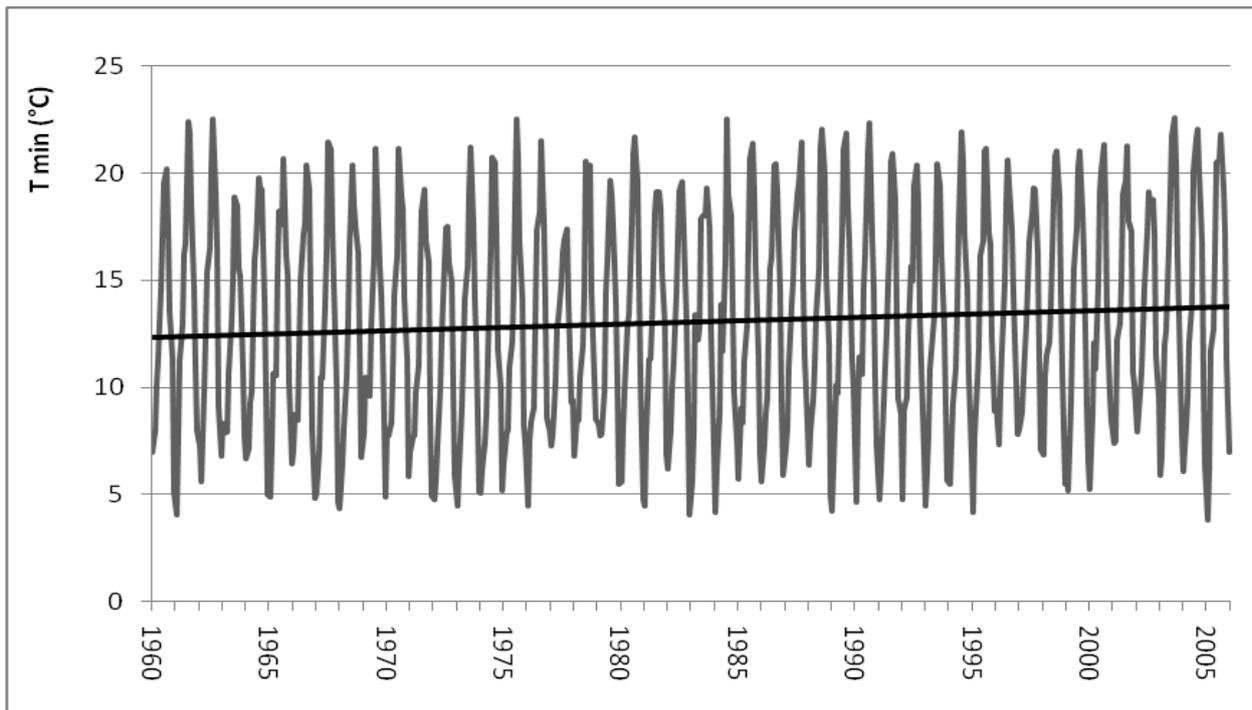


Figure 9: Tendence des températures mensuelles minima à Marrakech

De même pour les températures mensuelles minima la figure 9 montre une légère élévation des températures qui arrive à environ  $1,6^{\circ}\text{C}$  vers la fin de l'année 2005, d'après la droite de tendance.

D'autre part, la figure 9 montre clairement qu'il existe un écart très important entre la valeur maximale des températures minimales du mois le plus chaud et la valeur minimale du mois le plus froid pendant la même année.

### c. Tendance des températures moyennes mensuelles

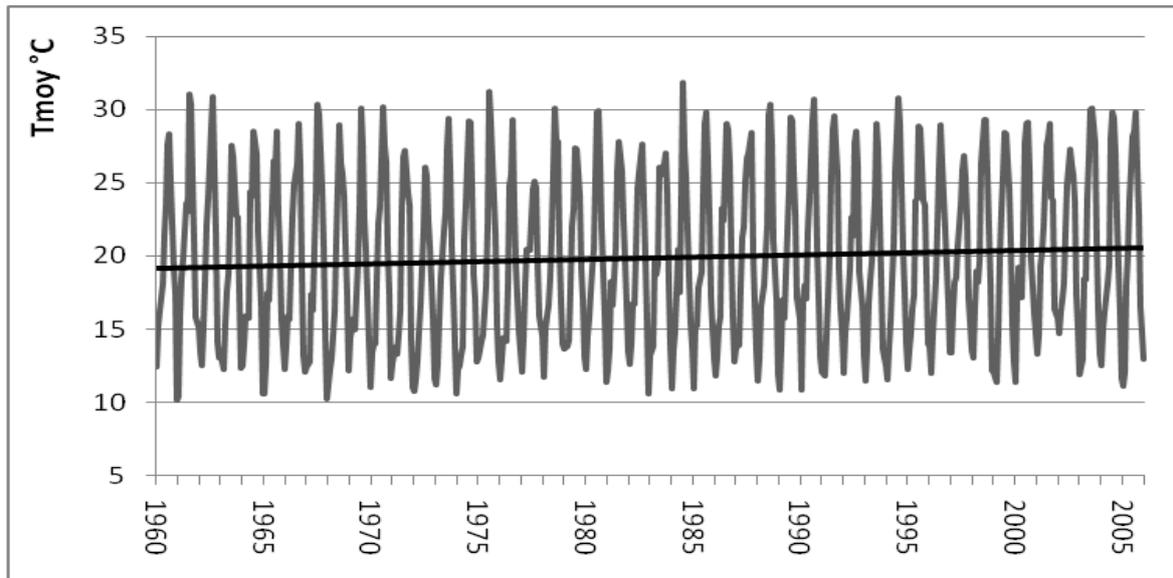


Figure 10 : Tendance des températures moyennes mensuelles à Marrakech

L'évolution des températures moyennes mensuelles, de même que les températures maxima et minima, tend vers la hausse avec une importante variabilité interannuelle confirmant une autre fois le caractère continental de la ville de Marrakech : étés chauds et hivers froids.

Selon ces résultats, la tendance à l'augmentation des températures est présente dans les divers cas : un réchauffement climatique de 1960 à 2005 est donc bien confirmé.

## D- Tendence des précipitations annuelles et mensuelles

### a- Tendence des précipitations annuelles

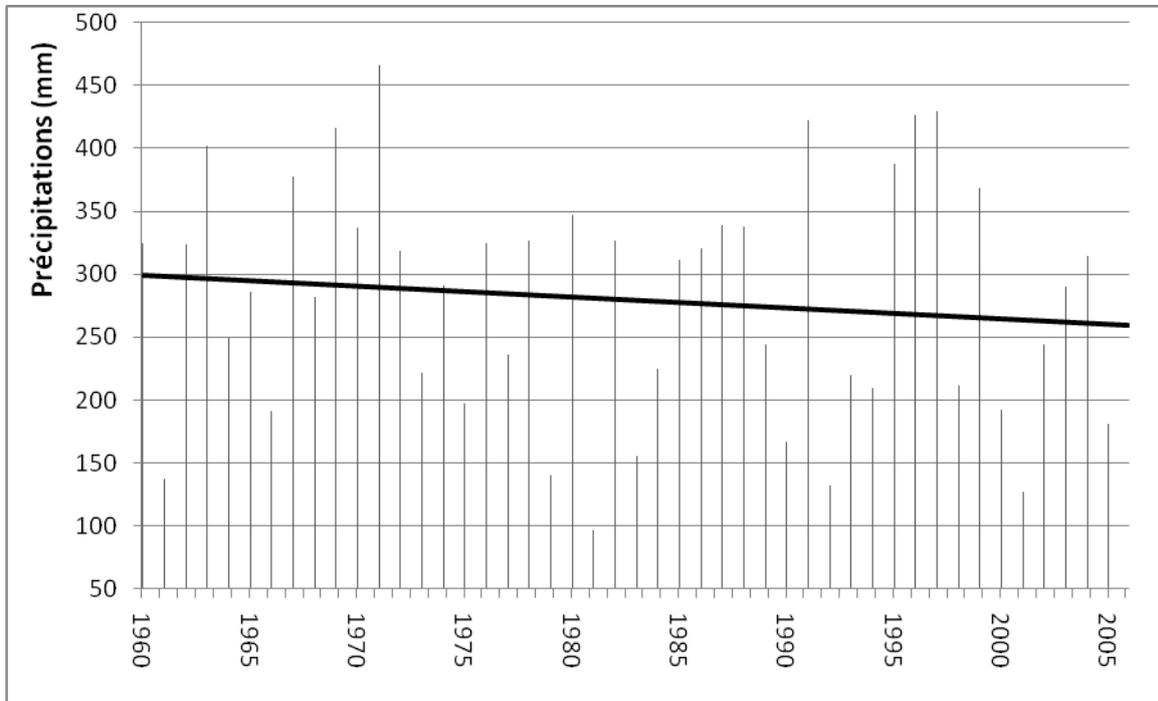


Figure 11: Tendence des précipitations annuelles de Marrakech (1960 – 2005)

Comme pour les températures, les précipitations annuelles à Marrakech sont très variables et irrégulières d'une année à l'autre.

La moyenne interannuelle est de l'ordre de 280 mm, l'écart-type est de 93,7 et le coefficient de variation est de l'ordre de 33,5%. Les valeurs de ces paramètres de dispersion confirment la grande variabilité de ce paramètre climatique.

D'autre part, cette variabilité illustre une tendance à la baisse des hauteurs annuelles des précipitations. Pendant les années 60 et 70, par exemple, le cumul annuel était de l'ordre de 293 mm, alors qu'il est devenu d'environ 270 mm pendant les décennies 90 et 2000.

## b- Tendence des précipitations mensuelles

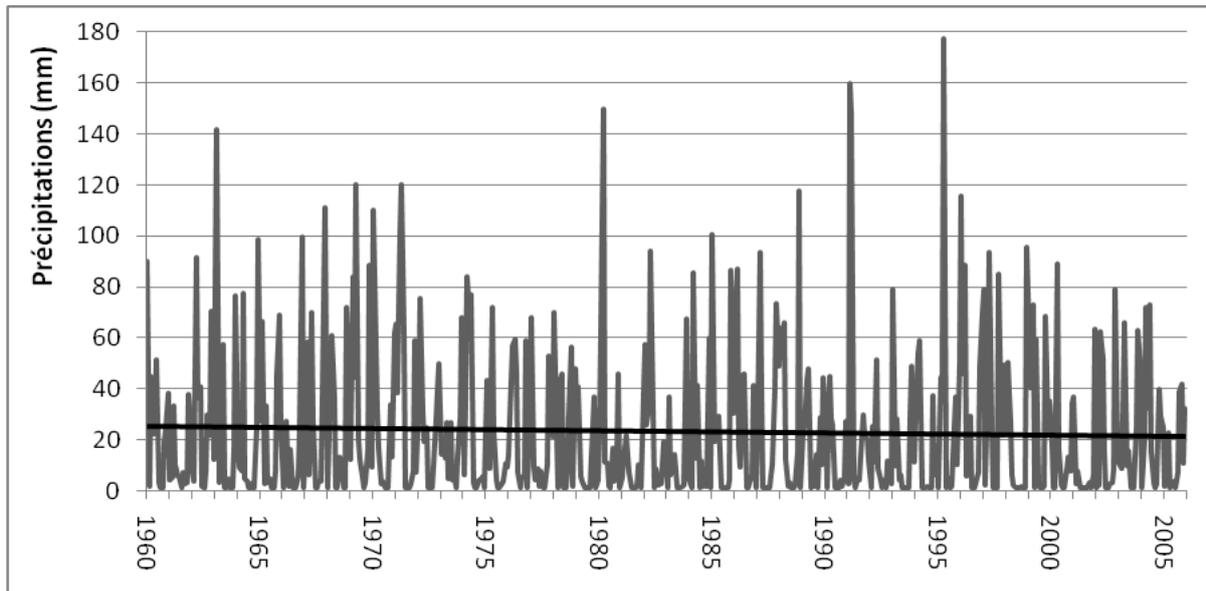


Figure 12 : Tendence des précipitations mensuelles à Marrakech

Les précipitations mensuelles sont encore plus irrégulières que les hauteurs annuelles, leur variabilité est beaucoup plus marquée : Plusieurs mois sont secs et d'autres dépassent la centaine de mm de hauteur de pluie.

Les types de temps générateurs de pluie sont aléatoires, ils dépendent des circulations atmosphériques, notamment le déplacement du fameux anticyclone des Açores vers le sud et l'installation au large du Maroc de dépressions qui dirigent vers le pays des perturbations pluvieuses intéressantes.

Par ailleurs la tendance à la baisse des hauteurs mensuelles des précipitations est également illustrée par la figure 12, où la diminution de pluie serait depuis 1960 de quelques millimètres par mois.

La tendance globale à la sécheresse constatée à l'échelle annuelle réapparaît donc au pas de temps mensuel.

La tendance à la baisse des précipitations met en lumière la diminution globale d'humidité et l'installation régulière d'une sécheresse qui est couplée à la hausse des températures précédemment constatées.

## Chapitre III

### **Etude des indices révélateurs de changements climatiques à Marrakech (1960 – 2005)**

#### **A- Présentation générale des indices climatiques calculés**

Les indices calculés lors de cette étude sont de deux types :

##### ➤ **Les indices relatifs à la température :**

- **SU35 : (indice de chaleur)** cet indice correspond au nombre total annuel de jours chauds : (le nombre total annuel de jours ayant une température maximale supérieure à 35°C).
- **ID15 : (indice de froid)** il correspond au nombre total annuel de jours frais : (le nombre total annuel de jours ayant une température maximale inférieure à 15°C).
- **WSDI : (vagues de chaleur)** : c'est le nombre total annuel de jours avec au moins six jours consécutifs de température maximale supérieure au percentile 90.
- **CSDI : (vagues de froid)** : c'est le nombre total annuel de jours avec au moins six jours consécutifs de température minimale inférieure au percentile 10.

##### ➤ **Les indices relatifs aux précipitations :**

- **CDD : (période maximale de sécheresse)** : c'est le nombre maximal de jours consécutifs de sécheresse, c'est-à-dire les jours avec précipitations inférieures à 1mm (Pour que cet indice soit significatif, nous l'avons calculé dans cette étude seulement pour la saison pluvieuse, à savoir de Septembre à Avril).
- **R95p : (intensité des précipitations)** c'est le cumul des précipitations supérieures au percentile 95.  
(Le percentile 95 est un paramètre statistique qui désigne la valeur qui a pour fréquence 95% dans une série annuelle triée en ordre croissant)
- **R99p : (intensité des précipitations)** :c'est le cumul des précipitations supérieures au percentile 99.  
(Le percentile 99 est calculé de la même façon que le percentile 95)

## B- Evolution des indices climatiques SU35 et ID15 :

### a. Nombre total annuel de jours chauds : (indice de chaleur)

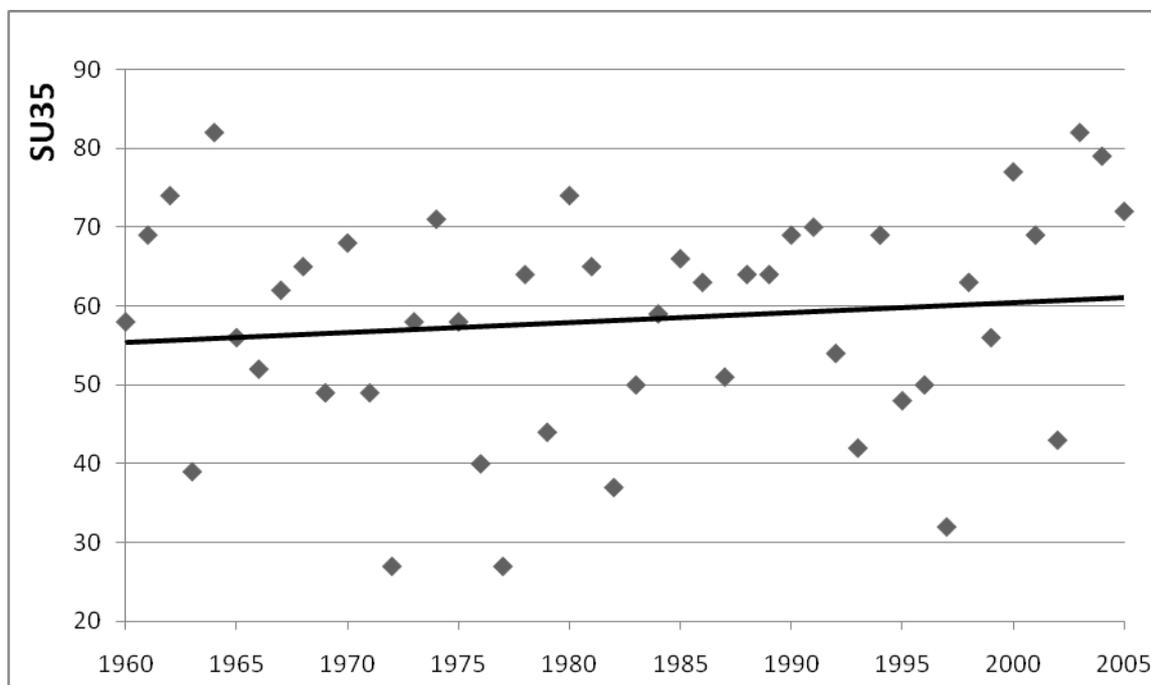


Figure 13 : Evolution de l'indice climatique SU35 à Marrakech (1960 – 2005)

Les jours chauds désignent ici ceux dont la température dépasse 35°C. C'est un nombre annuel assez variable, mais si on compare les 23 premières années avec les 23 dernières années de la série d'étude, on constate que les nombres de ces jours chauds inférieurs à 50 par exemple étaient fréquents pendant la première période (8 fois) alors qu'ils sont plus rares pendant la seconde moitié de la série (4 fois).

Par ailleurs, le nombre de fois ou le nombre de jours chauds a dépassé 50 jours par an est légèrement en hausse. D'une façon générale, une tendance à l'augmentation de ce nombre est mise en évidence par la figure 13 et sa droite de tendance.

**b. Nombre total annuel de jours frais : (indice de froid)**

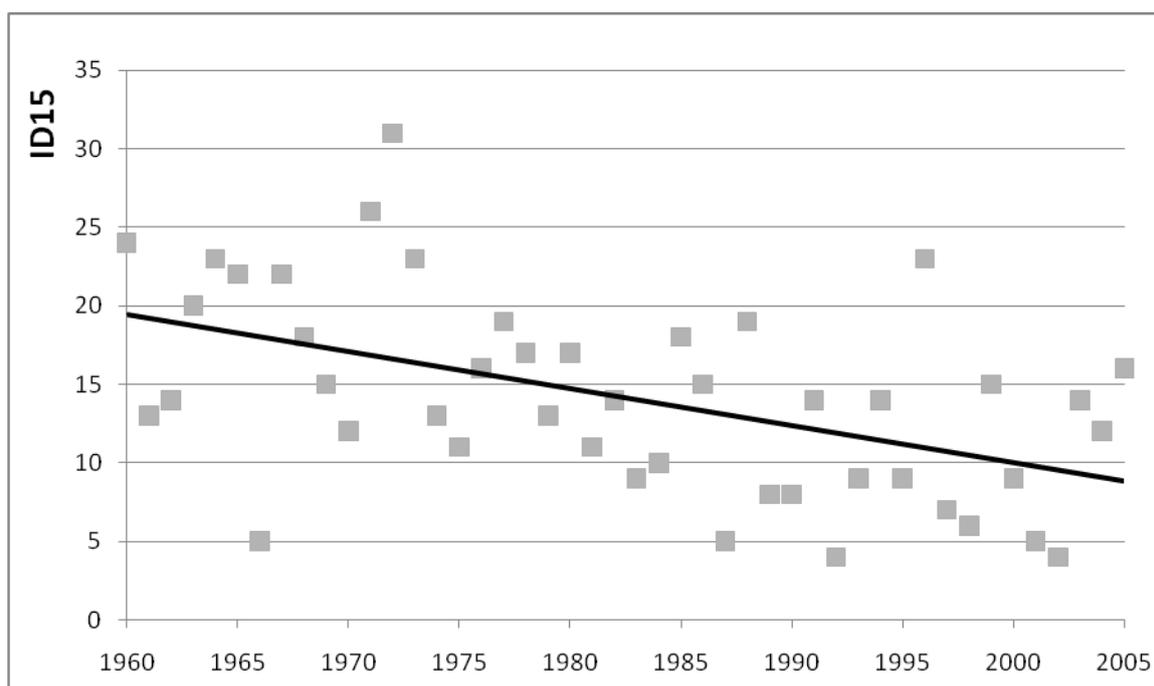


Figure 14 : Evolution de l'indice climatique ID15 à Marrakech (1960 – 2005)

Dans ce cas, on considère comme jours frais ceux qui ont une température maximale inférieure à 15°C. Le nombre total annuel de ces jours est tellement variable : la première moitié est marquée par des valeurs importantes de ce nombre, par contre la seconde moitié présente des valeurs très faibles.

D'autre part, une forte tendance à la baisse du nombre de jours frais est mise en évidence par la figure et la droite de tendance.

## C- Evolution des vagues de chaleur et de froid :

### a. Vagues de chaleur :

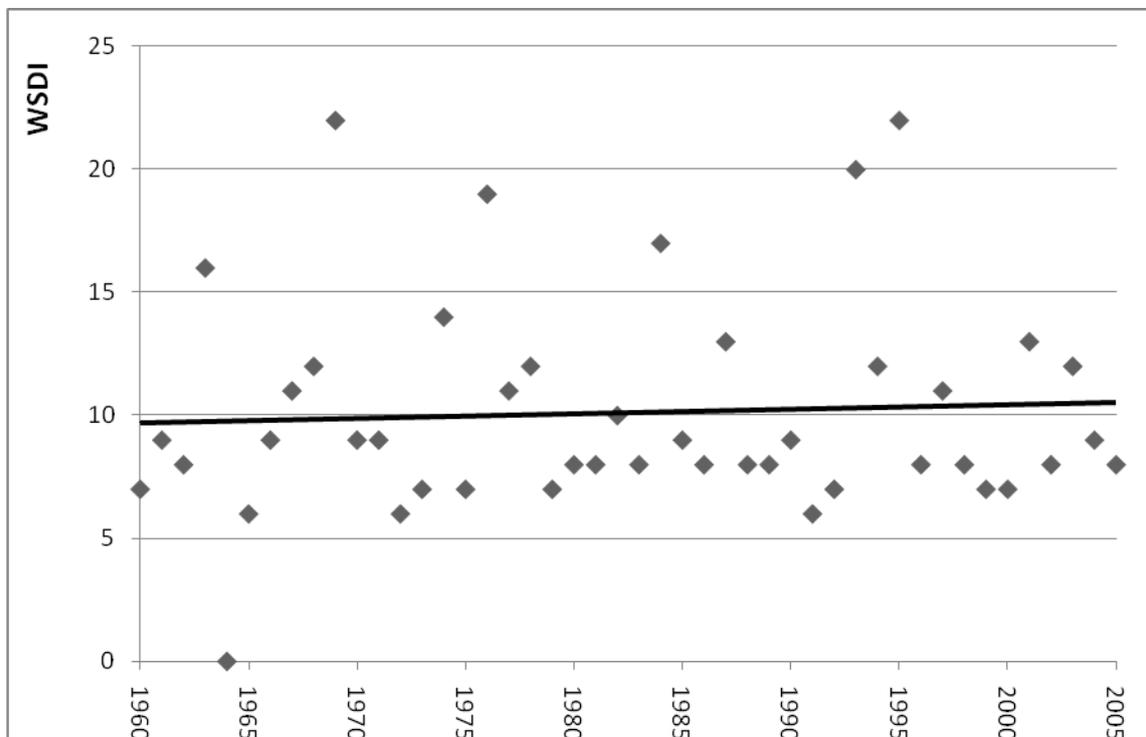


Figure 15 : Evolution de l'indice climatique WSDI à Marrakech (1960-2005)

Le percentile 90 des températures maxima est la valeur qui a 90% de chaque série annuelle.

Le nombre annuel de jours avec au moins 6 jours consécutifs de températures maxima supérieures au percentile 90 est assez variable d'une année à l'autre, il peut être de 6, 7, 8, 9, 10, 14, 16, 19 ou même de 22 jours.

Mais ces jours sont devenus au fil des années de plus en plus nombreux, une légère tendance à la hausse est apparue sur la série des 46 ans de données analysées.

## b. Vagues de froid :

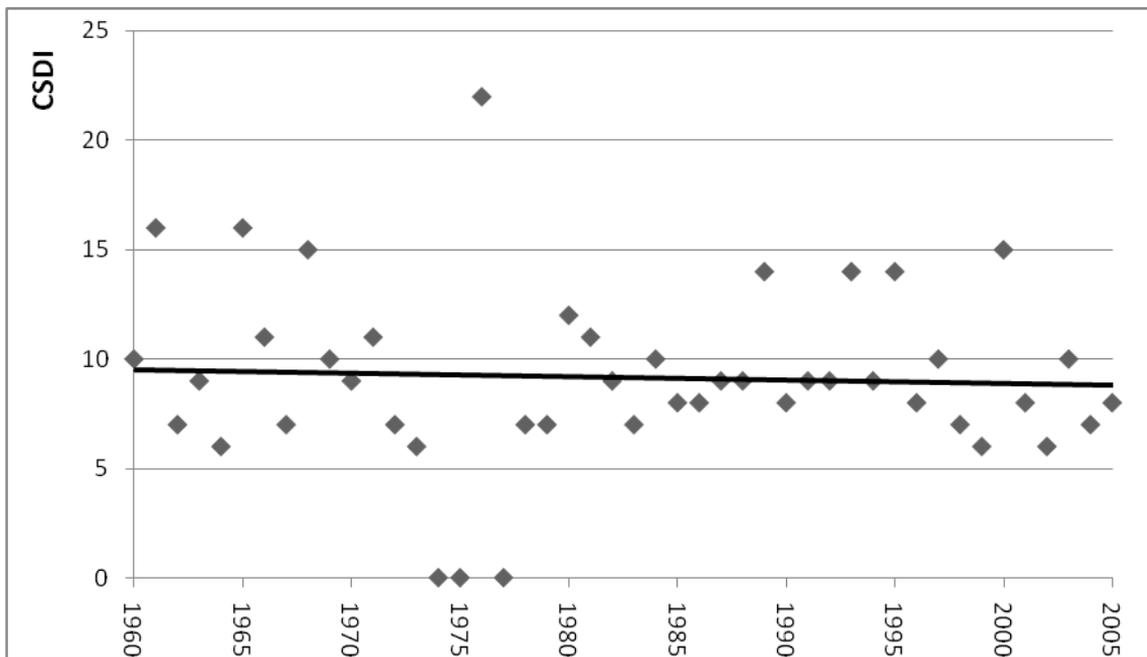


Figure 16 : Evolution de l'indice climatique CSDI à Marrakech (1960 – 2005)

L'indice des vagues de froid est défini par le percentile 10 qui a 10% de chaque série annuelle.

Le nombre annuel de jours avec au moins 6 jours consécutifs de températures minimales inférieures au percentile 10 varie de 0 à 22 jours, mais la majorité des vagues de froid à Marrakech durent de 6 à 15 jours.

Depuis l'an 2000, on remarque que ce nombre de jours n'a plus jamais dépassé 10 jours. Le tendance à la baisse de ce nombre est légèrement perçue et illustré par la figure 16 et la droite de tendance.

#### D- Evolution des périodes maximales de sécheresse :

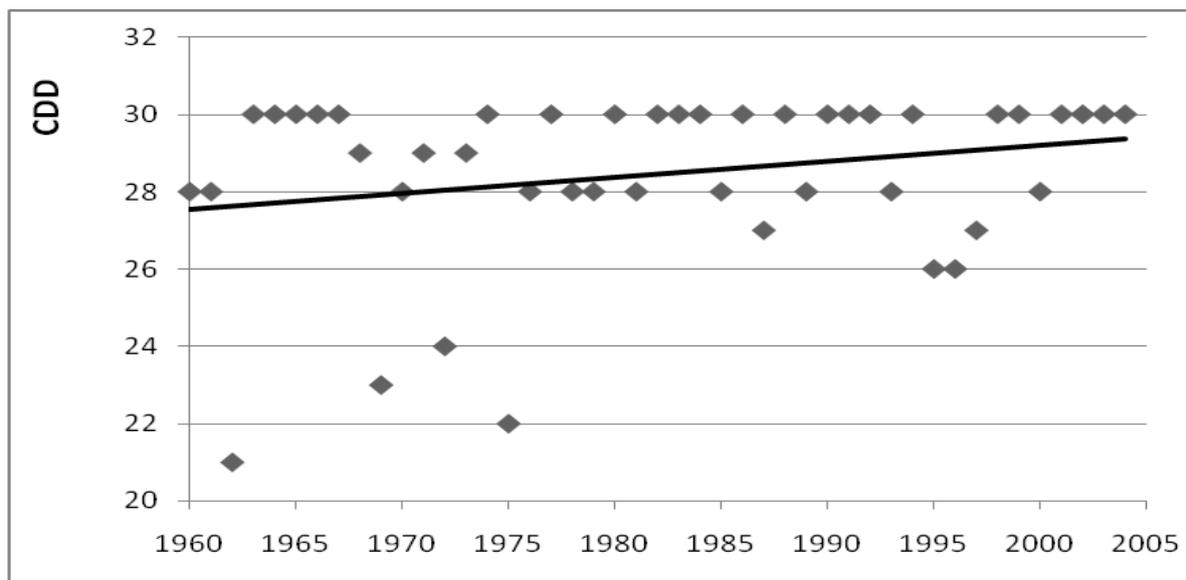


Figure 17 : Evolution de l'indice climatique CDD à Marrakech (1960 – 2005)

Le nombre maximal de jours consécutifs secs (dont les précipitations sont inférieures à 1mm) sur la période pluvieuse (Septembre – Avril) a une tendance positive, donc les périodes sèches sont devenues de plus en plus fréquentes à Marrakech depuis 1960 jusqu'à 2005.

Ces jours consécutifs pouvaient être inférieurs à 25 jours jusqu'à 1975, après, il n'y a que des périodes de 26 jours et plus.

On constate donc une tendance vers l'assèchement surtout pendant la période pluvieuse, période importante pour l'agriculture.

## E- Evolution de l'intensité des précipitations : (R95p et R99p)

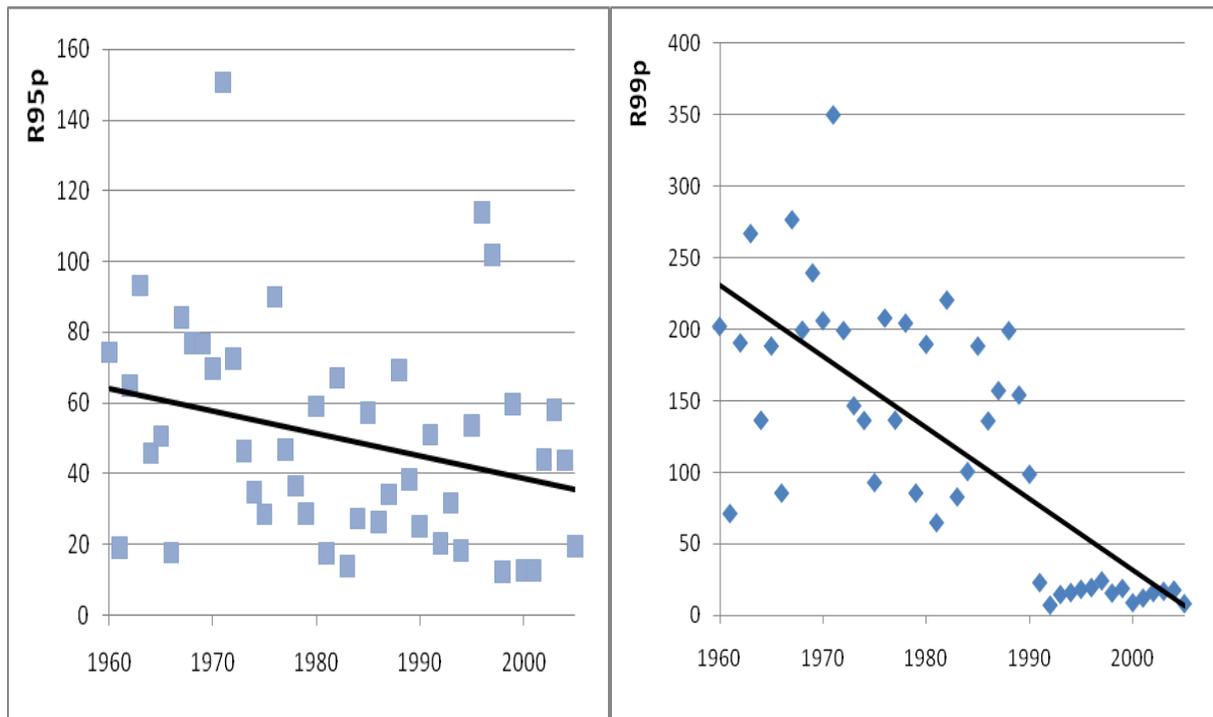


Figure 18 - 19 : Evolution des indices climatiques R95p et R99p à Marrakech (1960-2005)

On constate d'après les deux figures 18 et 19 une tendance à la diminution du cumul des précipitations supérieures aux percentiles 95 et 99.

Ceci indique une diminution globale des quantités des précipitations à Marrakech sur la période 1960 – 2005.

## F- Evolution périodique du nombre de jours frais et jours chaud :

Pour mieux illustrer l'évolution croissante déjà mentionnée du nombre constaté de jours frais et de jours chauds à Marrakech et confirmer encore le réchauffement constaté sur la période 1960 – 2005, nous avons représenté cette fois les fréquences par mois du nombre de jours ayant une température maximale supérieure à 30°C (jours chauds) et ceux ayant une température maximale inférieure à 15°C.

Ce travail a été fait sur trois périodes : 1960-1975, 1975-1990 et 1990-2005.

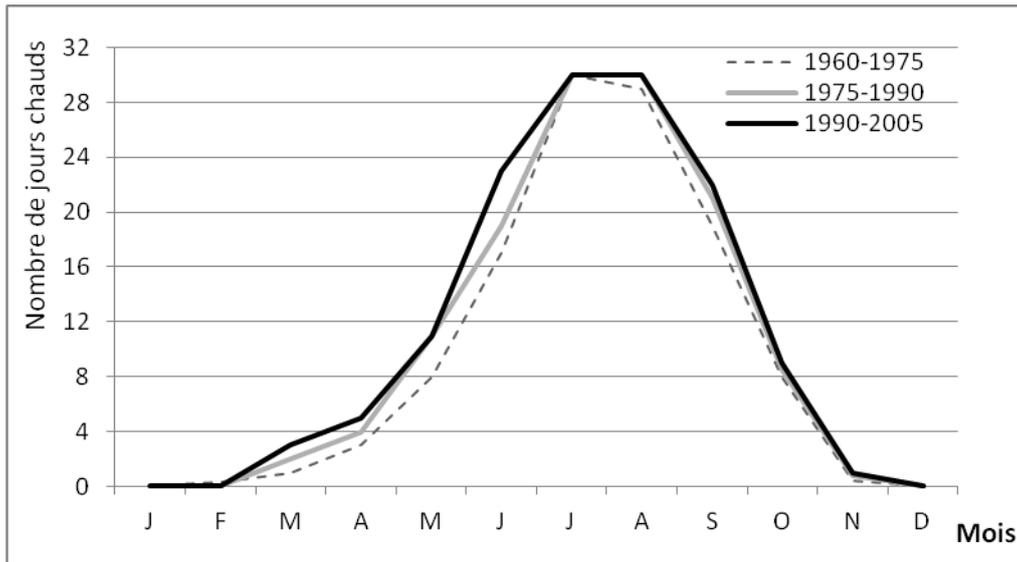


Figure 20 : Evolution du nombre de jours chauds à Marrakech

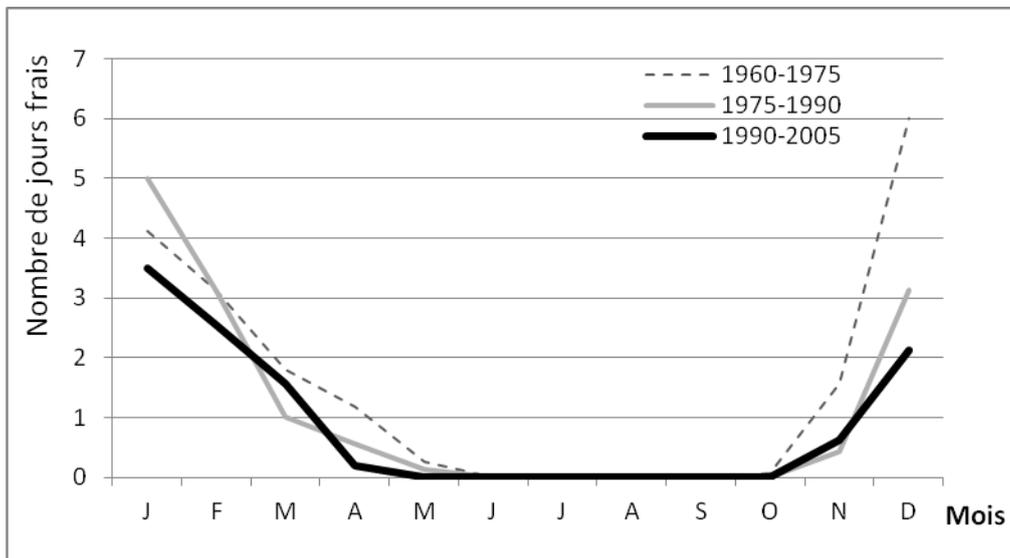


Figure 21 : Evolution du nombre de jours frais à Marrakech

La figure 20 montre que les nombres de jours chauds ont augmenté pour la plupart des mois de l'année surtout pour ceux du printemps, d'été, et d'automne.

Pour le nombre annuel des jours frais (figure 21), il est en baisse pour la plupart des mois, (hormis le mois de Mars). La hausse généralisée des températures au cours des dernières décennies a réduit le nombre de jours où les températures maximales sont inférieures à 15°C.

## **Chapitre IV :**

### **Les projections futures des changements climatiques à Marrakech**

#### **A. Présentation générale du modèle « SDSM »**

Le modèle SDSM (Statistical DownScaling Model) est un modèle basé sur des techniques statistiques de réduction d'échelle, développé par l'Agence Environnementale d'Angleterre.

L'intérêt majeur de la technique SDSM, est qu'elle permet de produire de façon rapide des séries quotidiennes des paramètres météorologiques (température moyenne, température maximale, température minimale, précipitations) pour l'ensemble de la période 2011-2099. Ceci facilite par la suite l'interprétation des tendances de la variabilité interannuelles de ces paramètres. Toutefois, cela n'est possible que pour les zones où les observations sont disponibles, homogènes et fiables.

Dans le présent travail les observations utilisées sont issues de la base des données de la Direction de la Météorologie Nationale. Les données à basse résolution sont issues du NCEP pour la calibration et de HadCM3 pour les scénarios de changements climatiques A2 et B2. Notons que la quantité de données à traiter nécessite des moyens de calcul assez puissants et des développements scientifiques importants.

La figure ci-dessous représente les opérations nécessaires pour la production des scénarios de changements climatiques à haute résolution. Ces opérations sont résumées principalement dans plusieurs étapes :

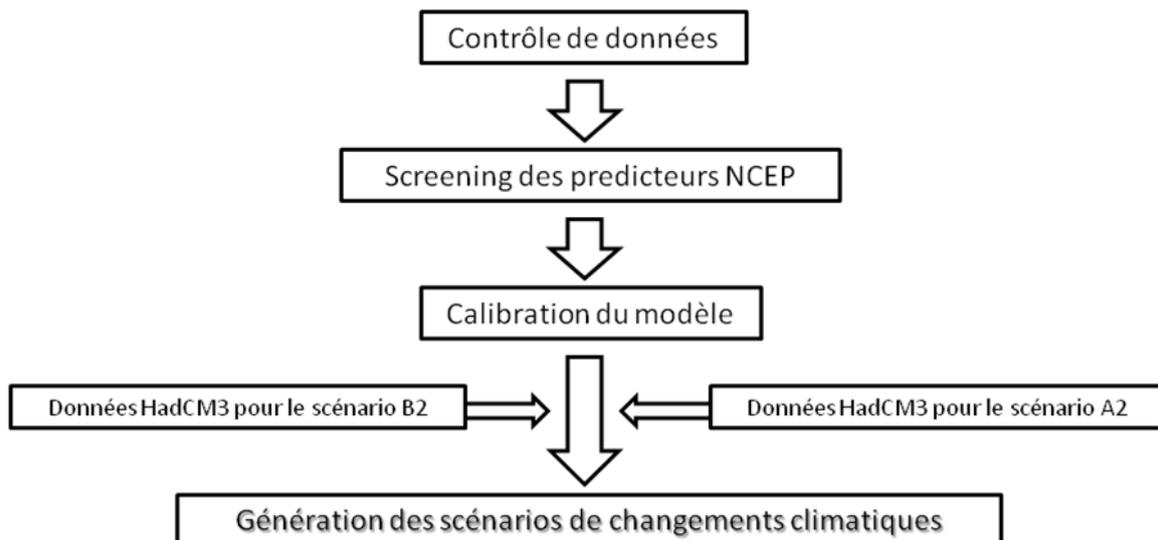


Figure 22 : Les principales étapes pour la production des scénarios de changements climatiques

- a. **Contrôle des données et transformations** : Cette première étape consiste à faire un dernier contrôle des données observées avant la calibration du modèle. Il est aussi parfois nécessaire de procéder à certaines transformations au niveau des prédictands (observations) et/ou prédicteurs (données de grande échelle NCEP ou HadCM3)
  
- b. **Screening des prédicteurs** : Le processus de décision statistique dans le choix d'un nombre optimal des prédicteurs reste une des étapes les plus difficiles vu que l'importance de ces derniers varie dans le temps. Cette étape de screening permet un choix statistique rigoureux des prédicteurs en se basant sur la variance expliquée et la corrélation entre prédictands et prédicteurs.

Variables	
Précipitations	Predictands
T max	
T min	
T moy	
Mean sea level pressure	Predicteurs
500 hpa geopotential height	
850 hpa geopotential height	
Near surface relative humidity	
Relative humidity at 500 hpa height	
Relative humidity at 850 hpa height	
Near surface specific humidity	
Geostrophic airflow velocity	
Vorticity	
Zonal velocity component	
Meridional velocity component	
Wind direction	
Divergence	

Tableau 3 : Les différentes variables utilisées par le modèle SDSM pour la génération des scénarios de changements climatique

- c. Calibration du modèle : La calibration du modèle consiste à calculer les paramètres de l'équation de régression multiple entre prédicand (température moyenne, température maximale, température minimale et précipitations) et prédicteurs (Ré-analyses NCEP) à l'aide d'un algorithme d'optimisation. Dans cette opération la structure du modèle est choisie entre trois types: mensuel, saisonnier ou annuel. Un choix est aussi fait entre un modèle inconditionnel et un modèle conditionnel. Si le modèle est inconditionnel, un lien direct est assumé entre le prédicand et les prédicteurs. Si le modèle est conditionnel, un processus intermédiaire existe entre le prédicand et les prédicteurs (par exemple : précipitations dépendent de l'occurrence des jours humides qui dépend à son tour de l'humidité et de la pression atmosphérique).

- d. Génération des scénarios de changements climatiques A2 et B2 à haute résolution : Après la calibration du modèle statistique de réduction d'échelle SDSM, les scénarios de changement climatiques A2 et B2 de grande échelle HadCM3 sont utilisés comme des inputs pour produire un ensemble de séries quotidiennes (dans notre étude 20 séries par paramètre et par scénario) pour le climat futur sur la période 2011-2099, à l'échelle de la station météorologique. Cette opération de génération des scénarios des changements climatiques A2 et B2 se fait séparément pour chaque scénario et pour chaque paramètre météorologique (température moyenne, température maximale, température minimale, précipitations).

## **B. Description des scénarios de changements climatiques A2 et B2 :**

Les projections sont calculées par les climatologues à partir de modèles atmosphériques qui transforment des hypothèses d'émissions de gaz à effet de serre (notamment, le CO<sub>2</sub>) en projections climatiques. Les modèles sont en fait des représentations simplifiées et manipulables de l'atmosphère. Ces projections climatiques se basent sur des représentations de ce que pourrait être le monde jusque l'an 2099. Les membres du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ont appelé scénarios ces représentations du futur, qui conduisent chacun à des trajectoires d'émissions mondiales de gaz à effet de serre très différentes. Il faut cependant bien comprendre que les scénarios ne sont ni des prédictions ni des prévisions. Les scénarios ne sont qu'une partie plausible des futurs possibles.

Dans cette étude, nous avons eu recours à deux scénarios de changements climatiques : un scénario A2 et un scénario B2. (Voir page 8)

## C. Evolution du climat futur à Marrakech (2011 - 2099)

Les projections pour le futur s'appuient désormais sur un plus grand panel de modélisations. Les simulations futures faites par le logiciel sur la base des scénarios A2 et B2 prévoient pour la fin du XXIème siècle, un réchauffement en toutes saisons.

### a. Tendances des précipitations annuelles

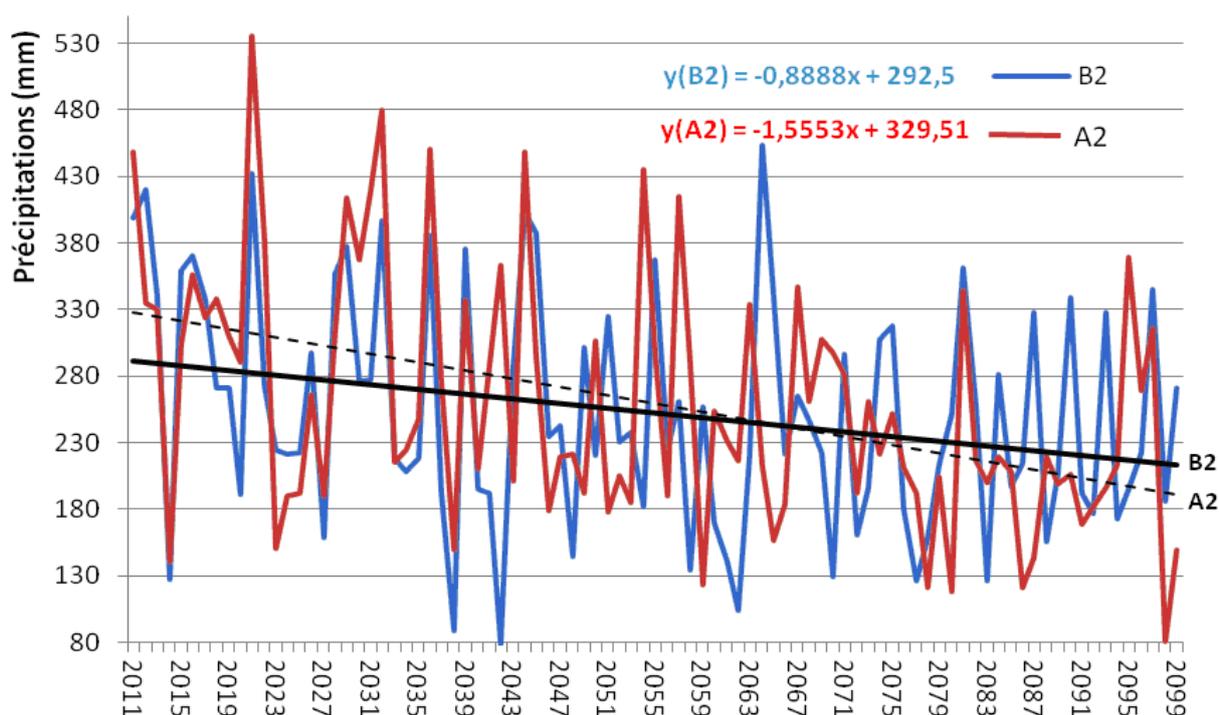


Figure 23 : Tendances précipitations annuelles prévues pour la période 2011 – 2099

Les deux scénarios climatiques A2 et B2 prévoient une diminution des précipitations annuelles dans le futur comme le présente les droites de tendances et leurs équations.

Selon le scénario le plus pessimiste, la pluviométrie annuelle baissera d'environ 70 mm d'ici 2050 et de 140 mm à l'horizon 2080. La baisse de précipitations est évidemment plus importante selon le scénario pessimiste A2.

## b. Tendances des températures moyennes annuelles

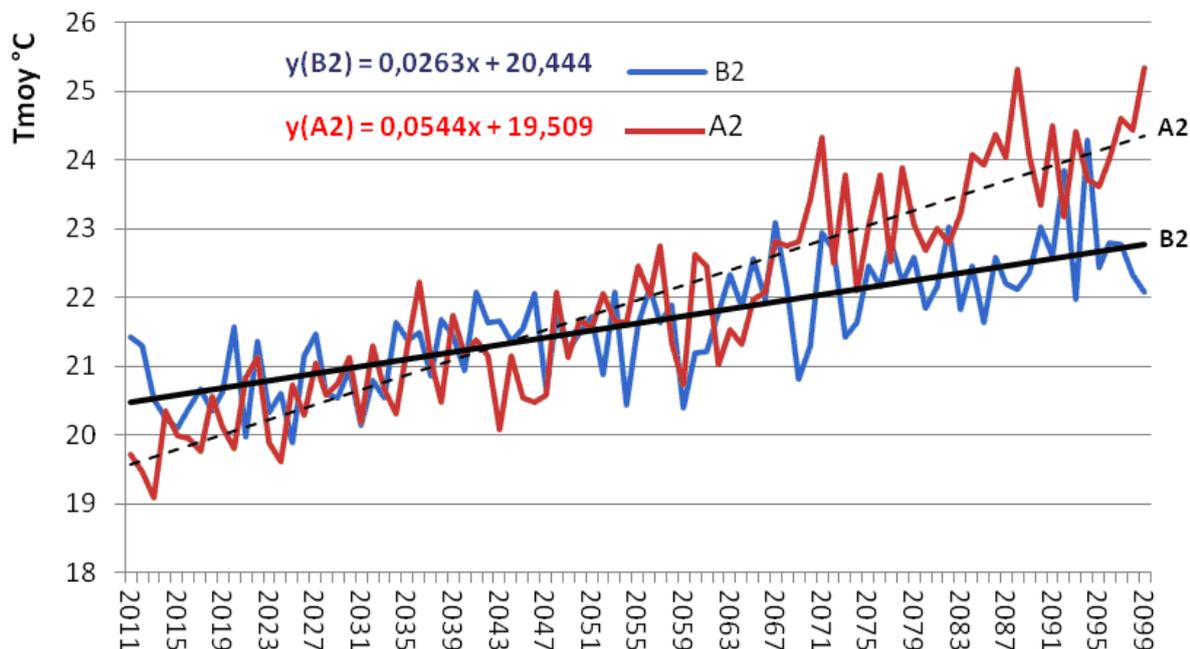


Figure 24 : Tendence des températures moyennes annuelles prévues par le modèle à Marrakech (2011 -2099)

La tendance au cours des 90 ans de prévisions est vers une importante augmentation des températures moyennes annuelles comme le montre la droite et l'équation de tendance de chaque scénario illustrées par la figure 24.

Le scénario A2 prévoit une augmentation d'environ 2.3°C à l'horizon 2050 et d'environ 4,7°C à l'horizon 2099.

### c. Tendence des températures annuelles maxima et minima

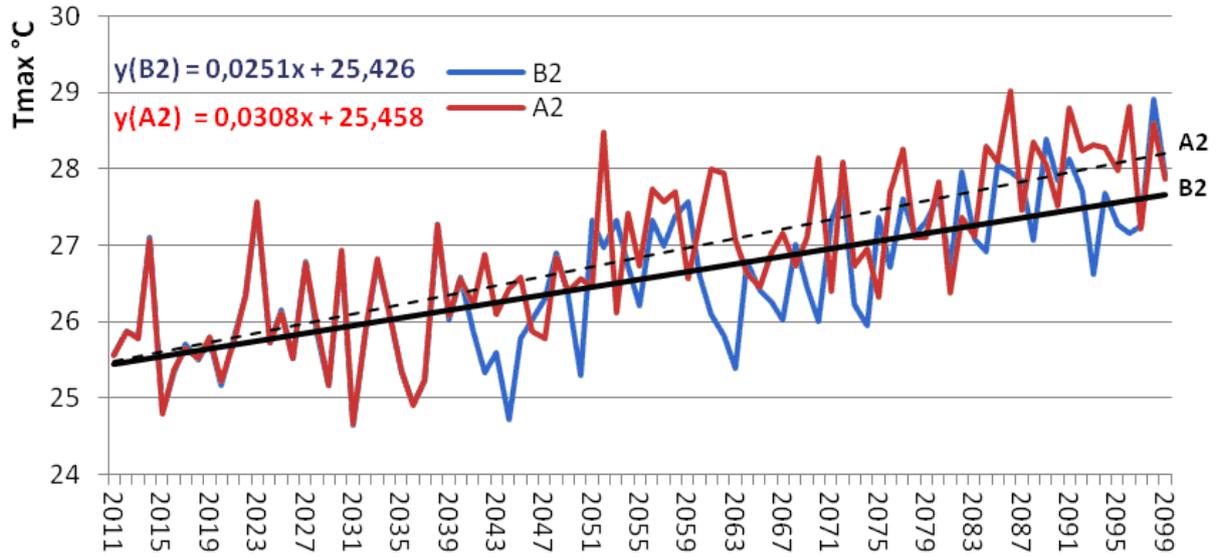


Figure 25 : Tendence des températures maximales annuelles prévues par le modèle à Marrakech (2011 – 2099)

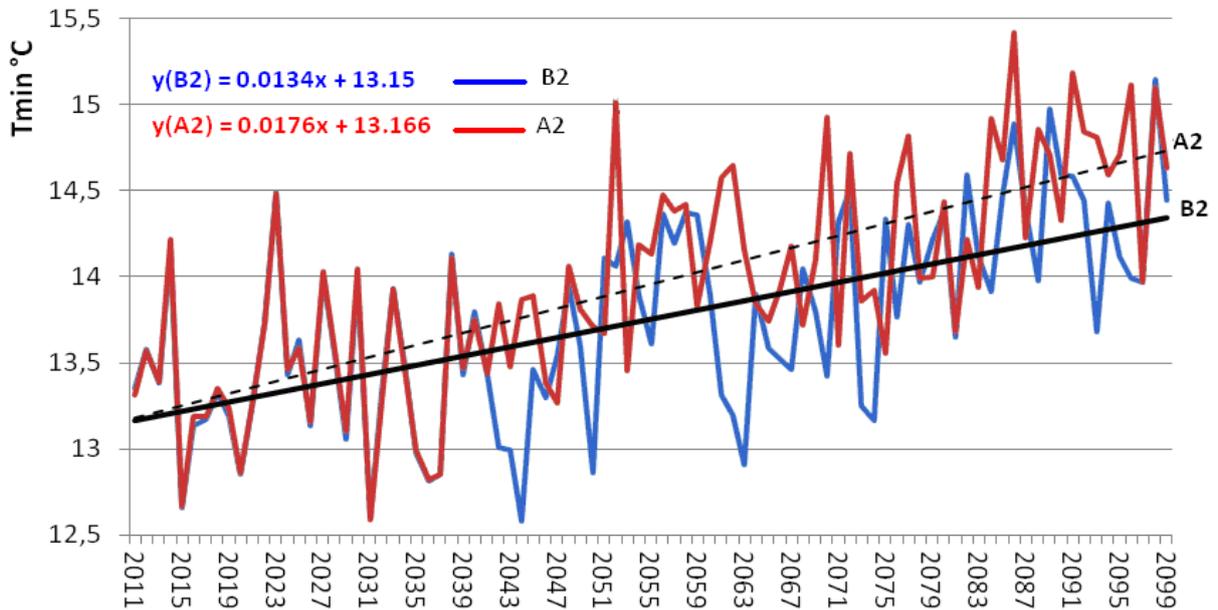


Figure 26 : Tendence des températures minimales annuelles prévues par le modèle à Marrakech (2011-2099)

Les deux pentes et les deux équations de la tendance des températures annuelles maxima et minima prévue par le modèle montrent une élévation continue dans le futur.

Le scénario le plus pessimiste (A2) prévoit une élévation d'environ 2,7°C à l'horizon 2099 pour les températures maximales annuelles, et d'environ 1,5°C pour les températures minimales annuelles.

Les projections climatiques sur le Maroc indiquent que l'aridité va progressivement augmenter en raison de la diminution de la pluviométrie et de l'augmentation de la température.

Il faut garder à l'esprit que les modèles climatiques prédisent mieux les moyennes que les valeurs extrêmes. Cela veut dire que, si en moyenne l'aridité va augmenter, certaines années peuvent malgré tout être sporadiquement très pluvieuses.

## Conclusion générale

De cette étude des températures et des précipitations de la ville de Marrakech, nous avons dégagé le caractère variable et irrégulier des deux paramètres, ceci à différents pas de temps mensuels, saisonniers et annuels. La variabilité est toutefois beaucoup plus marquée pour les précipitations que pour les températures.

Par ailleurs, l'analyse de l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes au cours de 46 ans d'observation a permis de constater une tendance à l'augmentation des trois paramètres. La tendance globale au réchauffement émerge donc des évolutions de ces températures. Quant aux précipitations, les hauteurs annuelles et mensuelles ont tendance à diminuer de 1960 à 2005. Les droites de tendance fléchissent légèrement en mettant en évidence une évolution progressive vers plus de sécheresse. Outre les données brutes, plusieurs indices climatiques ont montré ces évolutions vers le réchauffement et la sécheresse à Marrakech, notamment les indices des vagues de chaleur, de nombre annuel de jours chauds, des périodes de sécheresse...etc.

Nous avons enfin utilisé un modèle climatique d'élaboration de scénarios climatiques futurs. Après une phase de contrôle de données et de calibration, le logiciel a généré des scénarios de changements climatiques à Marrakech selon deux projections : une qui est pessimiste et une autre qui l'est moins. Dans les deux cas, la tendance au réchauffement est visible. Le premier scénario A2 prévoit même une augmentation des températures moyennes annuelles d'environ 5°C à l'horizon 2099.

Même constat de sécheresse est dégagé de la modélisation des précipitations annuelles ou le modèle projette une tendance à la baisse de plusieurs dizaines de millimètres par an.

Ces projections des changements climatiques auront sans doute des effets néfastes sur les ressources en eau et l'essor de l'agriculture qui participe grandement à l'économie nationale.

Des mesures urgentes sont nécessaires à entreprendre, tant à l'échelle mondiale qu'à l'échelle nationale, notamment la réduction de gaz à effet de serre, l'utilisation des énergies propres et renouvelables, la sensibilisation des populations et penser à des nouvelles adaptations à un climat plus chaud et plus sec, comme des cultures qui résistent mieux, des gestions optimales des eaux ou l'exploitation de l'énergie solaire dans divers secteurs économiques.

## Références bibliographiques :

Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu et J. P. Palutikof, éd., 2008: Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, p. 33-35.

El Ouali, A. Etude de vulnérabilité et d'adaptation du Maroc face aux changements climatiques, 2010, p. 8-9.

Berger, A., 1992. Le climat de la Terre: un passé pour quel avenir?, De Boeck Université, Bruxelles, 2000. p. 105-111.

GIEC, 2007: Changements climatiques : Contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. P. 3-18.

Babqiqi, A., Messouli M., Bounoua L., 2010. Développement des scénarios de changements climatiques à haute résolution au Maroc au 21ème siècle. p.2-7.

Amorce, L., 1999. Effet de serre, dégradations climatiques et contrats de plan., Lyon : Amorce. P. 27-30.

Ambrosi, Ph., Courtois, P., 2004. Impacts du changement climatique intégrée. Natures Sciences Sociétés, 2004. p. 375-378.

<http://www.ipcc.ch/> : site du GIEC (IPCC en anglais)

<http://www.unfccc.int> : Convention et protocole de Kyoto

<http://www.chooseclimate.org>: Modèle climatique interactif

<http://www.developpementdurable.com>: Environnement et développement durable

## Glossaire :

**GIEC : (en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)** est un organe intergouvernemental, qui a pour mission d'évaluer d'une façon méthodique les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au changement climatique d'origine humaine. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue.

**La Convention-cadre de Rio :** a été adoptée en 1992 par 154 États plus la Communauté européenne. Elle est entrée en vigueur le 21 mars 1994. En 2004, elle était ratifiée par 189 pays.

**Protocole de Kyoto :** est un traité international visant à la réduction des gaz à effet de serre, signé le 11 décembre 1997 à Kyoto, il est entré en vigueur le 16 février 2005 et a été ratifié à ce jour par 183 pays, à l'exception notable des États-Unis.

**NCEP : (National Centers for Environmental Prediction)** est un regroupement de centres nationaux spécialisés de prévisions météorologiques aux États-Unis. Ces centres émettent des cartes, des bulletins et aux types de guides pour divers centres locaux en météorologie, en hydrologie et en météorologie de l'espace.

**NCAR : (National Center for Atmospheric Research)** est un institut de recherche américain qui a comme mission d'explorer et comprendre notre atmosphère et ses interactions avec le Soleil, les océans la biosphère et l'homme.

**HadCM3 : (Hadley Centre Coupled Model, version 3)** est un couplé atmosphère-océan modèle de circulation générale (MCGAO) développée au Centre Hadley du Royaume-Uni . Il a été l'un des principaux modèles utilisés dans le troisième rapport d'évaluation du GIEC en 2001.