



HAL
open science

Vers une meilleure compréhension de l'évolution du climat actuel et ancien (2000 ans) dans le Sud-Ouest du Maroc : approche statistique, sédimentologique et géochimique (Cas du bassin de Tensift, de Souss-Massa et de la côte atlantique-Maroc)

Jawad El Hawari

► **To cite this version:**

Jawad El Hawari. Vers une meilleure compréhension de l'évolution du climat actuel et ancien (2000 ans) dans le Sud-Ouest du Maroc : approche statistique, sédimentologique et géochimique (Cas du bassin de Tensift, de Souss-Massa et de la côte atlantique-Maroc). Géographie. Université Sultan Moulay Slimane Béni Mellal (Maroc), 2022. Français. NNT : . tel-04596637

HAL Id: tel-04596637

<https://theses.hal.science/tel-04596637>

Submitted on 31 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Université Sultan
Moulay Slimane



Laboratoire Dynamique
des Paysages, Risques et
Patrimoine



Faculté des Lettres et des
Sciences Humaines,
Béni Mellal

Thèse de doctorat de l'Université Sultan Moulay Slimane

Centre Doctoral de la Faculté des
Lettres et des Sciences Humaines

Laboratoire :
Dynamique des Paysages, Risques et Patrimoine

Discipline : Géographie Physique

Vers une meilleure compréhension de l'évolution du climat actuel et ancien (2000 ans) dans le Sud-Ouest du Maroc : approche statistique, sédimentologique et géochimique

(Cas du bassin de Tensift, de Souss-Massa et de la côte atlantique-Maroc)

Thèse réalisée dans le cadre du projet « ECHO-PMARS2015-100 »

Présentée et soutenue publiquement

Par

Jawad EL HAWARI

Le : 31/05/2022

Thèse réalisée sous la direction de

Mohamed EL GHACHI

Membres du jury :

Mohamed EL GHACHI	FLSH - Université Sultan Moulay Slimane - Beni Mellal	Encadrant
Ahmed ALOUM	FLSH - Université Sultan Moulay Slimane - Beni Mellal	Examineur
Said ARIF	FLSH - Université Sultan Moulay Slimane - Beni Mellal	Examineur et Rapporteur
Abdelmajid ESAMI	FLSH - Université Hassan II - Mohammedia	Rapporteur
Ilham BOUIMETARHAN	FSA - Ait Melloul - Université Ibn Zohr - Agadir	Rapporteur

Remerciements

À la conclusion de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers de nombreuses personnes dont l'aide précieuse a rendu possible la réalisation de cette thèse.

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma reconnaissance au Professeur Mohamed El GHACHI, qui a eu la gentillesse de m'encadrer et de me faire confiance. Travailler à ses côtés a été une expérience enrichissante, et sa constante disponibilité, ses conseils et son soutien tout au long de l'élaboration de cette thèse ont été inestimables. Sa sympathie, sa gentillesse et ses qualités humaines ont été source d'inspiration. Je le remercie sincèrement pour sa patience et lui témoigne ma profonde gratitude pour ses années d'encadrement.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux membres du projet "ECHO" : les Professeurs du département de géographie à la FLSH de Béni-Mellal-Maroc, notamment le Pr. Yahia EL KHALKI, le Pr. Hanane REDDAD, le Pr. Mohamed El GHACHI et le Pr. Abdellatif HAFID, ainsi qu'aux Professeurs du Centre MURUM en Allemagne, le Pr. Ilham BOUIMETARHAN, le Pr. Martin KOELLING et le Pr. Jeroen GROENEVELD. Leur accueil chaleureux, leurs discussions enrichissantes et leur soutien inconditionnel ont été essentiels pour mener une partie de ce travail. Je les remercie infiniment pour leur disponibilité et leur amabilité.

Je souhaite adresser un grand merci aux responsables du projet "ECHO", le Pr. Ilham BOUIMETARHAN (MURUM-Allemagne) et le Pr. Hanane REDDAD (département de géographie-FLSH Béni-Mellal-Maroc).

Mes remerciements vont également au Pr. Martin KOELLING pour son expertise dans la mise en place de la technique "XRF" et à Jeroen GROENEVELD pour son travail continu au sein du laboratoire.

Je tiens à remercier les organismes qui ont fourni les données cruciales pour cette thèse : le Centre MURUM et l'Agence de bassin Hydraulique du Tensift et de Souss-Massa.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers le Professeur Lembaad Touria et le Pr. Halim pour leur précieuse aide et leurs encouragements.

Enfin, mes remerciements les plus sincères vont à mes parents, sans lesquels cette thèse n'aurait pas pu être réalisée. Leur encouragement et leur soutien constants tout au long de ma vie ont été inestimables. Ils ont été à mes côtés dans les moments difficiles, et je leur suis infiniment reconnaissant d'être les merveilleux parents qu'ils sont. Les mots ne suffisent pas à exprimer mes sentiments envers eux, et je prie Dieu de les récompenser. Je tiens également à remercier ma femme, mon frère Nour-Eddine et mes sœurs Bouchra et Fatiha pour leur soutien inconditionnel pendant cette période.

Je souhaite également remercier tous mes amis et collègues pour leur aide et pour avoir contribué à maintenir une atmosphère conviviale tout au long de ce parcours.

Jawad

Résumé

Le changement climatique actuel soulève des questions importantes concernant la dynamique des variations climatiques et leurs impacts potentiels sur notre planète. Dans ce contexte, le Maroc, en raison de sa position géographique, demeure l'un des pays les plus vulnérables aux effets néfastes du changement climatique. Ce phénomène est devenu une préoccupation majeure pour les autorités marocaines, tout comme pour le reste du monde.

Le choix de notre domaine d'étude s'explique par le fait que le Sud-Ouest du Maroc a également subi des événements climatiques extrêmes, tels que la désertification, la succession d'années de sécheresse, la dégradation des terres et les tensions socio-économiques découlant du changement climatique. Par ailleurs, les études sur le climat marocain et les changements climatiques passés se sont principalement concentrées sur les régions du Nord du pays, à l'inverse, les études sur le Sud-Ouest du Maroc restent rares et largement inconnues. Notre zone d'étude, qui englobe le bassin versant de Tensift, de Souss-Massa et la côte atlantique marocaine entre 30°-31°N et 10°-11°O, vise à combler cette lacune.

Cette étude a été entreprise dans le but de contribuer à une meilleure compréhension du climat actuel, de sa variabilité saisonnière et interannuelle sur une période de quarante-huit ans, ainsi que de l'extraction des données relatives aux événements climatiques extrêmes dans ces deux grandes régions du Maroc. De plus, nous cherchons à retracer l'histoire climatique du Sud-Ouest du Maroc sur les deux derniers millénaires, fournissant ainsi des informations sur les changements climatiques et océaniques survenus au cours de cette période. Cette étude met également en lumière l'importance des outils utilisés pour étudier le climat, en particulier dans les régions où il est difficile d'obtenir des données précises sur les éléments climatiques.

Notre approche dans cette étude repose sur trois piliers : une analyse statistique basée sur des séries climatiques reconstruites à partir des données enregistrées par les stations de mesure sur une période de 1968 à 2015, une analyse sédimentologique et géochimique basée sur des indicateurs (proxy) issus d'enregistrements marins et continentaux.

L'étude de l'évolution climatique actuelle montre que les zones d'étude présentent des climats sensiblement similaires, avec une tendance générale à la hausse des températures extrêmes et à la diminution des événements froids, tant en saison chaude que froide. De plus, l'analyse des indices de sécheresse a révélé des corrélations statistiquement significatives avec l'évolution des températures et des précipitations dans ces régions.

En outre, cette recherche apporte de nouvelles informations sur les changements climatiques passés dans le Sud-Ouest du Maroc. L'analyse géochimique des sédiments de la carotte sédimentaire GeoB8601-3, prélevée au large du Maroc, témoigne d'une augmentation abrupte de l'humidité entre ± 1191 et 1034 ans avant le présent (BP). Cette période peut être considérée comme une transition de l'aridité à l'humidité dans le Sud-Ouest du Maroc, marquée par une augmentation des ruissellements continentaux entrecoupés de brèves périodes de sécheresse, reflétées par les fluctuations de l'apport terrigène au large du Sud-Ouest du Maroc. Cette

variabilité climatique observée dans nos données est cohérente avec les enregistrements paléoclimatiques et paléohydrologiques de notre zone d'étude.

En conclusion, cette étude a produit des résultats significatifs à l'échelle régionale et locale. Sur la base des preuves présentées, nous sommes en mesure de classer le Sud-Ouest du Maroc en fonction de sa vulnérabilité climatique passée et d'évaluer sa sensibilité/résilience aux impacts futurs. Par conséquent, la gestion et l'atténuation de la dégradation des terres et des écosystèmes dans ces régions doivent tenir compte de l'histoire du changement climatique pour établir des données de référence et évaluer la résilience de ces écosystèmes.

Mots clés : Sud-Ouest du Maroc, Climat actuel et passé, Sédiments continentaux et marins, Analyse statistique et géochimique, Apports terrigènes, Changement climatique.

Abstract

The current climate change raises significant questions regarding the dynamics of climate variations and their potential impacts on our world. In this context, Morocco, due to its geographical location, remains one of the countries most vulnerable to the adverse effects of climate change. This phenomenon has undoubtedly become a major concern for the Moroccan authorities, as well as for regions worldwide.

The choice of our study area is justified by the fact that the Southwest of Morocco has also experienced extreme climate events, such as desertification, a series of drought years, land degradation, and socio-economic stress resulting from climate change. Moreover, research on Moroccan climate and past climate changes has mainly focused on the northern regions of the country, leaving the Southwest of Morocco largely unexplored. Our study area, which encompasses the Tensift, Souss-Massa watersheds and the Moroccan Atlantic coast between 30°-31°N and 10°-11°W, aims to fill this gap.

This study was conducted with the aim of contributing to a better understanding of the current climate, its seasonal and interannual variability over a period of forty-eight years, and the extraction of data related to extreme climate events in these two major regions of Morocco. Furthermore, we seek to trace the climatic history of Southwest Morocco over the past two millennia, thus providing insights into climate and oceanic changes over this period. This study also highlights the importance of the tools used to study climate, especially in regions where obtaining precise climate data is challenging.

Our approach in this study relies on three pillars: a statistical analysis based on climate series reconstructed from data recorded by measurement stations from 1968 to 2015, a sedimentological and geochemical analysis based on proxy indicators from marine and continental records.

The study of current climatic evolution shows that the study areas exhibit significantly similar climates, with a general trend of increasing extreme temperatures and decreasing cold events, both in the hot and cold seasons. Furthermore, the analysis of drought indices has revealed statistically significant correlations with temperature and precipitation trends in these regions.

Additionally, this research provides new insights into past climate changes in Southwest Morocco. Geochemical analysis of sediment cores from the GeoB8601-3 sediment core, retrieved off the coast of Morocco, documents a sharp increase in humidity between ± 1191 and 1034 years before the present (BP). This period can be considered a transition from aridity to humidity in Southwest Morocco, characterized by an increase in continental runoff interrupted by brief dry periods, as clearly reflected in terrigenous input fluctuations off the Southwest coast of Morocco. This climatic variability observed in our records is more representative and consistent with paleoclimatic and paleohydrological records within our study area.

In conclusion, this study has yielded significant results at both regional and local scales. Based on the evidence presented in this study, it is possible to classify Southwest Morocco based on its past climate vulnerability and assess its sensitivity/resilience to future impacts. Consequently, the

management and mitigation of land degradation and ecosystems in these regions must take into account the history of climate change to establish baseline data and assess ecosystem resilience.

Keywords: Southwest Morocco, Current and Past Climate, Continental and Marine Sediments, Statistical and Geochemical Analysis, Terrigenous Inputs, Climate Change.

يثير تغير المناخ اليوم تساؤلات عديدة حول دينامية التغيرات المناخية والآثار التي يمكن أن تحدثها على كوكبنا. في هذا السياق، لا يزال المغرب، نظرا لموقعه الجغرافي، واحدا من أكثر البلدان تعرضا لآثار التغير المناخي. ومما لا شك فيه أيضا أن هذا الأخير أصبح مصدر قلق كبير للسلطات العامة بالمغرب كما هو الحال في جميع مناطق العالم.

اختيار منطقة الدراسة مبرر بحقيقة أن جنوب غرب المغرب شهد أيضاً أحداثاً مناخية متطرفة، مثل التصحر وتوالي سنوات الجفاف وتدهور الأراضي والضغط الديمغرافي والاقتصادي نتيجة التغير المناخي. علاوة على ذلك، ركزت العديد من الدراسات السابقة حول المناخ المغربي والتغيرات البيئية بشكل رئيسي على المناطق الشمالية للبلاد، على العكس من ذلك، لا تزال الدراسات حول جنوب-غرب المغرب قليلة وغير معروفة إلى حد كبير. تتكون منطقة الدراسة التي هي جزء من جنوب-غرب المغرب من جزأين، جزء قاري (الحوض النهري لتانسيفت وسوس ماسة) وجزء بحري (الساحل الأطلسي المغربي بين 10° - 11° O $^{\circ}$ 31- $^{\circ}$ 30N).

تم انجاز هذه الدراسة بهدف المساهمة في فهم أفضل للمناخ الحالي، وتقلباته الموسمية والسنوية لمدة ثمانية وأربعين عاما، واستخراج البيانات المتعلقة بالظواهر المناخية المتطرفة في هاتين المنطقتين الرئيسيتين في المغرب. بالإضافة إلى ذلك، سعينا إلى تتبع تاريخ المناخ في جنوب غرب المغرب على مدى آخر ألفي عام، مما يوفر بالتالي رؤى حول التغيرات المناخية والمحيطية خلال هذه الفترة. تسلط هذه الدراسة أيضاً الضوء على أهمية الأدوات المستخدمة لدراسة المناخ، وخصوصاً في المناطق حيث من الصعب الحصول على بيانات دقيقة حول العناصر المناخية.

ركزت المنهجية المعتمدة في هذه الدراسة على ثلاثة، محركات رئيسية: محرك إحصائي، باستخدام سلسلة مناخية من البيانات التي سجلتها محطات القياس ما بين 1968-2015 بمجال الدراسة، ومحرك يعتمد على تحليل المؤشرات والعناصر الجيوكيميائية للتوضعات الرسوبية البحرية والقارية.

تظهر دراسة تغير المناخ الحالي أن مناطق الدراسة لها مناخات متشابهة إلى حد كبير. ويلاحظ أن الاتجاهات العامة نحو زيادة درجات الحرارة القصوى وانخفاض معدل الفترات الباردة. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت دراسة مؤشرات الجفاف أيضا روابط ذات دلالة إحصائية مع تطور النظم الحرارية وهطول الأمطار داخل مناطق الدراسة.

وبالإضافة إلى كل ذلك، يوفر هذا العمل معلومات جديدة عن تغير المناخ في الماضي في جنوب-غرب المغرب. يوثق التحليل الجيوكيميائي للرواسب من موقع GeoB8601-3 المستخرجة من سواحل المغرب زيادة حادة في الرطوبة بين سنوات 1191 و1034 قبل الحاضر. يمكن التعرف على هذه الفترة كفترة انتقالية (جافة/رطبة) في جنوب-غرب المغرب. علاوة على ذلك، يمكن أن نلاحظ أن هذه الفترة تميزت بزيادة في الجريان المائي السطحي القاري، وهو ما يفسر من خلال تزايد كمية التوضعات الرسوبية قبالة سواحل جنوب-غرب المغرب خاصة عند مصب كل من واد سوس وواد تانسيفت وروافدهما. ويمكن تفسير ذلك أيضا بالتأثيرات المحلية المرتبطة بالطبيعية الجبلية للمنطقة، حيث أن هذه الرواسب تنشأ من المحيط وتستمد الرواسب من كل من جبال الأطلس والصحراء. وتجدر الإشارة هنا إلى أن التقلبات المناخية في الماضي والتي لوحظت في سجلاتنا خلال هذه الدراسة هي أكثر تعبيراً وتتماشى أيضاً مع العديد من السجلات المناخية القديمة المنجزة حول مجال دراستنا.

في الختام، تقدم هذه الدراسة نتائج مهمة على الصعيدين الإقليمي والمحلي. واستناداً إلى الأدلة المقدمة في هذه الدراسة، من الممكن تصنيف جنوب-غرب المغرب وفقاً للشاشة المناخية في الماضي، ومن تم تقييم الحساسية/المرونة للتأثيرات المستقبلية. ولذلك، فإن إدارة وتخفيف تدهور الأراضي والنظم الإيكولوجية في هذه المناطق، يجب أن تأخذ بعين الاعتبار، التاريخ الطويل لتغير المناخ من أجل وضع بيانات صحيحة عن النظم الإيكولوجية ومدى قدرة هذه النظم الإيكولوجية على الصمود.

كلمات مفتاحية: جنوب غرب المغرب، المناخ الحالي والماضي، الرواسب البرية والبحرية، التحليل الإحصائي والجيوكيميائي، الإسهامات القارية، التغير المناخي".

Liste des abréviations

ECHO : Environmental-Climate-Human interactions in Southern Morocco
PMARS : Programme Morocco-allemand pour la recherche scientifique
XRF : Fluorescence des Rayons X
ICP : Spectrométrie à Plasma à couplage Inductif
CCNUCC : Convention Cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques
GIEC : Groupe des Experts Intergouvernementaux sur l'Évolution du Climat
OMM : Organisation Météorologique Mondiale
SST : Températures de la surface marine (ou Sea Surface Temperature)
ABHT : Agence du Bassin Hydraulique de Tensift
ABHSM : Agence du Bassin Hydraulique de Souss-Massa
AMP : Les Anticyclones Mobiles Polaires
DRAMH : Direction Régional Agricole Marrakech-El Haouz
ORMVASM : Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Souss-Massa
HCP : Haut-Commissariat au Plan
GES : Gaz à Effet de Serre
NAO: North Atlantic Oscillation
ENSO: El Niño Southern Oscillation
SOI: Southern Oscillation Index
WeMOI: Western Mediterranean Oscillation Index
ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale
P.D.A.I.R.E : Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau
CMP : Coefficient Mensuel de Précipitation
RN : Indice de Rapport à la Normale des précipitations
Em : Indice de l'Écart à la Moyenne
SPI : Indice normalisé (Standardisé) des Précipitations
MO : Méditerranéen Oscillation

Avant-propos

Cette thèse, intitulée « Vers une meilleure compréhension de l'évolution du climat actuel et ancien (2000 ans) dans le Sud-Ouest du Maroc : Approche statistique, sédimentologique et géochimique - Cas du bassin de Tensift, de Souss-Massa et de la côte Atlantique marocaine », a été réalisée au sein du Laboratoire de Dynamique des Paysages, des Risques et du Patrimoine, au département de géographie de l'Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Béni-Mellal. Elle a été supervisée par Monsieur Mohamed El Ghachi, Professeur à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Béni Mellal. Une partie de cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet ECHO, intitulé « Environmental-Climate-Human Interactions in Southern Morocco during the past 2000 years : inferences from high-resolution marine records ». Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme de coopération maroco-allemand pour la recherche scientifique PMARS III, financé par le BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung - Ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche en Allemagne)."

Table des matières

Remerciements.....	1
Résumé.....	2
Abstract.....	4
ملخص.....	6
Liste des abréviations	7
Avant-propos.....	8
Table des matières.....	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	14
I. Contexte de l'étude : Projet ECHO et stage à l'université de Brême.....	18
II. Présentation du domaine d'étude.....	18
III. Problématique de l'étude.....	21
IV. Méthodes et approches de travail.....	22
V. Données utilisées.....	24
VI. Les difficultés spécifiques à ce travail.....	25
VII. Les objectifs de la thèse.....	26
VIII. Les hypothèses de la thèse.....	27
IX. Synthèse sur les études antérieures en climatologie et en paléoclimatologie dans le domaine d'étude.....	27
X. Mots clés de la thèse.....	28
XI. La structure de la thèse.....	29

PARTIE 1 : ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LE DOMAINE D'ÉTUDE

Introduction.....	33
-------------------	----

CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES DEUX BASSINS VERSANTS ET DE LA CÔTE ATLANTIQUE MAROCAINE

Introduction.....	35
Axe 1 : Les caractéristiques générales du domaine continental : le bassin versant de Tensift et de Souss-Massa.....	36
I. Contexte général des deux bassins versants.....	38
1. Le bassin versant de Tensift.....	38
2. Le bassin versant de Souss-Massa	39
II. Aperçu morphométriques des deux bassins versants : Tensift et Souss-Massa.....	40
1. Le bassin versant de Tensift.....	40
2. Le bassin versant de Souss-Massa.....	42
II. L'organisation du réseau hydrographique dans les deux bassins versants.....	45
1. Dans le bassin versant de Tensift.....	45
2. Dans le bassin versant de Souss-Massa.....	47
IV. Les caractéristiques géologiques des deux bassins versants.....	49
1. Le bassin versant de Tensift.....	49
2. Le bassin versant de Souss-Massa.....	51
a. Dans le versant Nord de l'Anti-Atlas	51
c. Dans la plaine du Souss	51
V. La végétation dans les deux bassins versants.....	53
1. Dans le bassin versant de Tensift.....	53
2. Dans le bassin versant de Souss-Massa.....	55
VI. Contexte climatique général des deux bassins versants.....	57

1. Contexte climatique général dans le bassin versant du Tensift.....	57
2. Contexte climatique général dans le bassin versant de Souss-Massa.....	58
Axe 2 : Description générale du domaine marin : la côte atlantique au Sud-Ouest du Maroc.....	59
I. La côte atlantique marocaine : localisation et présentation.....	59
1. La topographie du plateau continental.....	62
2. La bathymétrie.....	63
3. La circulation océanique.....	63
II. Aperçu sur les courants généraux de la côte atlantique marocaine.....	65
1. Courant des Canaries.....	65
2. Courants parallèles au trait de côte.....	66
Axe 3 : Les caractéristiques humaines des deux bassins versants.....	70
I. Le cadre administratif et démographique du bassin de Tensift.....	70
II. Aperçu sur les activités socio-économiques dans le bassin versant de Tensift.....	71
1. Agriculture et Élevage.....	71
2. Activité touristique.....	72
III. Contexte administratif et démographique du bassin de Souss-Massa.....	72
IV. Potentialités économiques dans le bassin de Souss-Massa.....	74
1. L'agriculture.....	74
2. Pêches maritimes.....	74
3. Activité touristique.....	75
Conclusion.....	77
 CHAPITRE 2 : COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT CLIMATIQUE DU PASSÉ À L'ACTUEL : CADRE CONCEPTUEL, THÉORIQUE ET MÉTHODOLOGIQUE	
Introduction.....	79
Axe 1 : Comprendre l'évolution du climat actuel : Cadre théorique.....	80
I. La notion de la variabilité climatique au changement climatique.....	80
1. Définition du Changement Climatique.....	80
2. Définition de la variation climatique.....	81
II. Aperçu sur l'évolution du climat actuel à l'échelle globale.....	82
III. L'évolution des extrêmes climatiques actuels à l'échelle globale.....	84
IV. Le point sur l'évolution du climat actuel à l'échelle du Maroc.....	85
1. Caractérisation de la variabilité climatique récente au Maroc.....	86
2. L'évolution des changements climatiques récents observés au Maroc.....	86
3. Les principaux indices climatiques affectant le Maroc.....	87
Axe 2 : Enseignements scientifiques sur les changements climatiques passés.....	91
I. Aperçu sur les changements climatiques au cours de l'holocène.....	91
1. Le contexte climatique général depuis les derniers 20 000 ans.....	93
2. Le changement climatique au cours des derniers 2000 ans.....	94
II. Généralités sur les principales causes des changements climatiques de l'holocène.....	94
1. Le forçage orbital.....	94
2. Le forçage solaire.....	95
3. Le forçage volcanique.....	96
Axe 3 : Aperçu sur les méthodes d'observation du climat passé.....	97
I. Généralité sur les indices des variations climatiques passées : les archives du climat.....	97
1. Archives naturelles continentales.....	98
2. Archives naturelles marines.....	99
3. Archives glaciaires.....	101

II. Les enregistrements marins : en tant qu'archive palé-océanographique et paléoclimatiques.....	102
1. La géochimie marine : les assemblages des foraminifères.....	103
2. La palynologie.....	105
Axe 4 : Matériels et méthodes adoptés dans cette thèse.....	107
I. Matériels et méthodes adoptés pour l'étude du climat récent (variabilité climatique).....	107
1. Les stations climatique.....	107
II. Matériels et méthodes adoptés pour l'étude paléoclimatique.....	109
1. Présentation du matériel d'étude.....	113
2. Techniques et méthodes d'analyses utilisées (méthode XRF et Mg/Ca)	116
3. Contexte technique et analytique de la méthode Mg/Ca.....	118
4. La détermination de paléotempératures de l'eau de mer.....	119
III. Procédure de préparation et nettoyage des échantillons de foraminifères.....	122
1. contexte analytique de la méthode Mg/Ca.....	122
2. Extraction des argiles	124
3. Extraction de la matière organique	124
4. Attaque à l'acide faible	125
5. Dissolution	126
6. Détermination du Mg/Ca de la calcite des foraminifères par la technique ICP-AES.....	127
IV. Méthode de datation : Modèles d'âge de la carotte 8601-3 adopté.....	127
Conclusion.....	129
Conclusion de la première partie.....	130

PARTIE 2 : LE FONCTIONNEMENT CLIMATIQUE ACTUEL DANS LA ZONE D'ÉTUDE (1968-2015) : COMPRÉHENSION ET ANALYSE

Introduction.....	132
-------------------	-----

CHAPITRE 1 : LES DONNÉES CLIMATIQUES : PRÉSENTATION DES STATIONS ET CRITIQUES DES DONNÉES

Introduction.....	134
Axe 1 : présentation des stations retenues.....	135
I. Présentation des stations pluviométriques retenus.....	135
II. Présentation des stations thermométriques retenus.....	135
III. Le choix des stations étudiées.....	136
IV. Le choix de la chronique étudiée.....	137
Axe 2 : critiques et homogénéisations des données climatiques.....	139
V. Le comblement des lacunes.....	139
VI. Analyse statistique d'homogénéité pluviométrique.....	140
1. Méthode de « CUSUM »	141
2. Méthodes statistiques utilisées.....	144
3. Interprétation des résultats des tests de rupture des stations du bassin versant de Tensift..	146
4. Interprétation des résultats des tests de rupture des stations du bassin versant de Souss-Massa.....	148
Conclusion.....	152

CHAPITRE 2 : MISE AU POINT SUR LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE RÉCENTE DES BASSINS DE TENSIFT ET DE SOUSS-MASSA (1968-2015)

Introduction.....	154
Axe 1 : les caractéristiques pluviométriques des bassins de Tensift et de Souss-Massa.....	155

I. Étude de l'évolution du climat récent dans les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa.....	155
1. Spatialisation des précipitations pluviométriques annuelles dans le domaine d'étude.....	155
2. Les caractéristiques pluviométriques des bassins versants de Tensift et de Souss-Massa.....	156
Axe 2 : les caractéristiques thermiques des bassins de Tensift et de Souss-Massa.....	165
I. La variabilité de la température dans le bassin versant de Tensift.....	165
1. La température à l'échelle annuelle dans le bassin versant de Tensift.....	166
2. La température à l'échelle mensuelle dans le bassin versant de Tensift.....	166
II. La variabilité de la température dans le bassin versant de Souss-Massa.....	167
1. La température à l'échelle annuelle dans le bassin versant de Souss-Massa.....	167
2. La température à l'échelle mensuelle dans le bassin versant de Souss-Massa.....	168
Axe 3 : Contribution à l'étude du bilan hydrique des bassins de Tensift et de Souss-Massa.....	169
I. Bilan hydrique : Estimation de l'évapotranspiration (ETP et ETR)	170
II. Évapotranspiration : Aperçu globale.....	170
1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	171
2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	172
III. Interprétation des résultats du bilan hydrique.....	172
Conclusion.....	176

CHAPITRE 3 : LES EXTRÊMES CLIMATIQUES DANS LES BASSINS DE TENSIFT ET DE SOUSS-MASSA : EXTRACTION, ANALYSE DE LA SÈCHERESSE CLIMATIQUE ACTUELLE

Introduction.....	178
Axe 1 : Caractérisation des occurrences de sécheresse dans les bassins de Tensift et de Souss-Massa.....	179
I. Généralités sur la sécheresse au Maroc.....	179
II. Les indices de la sécheresse utilisés.....	180
1. Indice de Rapport à la normale des précipitations (RN).....	181
2. Indice de l'écart à la moyenne (Em)	181
3. Indice normalisé (Standardisé) des précipitations (SPI).....	182
III. Analyse de la variabilité et calcul des indices de la sécheresse.....	183
IV. Analyse de la sécheresse annuelle dans le bassin versant de Tensift.....	183
1. Indice de rapport à la normale des précipitations (RN) des stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna.....	183
2. L'écart à la moyenne pour les trois stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna.....	184
3. L'indice de SPI des trois stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna	187
V. Analyse de la sécheresse annuelle dans le bassin versant de Souss-Massa.....	187
1. Indice de rapport à la normale des précipitations (RN) des trois stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir.....	187
2. Indice de l'écart à la moyenne des stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir.....	188
3. L'indice de SPI des trois stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir.....	190
Axe 2 : Corrélations des modes de téléconnexion de l'hémisphère nord avec l'indice de sécheresse (SPI) au sud-ouest du Maroc.....	192
I. Identification des modes de téléconnexion étudiés.....	193
II. L'oscillation Nord Atlantique (NAO)	193
1. Oscillation de la Méditerranée occidentale (WeMOI).....	194
2. Indice d'oscillation australe (SOI)	195
III. Corrélation et analyse de la variabilité des indices climatiques (modes de téléconnexion) en relation à l'indice de précipitations standardisé (SPI).	196

1. Bassin versant de Souss-Massa.....	197
2. Bassin versant de Tensift.....	199
Axe 3 : Le domaine d'étude face aux changements climatiques.....	201
I. L'impact des changements climatiques sur les secteurs socio-économiques dans le bassin versant du Tensift.	202
II. L'impact des changements climatiques sur les secteurs socio-économiques dans le bassin de Souss-Massa.....	203
III. La côte atlantique Marocaine et le défi du changement climatique.....	205
Conclusion.....	207
Conclusion de la deuxième partie.....	208

**PARTIE 3 : LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU COURS DES DEUX DERNIERS
MILLÉNAIRES AU SUD-OUEST DU MAROC**

Introduction.....	211
-------------------	-----

CHAPITRE 1 : APPORT DE L'ÉTUDE GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS DE LA SURFACE CONTINENTALE ET MARINE DU DOMAINE D'ÉTUDE : CARTOGRAPHIE ET ANALYSE

Introduction.....	213
-------------------	-----

Axe 1 : Les bassins de Tensift et de Souss-Massa : analyse de la variation géochimique spatiale et temporelle des sédiments de surface continentaux.....

I. La répartition spatiale des éléments majeurs et traces dans les sédiments continentaux.....	215
1. Échantillon ECHO 1-1.....	215
2. Échantillon ECHO 1-2.....	216
3. Échantillon ECHO 2-1.....	216
4. Échantillon ECHO 2-2.....	217
5. Échantillon ECHO 2-3.....	217
6. Échantillon ECHO 2-4.....	218
7. Échantillon ECHO 3-1.....	218
8. Échantillon ECHO 3-3.....	219
9. Échantillon ECHO 3-4.....	219

Axe 2 : La côte atlantique Marocaine : analyse de la variation géochimique spatiale et temporelle des sédiments de surface marins.....

I. La répartition spatiale des éléments majeurs et traces dans les sédiments marins.....	222
1. Échantillon GéoB8606-2.....	222
2. Échantillon GéoB8607-2.....	222
3. Échantillon GéoB8604-3.....	223
4. Échantillon GéoB8601-3.....	223
5. Échantillon GéoB6009-1.....	224
6. Échantillon GéoB6011-2.....	224
7. Échantillon GéoB4210-2.....	225
8. Échantillon GéoB6010-1.....	225

Conclusion du chapitre 6.....	230
-------------------------------	-----

CHAPITRE 2 : EXPLICATION ET INTERPRÉTATION DES ÉLÉMENTS GÉOCHIMIQUES DES SÉDIMENTS DE LA SURFACE MARINS AU SUD-OUEST DU MAROC : SIGNIFICATIONS CLIMATIQUES

Introduction.....	232
-------------------	-----

Axe 1 : Généralités sur la distribution des sédiments marins : présentation et explication.....	233
I. Les sources des sédiments terrigènes au large des côtes au sud-ouest du Maroc.....	233
1. Les apports fluviaux.....	233
2. Les apports éoliens.....	234
II. Généralités sur la distribution des sédiments marins.....	236
Axe 2 : Analyse et interprétation des composants géochimiques en tant qu'indicateur du climat terrestre au sud-ouest du Maroc.....	237
I. Distribution des éléments géochimiques en tant que données indirectes du climat terrestre au sud-ouest du Maroc.....	237
II. Les rapports chimiques des sédiments marins représentent un autre traceur des apports terrestres.....	243
1. Distribution de fer/calcium (Fe/Ca) et potassium/calcium (K/Ca)	243
2. Distribution de potassium/aluminium (K/Al)	245
3. Distribution de titane/aluminium (Ti/Al)	245
4. Distribution de silicium/aluminium Si/Al.....	246
Conclusion du chapitre 7.....	250
 CHAPITRE 3 : CONTRIBUTION À LA RECONSTITUTION DU CLIMAT DES DEUX DERNIERS MILLÉNAIRES AU SUD-OUEST DU MAROC	
Introduction.....	252
Axe 1 : La reconstitution des caractéristiques paléoclimatiques au sud-ouest du Maroc...253	253
I. Matériels et méthodes de ce travail.....	253
II. Les éléments géochimiques en tant qu'indicateur « proxy » du changement paléoclimatique au sud-ouest du Maroc.....	254
Axe 2 : Contribution à détermination des paléo-températures de l'océan au sud-ouest du Maroc à partir du rapport Mg/Ca des foraminifères.....	264
I. Généralités sur l'eau de l'océan à la côte Atlantique au sud-ouest du Maroc.....	266
II. Rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques comme indicateur «proxy» de paléo-température de l'océan au sud-ouest du Maroc.	267
1. Matériels et méthodes de ce travail.....	269
2. Caractérisation des températures de surface marine au sud-ouest du Maroc.....	270
3. Essaie de reconstituer des températures des eaux profondes au sud-ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années à partir du rapport Mg/Ca des foraminifères (G.buloides).....	273
Axe 3 : Discussion et interprétation.....	276
I. Comparaison des résultats XRF et Mg/Ca de cette étude et des autres enregistrements climatiques au large du sud-ouest du Maroc.	277
1. Premier scénario : changement de climat/précipitations.....	281
2. Deuxième scénario : changement d'occupation des sols (Facteur anthropique).....	284
Conclusion de la troisième partie.....	288
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	289
Références bibliographiques.....	291
Liste des figures.....	303
Liste des cartes	306
Liste des tableaux.....	308
Liste des photos.....	309

INTRODUCTION GÉNÉRALE

**PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS, MÉTHODES,
APPROCHES ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE**

INTRODUCTION

Tout au long de l'histoire de la Terre, le climat de notre planète a varié selon les époques et les lieux (Ladurie, 2004). Ces changements sont généralement observés sur de longues périodes, ce qui contribue à atténuer la perception de l'homme sur le climat. Cependant, depuis le milieu du 19^e siècle, nous assistons à une accélération de ces changements et à l'apparition de véritables crises climatiques (White, 2014). Ces observations ont conduit l'humanité à se questionner sur la réalité de ces changements, leurs causes, leur devenir, et surtout, sur leurs impacts immédiats et à long terme sur les modes de vie, les écosystèmes et l'économie. Face à ces diverses interrogations, les scientifiques ont apporté des réponses qui restent encore aujourd'hui partielles et sujettes à controverses. Néanmoins, notre compréhension du système climatique s'affine de plus en plus, au point de générer certaines certitudes (Bolzano, 1994). Ces changements climatiques sont devenus aujourd'hui un sujet majeur d'actualité, tant dans les débats scientifiques que dans les discussions politiques et économiques. Ils constituent également un domaine d'études et de recherches prioritaire à l'échelle internationale, compte tenu de leurs impacts étendus sur différents secteurs socioéconomiques des pays. Le changement climatique global soulève donc des questions quant à la dynamique des variations climatiques et aux impacts qu'elles pourraient avoir sur notre monde. Une meilleure compréhension des variations climatiques dans le passé est donc nécessaire.

Si le changement climatique demeure un sujet de débats et de controverses, il reste une notion très difficile à définir en raison de la complexité et des incertitudes spatiales et temporelles qu'il englobe. Malgré cela, il est possible de le définir à trois niveaux d'acceptation :

- ❖ Selon les météorologues et les climatologues : le changement climatique, c'est lorsque *"le climat global de la Terre, ou l'ensemble des climats régionaux, subit une modification durable, sur une durée de dix ans"*.
- ❖ Selon la Convention-Cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (CCNUCC, 1998) : son article I, définit les changements climatiques comme *"des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine, altérant la composition de l'atmosphère mondiale et venant s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables"*.
- ❖ Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2001) : les changements climatiques sont *"des variations statistiques indicatives de l'état du climat ou de sa variabilité persistant pendant une période prolongée (généralement des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à la persistance des variations anthropiques de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des sols"*.

Avec le début de l'industrialisation, vers le milieu du 18^e siècle, l'impact de la pollution atmosphérique et l'augmentation des gaz à effet de serre ont progressivement conduit à des changements à grande échelle dans le forçage radiatif du système climatique mondial (Crutzen, 2002). Au cours des dernières décennies, le débat sur le climat et ses changements s'est répandu de manière sporadique au sein de la communauté scientifique internationale. Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC),

publié en 2014, a démontré que la tendance linéaire du réchauffement entre 1880 et 2012 a été en moyenne de 0,85 °C, une augmentation principalement enregistrée au cours des trois dernières décennies, successivement plus chaudes les unes après les autres. Depuis le rapport de 2007 du GIEC, l'influence des activités humaines sur le réchauffement post-industriel a été établie. Ces constatations récentes justifient les préoccupations des climatologues concernant le climat futur et ses impacts potentiels sur les sociétés humaines, les incitant à développer de nouvelles méthodes et techniques pour résoudre l'énigme climatique.

Les perturbations du système climatique mondial, initialement prévues par les scientifiques pour la fin du 21^e siècle, se produisent déjà dans plusieurs régions du monde : ouragans et tempêtes dévastateurs, sécheresses persistantes et montée du niveau de la mer frappent tour à tour de nombreuses populations à travers le monde (Cléroux, 2007). Dans tous les pays de la Méditerranée, situés en zone subtropicale, la pluviométrie est le paramètre climatique dominant, étant généralement insuffisante d'une part, et beaucoup plus variable que la température d'autre part (Bolle, 2002). Généralement, le changement climatique entraînera le déplacement des zones climatiques et des modifications des régimes pluviométriques (GIEC, 2007). Par ailleurs, au cours des dernières décennies, le prolongement des épisodes secs est devenu une réalité dans cette partie du globe, notamment au Maroc (Sebbar et al, 2011).

Le Maroc, en raison de sa position géographique, demeure l'un des pays les plus vulnérables aux effets néfastes des changements climatiques. Les premiers signes de ces changements se manifestent déjà au Maroc, à travers des évolutions observées à la fois dans les températures et les précipitations. Le quatrième rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat) prévoit une diminution des précipitations pouvant atteindre 20% d'ici la fin du siècle en cours au Maroc. L'augmentation des températures devrait atteindre 2,5 °C, selon les mêmes scénarios du GIEC (2007), également d'ici la fin du siècle en cours.

Le changement climatique est devenu, sans aucun doute, un sujet de grande préoccupation pour les autorités au Maroc, tout comme dans le reste du monde. Notre pays ressent déjà, comme de nombreux autres, l'impact des changements dans les régimes de précipitations, des phénomènes météorologiques extrêmes, et de la montée du niveau de la mer (GIEC, 2007).

Le Maroc est particulièrement influencé par une irrégularité annuelle et une variabilité interannuelle marquée des précipitations, ainsi que par une hétérogénéité dans leur distribution. L'alternance de périodes de fortes précipitations et de périodes de sécheresse, de diverses intensités et durées, est également un trait caractéristique des régimes hydrologiques du pays, avec des conséquences importantes sur les secteurs économiques clés (Driouech, 2010, Sebbar et al, 2012).

À l'instar d'autres régions du Maroc, le Sud-Ouest du pays (zone d'étude) est soumis à des conditions naturelles et climatiques souvent difficiles. La majeure partie de son territoire se situe dans des zones bioclimatiques arides à semi-arides. Son climat est influencé par trois facteurs principaux : le relief, la côte océanique, et le Sahara. Cette région fait l'expérience des effets du changement climatique depuis plusieurs années, se traduisant par des sécheresses de plus en plus fréquentes et longues, ainsi que des précipitations de plus en plus irrégulières par rapport aux données historiques (Gräbener, 2009). Par ailleurs, la zone côtière du Sud-Ouest du Maroc possède l'un des systèmes d'upwelling marin les plus importants au monde,

caractérisé par une forte productivité océanique. La variabilité climatique et son impact sur les écosystèmes et les populations humaines ont été largement étudiés à l'échelle régionale et mondiale. Comprendre les interactions passées entre l'homme, le climat et l'environnement est essentiel pour évaluer la vulnérabilité des écosystèmes aux changements climatiques, en particulier dans le contexte actuel du Sud-Ouest du Maroc, où sécheresses, désertification, dégradation des terres, stress socio-économique et pression démographique sont autant de défis à relever. Cependant, contrairement aux régions du Nord du Maroc, l'histoire du climat et de l'environnement du Sud-Ouest du Maroc demeure largement méconnue.

La sensibilisation aux changements à venir a été rendue possible grâce aux efforts de la communauté scientifique spécialisée dans la reconstitution et la compréhension des événements climatiques passés, dans leur quantification, ainsi que dans la prévision des variations climatiques futures. Cependant, il est important de noter que sans la disponibilité de données météorologiques couvrant de longues périodes et présentant une forte résolution spatiale, il est impossible de retracer l'histoire du climat et donc de mieux comprendre le climat futur. C'est d'autant plus vrai que les plus anciennes mesures météorologiques remontent au début des années 1700 en Europe. La paléoclimatologie est une discipline qui a connu un développement rapide et qui est capable, à partir de diverses sources de données telles que les sédiments marins et lacustres, les carottes de glace, etc., de fournir des informations sur les conditions climatiques passées (Bradley, 1999). Les données paléoclimatiques obtenues à l'aide d'indicateurs climatiques appelés "proxies" sont reconnues par les gestionnaires des ressources naturelles, les autorités gouvernementales et les organisations internationales comme une alternative permettant d'établir une base de données climatiques sur des millénaires. Ces données, grâce à leur analyse, permettent de mieux comprendre et d'évaluer les changements climatiques récents. En fin de compte, la reconstitution du paléoclimat permet de mieux comprendre les variations climatiques naturelles au fil du temps et de prédire les scénarios climatiques futurs (Stine et al, 1998), ainsi que les impacts des activités humaines sur le climat.

L'importance de cette étude réside dans le fait qu'elle met en lumière l'un des problèmes scientifiques les plus controversés de notre époque, à savoir le changement climatique. Certains considèrent le changement climatique comme le défi le plus important pour la vie humaine, tandis que d'autres le perçoivent comme un sujet alimentant une industrie médiatique poursuivant certains objectifs. Cette étude tente également de souligner l'importance des outils utilisés pour étudier le climat, en particulier dans les régions où il est difficile d'obtenir des informations précises sur les éléments climatiques.

Dans le cadre de ce travail, nous avons l'intention de caractériser le climat récent (entre 1968-2015) en nous appuyant d'une part sur les données instrumentales enregistrées par les stations de mesure, et d'autre part, sur la reconstruction à haute résolution des changements climatiques et de la température de l'océan au Sud-Ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années. Nous nous focaliserons sur les données instrumentales pour la période récente et utiliserons des indicateurs climatiques ou "proxies" pour caractériser le climat passé sur les 2000 dernières années. Les analyses géochimiques "multi-proxies" reposent sur la concentration des éléments majeurs et en traces des sédiments marins, ainsi que sur le rapport entre certains éléments traces des données géochimiques (rapport magnésium sur calcium,

Mg/Ca) dans les coquilles de foraminifères, des espèces de phytoplancton marin. Ces données nous permettront de mieux comprendre les variations passées du climat.

I. Contexte de l'étude : Projet ECHO et stage à l'université de Brême :

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la préparation d'une thèse au sein de la FLSHBM (Faculté des Lettres, des Sciences Humaines et des Sciences Sociales), plus précisément au sein du département de géographie. Pour ce faire, un stage a été effectué en 2017 dans le cadre du projet intitulé "ECHO : Environmental-Climata-Human Interactions in Southern Morocco during the past 2000 years : inferences from high-resolution marine records". Ce projet est réalisé dans le cadre du programme de recherche scientifique Maroc-allemand PMARS III, financé par le BMBF (Bundesministeriums für Bildung und Forschung - Ministère Fédéral de l'Éducation et de la Recherche).

Ce stage a été effectué au sein de deux laboratoires, à savoir le laboratoire XRF (pour mesurer la concentration des éléments chimiques) et le laboratoire ICP (pour mesurer le rapport Mg/Ca de la coquille de foraminifère *G. Bulloides*), tous deux faisant partie de l'Institut MARUM-Centre for Marine Environmental Sciences. Cet institut de recherche est rattaché à l'Université de Brême en Allemagne et se spécialise dans trois domaines de recherche principaux :

- ✓ Océan et climat ;
- ✓ Interactions entre la géosphère et la biosphère ;
- ✓ Dynamique du fond marin.

L'objectif général du projet "ECHO" est de reconstituer les changements climatiques, hydrologiques et de végétation survenus au cours des 2000 dernières années. Pour ce faire, une approche multi-proxy est utilisée, intégrant les résultats de nombreux paramètres. Cette approche permettra une reconstitution approfondie de l'histoire climatique, océanique (notamment la température de surface de la mer et la productivité marine) et environnementale, ainsi que de l'évolution de la végétation, avec une attention particulière portée à l'Argan, une espèce endémique. La région ciblée pour cette étude est le Sud-Ouest du Maroc, qui englobe les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa, ainsi que la côte atlantique. Cette région est l'une des plus sensibles du Maroc en termes de changements environnementaux et climatiques.

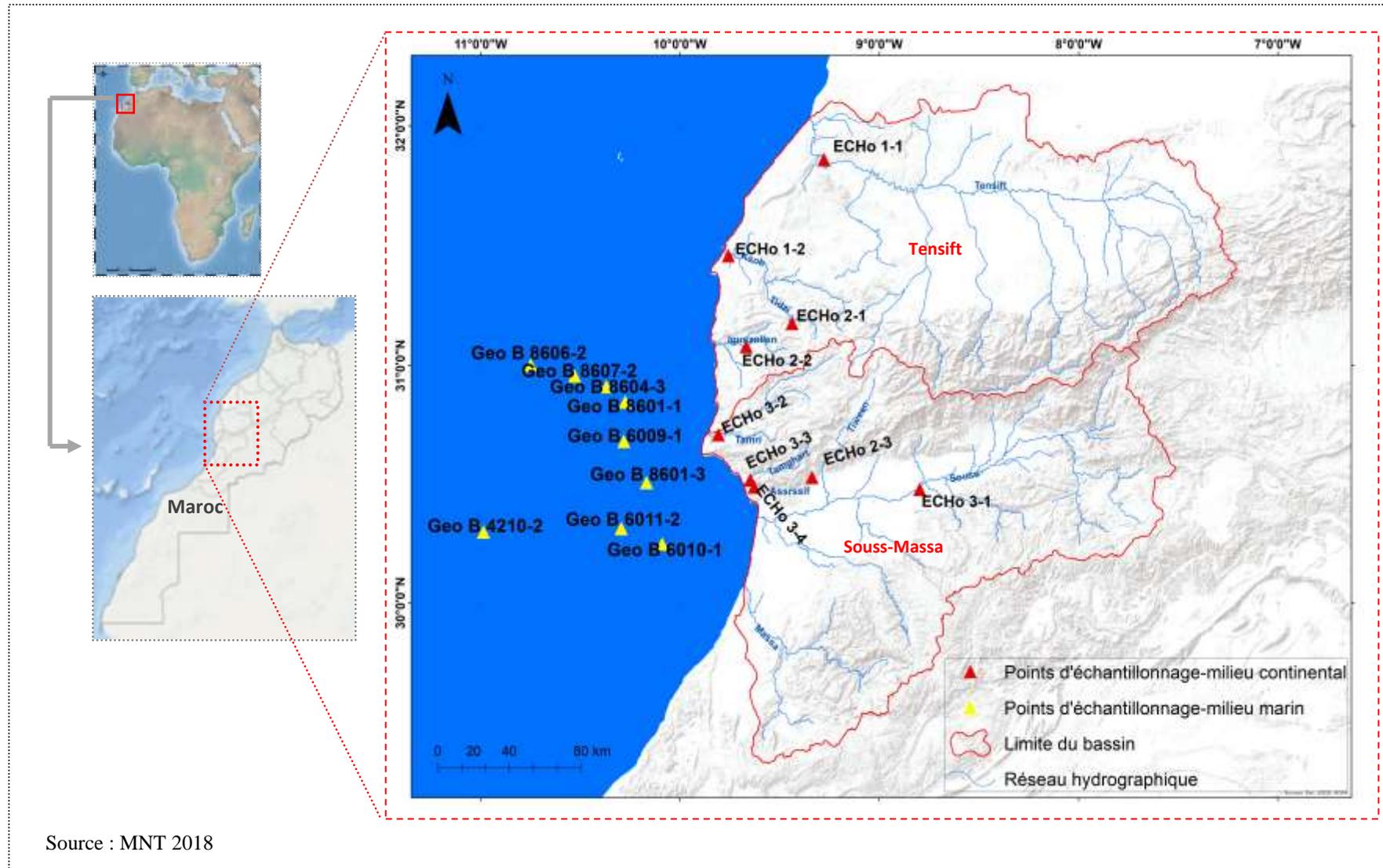
II. Présentation du domaine d'étude :

La zone d'étude, qui fait partie du Sud-Ouest du Maroc, se compose de deux parties distinctes : une partie continentale comprenant deux bassins versants, Tensift et Souss-Massa, et une partie marine située près de l'embouchure des deux grands fleuves, le Tensift et le Souss, le long de la côte atlantique marocaine, entre les latitudes 30°-31°N et les longitudes 10°-11°O (voir carte 1).

- Le bassin versant du Tensift occupe une position centrale au Maroc, s'étendant entre les latitudes 32°10' et 30°50' Nord et les longitudes 9°25' et 7°12' Ouest. Il couvre une superficie d'environ 25 200 km², ce qui représente environ 3,5 % de la superficie totale du Royaume. Il est délimité au Sud par la crête de la chaîne du Haut-Atlas, au Nord par le massif des "Jbilet," des montagnes de faible altitude de moins de 1000 mètres, à l'Est

par la ligne de partage des eaux, qui sépare le bassin du Tensift de celui du Tessaout (un affluent de l'Oum-Er-R'bia), et à l'Ouest par l'océan Atlantique, où il se jette. Les altitudes varient considérablement, atteignant jusqu'à 4167 mètres au Jbel Toubkal.

- Le bassin versant du Souss-Massa se trouve au Sud-Ouest du Maroc, entre les longitudes 7°5'-9°9' Ouest et les latitudes 29°3'-31°1' Nord. Il s'étend sur une superficie d'environ 24 867 km², soit environ 3,49 % de la superficie totale du Royaume. Du point de vue hydrogéographique, on peut diviser le bassin du Souss-Massa en trois parties successives : une partie amont, s'étendant de l'Est depuis le massif du Siroua (à 3000 mètres) jusqu'à Aoulouz, où l'oued quitte les montagnes et débouche dans la plaine à travers des gorges marquant la fin de son parcours montagneux ; une partie moyenne entre Aoulouz et Taroudant, où la vallée forme un rectangle de 60 km sur 20 km ; et une partie avale qui s'étend jusqu'à l'embouchure de l'oued. Dans cette partie, la vallée s'élargit davantage vers l'Ouest, tandis que la bordure de l'Anti-Atlas se dirige vers le Sud.
- La côte atlantique marocaine est située au Sud-Ouest du pays, entre les latitudes 30°-31°N et les longitudes 10°-11°O. Cette région est réputée pour sa richesse en ressources biologiques exploitables, classées en fonction de leurs caractéristiques bioécologiques et de leur importance socio-économique. Elle abonde en petits pélagiques et se distingue par la résurgence des eaux profondes, qui apportent des éléments minéraux favorisant la photosynthèse dans les eaux de surface et, par conséquent, la production de l'ensemble de la chaîne alimentaire (INRH, 2014).



Carte 1 : Carte de localisation géographique des domaines d'étude.

Les choix effectués pour cette étude s'expliquent par les raisons suivantes :

- ✓ Les études sur le climat marocain et les changements environnementaux se sont principalement focalisées sur les régions du Nord du pays, particulièrement, sur les enregistrements des lacs du Moyen-Atlas. Au contraire, les études sur le Sud-Ouest du Maroc restent rares et largement inconnues ;
- ✓ Le Sud-Ouest du Maroc a subi des événements extrêmes, des désertifications, la dégradation des terres et la pression démographique dus au changement climatique ;
- ✓ La zone côtière du Sud-Ouest du Maroc possède l'un des plus importants systèmes d'upwelling marin au monde, avec une forte productivité océanique de surface et l'influence de grandes quantités de dépôts de poussière saharienne apportant des nutriments dans l'océan.

III. Problématique de l'étude :

Les changements climatiques ont un impact significatif sur de nombreux aspects de la vie, notamment les ressources en eau, l'agriculture, les écosystèmes, l'environnement, l'économie, la sécurité alimentaire et le développement social. Par exemple, de nombreux pays situés dans le bassin méditerranéen ont été touchés par la sécheresse au cours des dernières décennies, avec des conséquences importantes sur leurs ressources en eau et leurs activités agricoles. Le Maroc, en tant que pays sud-méditerranéen en Afrique, est particulièrement vulnérable aux changements climatiques. Il fait face à des défis tels que la désertification, la dégradation des terres et une possible augmentation de la variabilité climatique, en plus des pressions socio-économiques et de la croissance démographique à venir.

Les régions du Nord du Maroc ont fait l'objet d'études approfondies sur les changements climatiques, le paysage et la végétation. Les enregistrements lacustres du Moyen-Atlas, dans le nord du pays, ont permis de comprendre les influences climatiques sur la végétation et les niveaux des lacs au fil de l'Holocène jusqu'à il y a environ 3000-2000 ans avant le présent (BP). Cependant, à partir de cette période, des indicateurs de déforestation suggèrent des activités humaines plus intensives, telles que l'agriculture, modifiant le paysage. En revanche, l'histoire climatique du Sud-Ouest du Maroc est largement méconnue, bien que cette région soit particulièrement vulnérable aux changements climatiques.

Pour combler cette lacune, notre étude se concentre sur le Sud-Ouest du Maroc, une zone menacée par l'impact des changements climatiques. Des indices climatiques étudiés ont déjà montré une tendance au réchauffement et à la sécheresse dans cette région, notamment en ce qui concerne les vagues de chaleur, le nombre de jours chauds et les périodes de sécheresse à court terme. Cependant, ces indices ne fournissent qu'une vue limitée de la variabilité hydroclimatique à moyen et long terme. C'est pourquoi notre recherche se base sur des archives sédimentaires pour mieux comprendre l'histoire climatique de cette région et anticiper les défis futurs liés aux changements environnementaux.

La problématique générale de cette étude vise à retracer l'évolution du climat au Sud-Ouest du Maroc sur une période de 2000 ans. Plus précisément, elle cherche à atteindre deux objectifs principaux :

- ✍ Comprendre les caractéristiques climatiques récentes (1968-2015) dans les bassins de Tensift et de Souss-Massa, en mettant l'accent sur l'évolution des variables climatiques moyennes et extrêmes au cours de cette période au Sud-Ouest du Maroc.
- ✍ Reconstituer avec une haute résolution les changements climatiques et les variations de température de l'océan au Sud-Ouest du Maroc sur les 2000 dernières années. Cela sera réalisé en utilisant des paramètres géochimiques à haute résolution, notamment les éléments chimiques majeurs et en traces, ainsi qu'en mesurant la concentration en éléments traces, tels que le rapport Mg/Ca, dans les tests de foraminifères, qui sont des organismes marins microscopiques.

En résumé, la problématique de l'étude s'articule autour de deux éléments essentiels : le climat récent et le climat passé.

À travers cette problématique, plusieurs questions surgissent :

- Quelles sont les implications climatiques de ces changements dans le Sud-Ouest du Maroc ?
- Peut-on observer des changements significatifs dans l'environnement et dans le comportement climatique dans les bassins versants du Tensift et du Souss-Massa au Sud-Ouest du Maroc, ces trente dernières années ?
- Quel est l'impact des conditions de la surface des océans sur les écosystèmes terrestres et quels sont les signaux de précipitations trouvées dans les sédiments marins ?
- Quels sont les changements climatiques et environnementaux, au cours des 2000 dernières années, dans le contexte du climat mondial et régional ?
- Y a-t-il eu des changements climatiques et environnementaux majeurs au Sud-Ouest du Maroc, avant les derniers 2000 ans ?
- Les changements climatiques du 20^{ème} siècle et les changements actuels dans les précipitations, sont-ils anormaux par rapport aux derniers 2000 ans ?

IV. Méthodes et approches de travail :

Chaque problématique nécessite une méthode et approche de travail, qui lui est adéquate et qui permettra par la suite d'atteindre les objectifs. Nous avons choisi une approche multidisciplinaire qui combine l'analyse statistique des données instrumentales avec le travail du terrain, y compris le prélèvement d'échantillons, et enfin, l'analyse sédimentologique et géochimique en laboratoire.

Nous avons traité le sujet, selon trois grands axes :

❖ Analyse statistique :

Pour détecter l'évolution climatique récente et l'extraction des extrêmes climatiques dans le bassin versant de Tensift et de Souss-Massa au Sud-Ouest du Maroc, nous nous sommes basés sur les données instrumentales enregistrées par les stations de mesures disponibles (*pour plus de détails, voir l'axe 1, partie II*).

❖ Travail du terrain - Prélèvement des échantillons :

Ce travail s'appuie sur le prélèvement des échantillons continentaux, échantillons prélevés près de l'exutoire des Oueds des deux bassins versants de Tensift et de Souss-Massa, et les observations du terrain qui permettent de fournir des sédiments continentaux et d'établir un diagnostic de la situation actuelle de la zone d'étude. Cette phase va nous permettre aussi, des prises de photos les plus explicatives dans les deux bassins versants de Tensift et Souss-Massa.



Photo 1 : Photographies prises au terrain en 2017 dans le bassin du Tensift et de Souss-Massa (travail de terrain, 2017).

❖ Analyses au laboratoire :

Les analyses au laboratoire qui ont été effectuées, à l'Université de Brême en 2017, sont divisées en deux catégories, selon les techniques utilisées :

- Les analyses géochimiques utilisant le scanner XRF (Fluorescence de Rayons X) non destructif, pour mesurer l'abondance et la concentration des éléments chimiques des échantillons (sédiments) étudiés. Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode XRF, pour déterminer la composition chimique de deux types de sédiments (continentaux et marins) (*pour plus de détails, voir l'axe 7, partie I*).
- Les analyses du rapport Mg/Ca des foraminifères : genre *Globigerina Bulloides*. L'utilisation du rapport des éléments chimiques « magnésium/calcium » de la calcite des tests de foraminifères marins, en tant que « proxy » de la température a bénéficié d'avancées significatives, durant ces dernières années. En effet, la dépendance en température du rapport Mg/Ca des tests de foraminifères a conduit à son développement, comme traceur de la température des eaux de surface ou de profondeur des océans (*pour plus de détails, voir l'axe 7, partie I*).



Photo 2 : Photographies du travail de laboratoire, prises à l'Université de Brême (2017).

V. Données utilisées :

Les données instrumentales enregistrées par les stations de mesure sont considérées comme la source la plus fiable pour la détection de l'évolution climatique actuelle. Elles sont généralement disponibles à une haute résolution temporelle et servent souvent d'étalonnage et de paramètres d'entrée pour les reconstitutions climatiques et les scénarios climatiques futurs.

D'autre part, les données permettant de caractériser l'état de l'environnement dans le passé, en particulier l'histoire climatique de la Terre, sont préservées dans des archives naturelles (Chaline, 1995). Cette approche a été choisie, parce que le système climatique varie et change à toutes les échelles de temps, et que la compréhension des phénomènes les plus lents peut s'avérer pertinente pour les changements climatiques à plus courte échelle de temps.

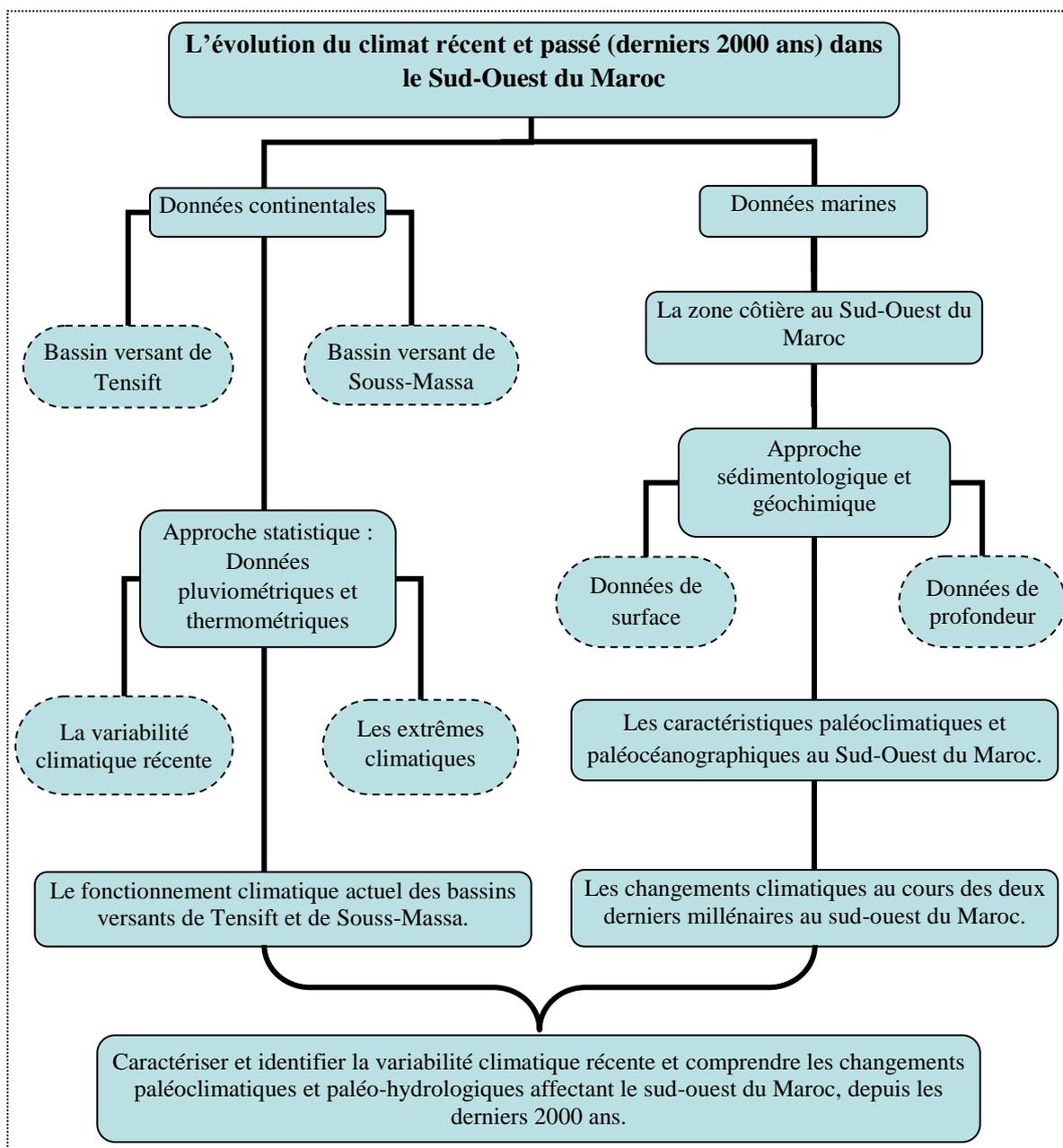


Figure 1 : Résumé de la méthode et de la démarche de l'étude.

VI. Les difficultés spécifiques à ce travail :

Les recherches scientifiques comportent inévitablement des défis qui nécessitent d'être surmontés pour progresser. Ce travail a été confronté à plusieurs difficultés, sans entrer dans les détails, nous souhaitons mettre en évidence les principales :

- ✍ La première difficulté majeure réside dans la maîtrise limitée des techniques de géochimie et de sédimentologie, en particulier la technique XRF, ICP, ainsi que l'interprétation de leurs résultats. Surmonter cette lacune a demandé un investissement considérable en termes d'efforts et de temps, d'autant plus que les ressources et références disponibles sur ce sujet sont rares ;
- ✍ La deuxième difficulté majeure a été l'acquisition des données climatiques pertinentes auprès de divers services, une tâche souvent ardue et chronophage. Il est à noter que l'accès aux données a parfois semblé être une véritable quête, car elles étaient parfois

difficilement accessibles au sein des administrations. Cependant, à force de persévérances, en usant de chemins détournés parfois, nous sommes parvenus à réunir des chroniques de données, le plus souvent complètes et cohérentes dans l'ensemble ;

- ✍ Une autre contrainte importante est liée à l'ampleur de la zone d'étude, qui s'étend sur deux bassins versants distincts, à savoir Tensift et Souss-Massa.

VII. Les objectifs de la thèse :

Dans le contexte actuel, la question des changements climatiques revêt une importance cruciale à l'échelle planétaire. Il est essentiel de mieux comprendre la variabilité climatique, les conséquences des changements climatiques, ainsi que les fluctuations passées du cycle hydrologique pour appréhender les enjeux environnementaux. Malheureusement, les connaissances scientifiques sur l'évolution des conditions hydrologiques et climatiques, ainsi que sur leurs interactions avec les activités humaines au cours des derniers 2000 ans, demeurent très lacunaires dans le Sud-Ouest du Maroc.

Cette thèse vise principalement à caractériser et à identifier la variabilité climatique récente. Elle a également pour objectif de mieux comprendre les changements paléoclimatiques qui ont affecté le Sud-Ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années, une période correspondant à l'interaction réelle entre l'homme et l'environnement dans cette zone d'étude, selon de nombreuses études. L'accent est mis sur la reconstitution des conditions climatiques passées et des températures de surface de la mer (SST) en utilisant les paramètres géochimiques conservés dans les sédiments marins. À travers des analyses multi-proxys à haute résolution, en croisant et en complétant les données géochimiques terrestres et marines, cette recherche vise à comprendre les mécanismes de l'évolution climatique, à estimer les périodes climatiques (humides/chaudes), à caractériser l'évolution des paysages terrestres, et à estimer les SST sur la côte atlantique marocaine au cours des 2000 dernières années.

Les objectifs spécifiques de cette thèse sont les suivants :

- ✍ Étudier les changements climatiques récents et les phénomènes météorologiques extrêmes observés dans la zone d'étude.
- ✍ Identifier les périodes de sécheresse et d'humidité récentes dans le Sud-Ouest du Maroc et comprendre les facteurs qui ont contribué à ces tendances climatiques.
- ✍ Analyser les événements climatiques passés pour mieux appréhender le contexte climatique actuel et futur, ainsi que leur impact sur la zone d'étude.
- ✍ Examiner l'évolution de la végétation et des changements dans l'occupation des sols au cours des dernières décennies dans le Sud-Ouest du Maroc.
- ✍ Évaluer les effets des changements climatiques passés et actuels sur les écosystèmes, l'environnement et les populations locales dans la zone d'étude.
- ✍ Réaliser une cartographie et une interprétation des résultats de la distribution spatiale des éléments chimiques.
- ✍ Étudier les interactions entre l'océan et le continent au cours des 2000 dernières années.
- ✍ Fournir une synthèse des principales variations climatiques ayant affecté le Sud-Ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années jusqu'à nos jours.

VIII. Les hypothèses de la thèse :

Cette thèse a pour objectif principal de vérifier un ensemble d'hypothèses concernant les changements climatiques dans le Sud-Ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années, ainsi que leurs impacts sur les écosystèmes, l'environnement et les populations locales. Les hypothèses à examiner sont les suivantes :

- ✓ Le Sud-Ouest du Maroc **a connu** des changements climatiques significatifs au cours des derniers 2000 ans, avec des impacts **négatifs** sur les écosystèmes, l'environnement et les communautés humaines.
- ✓ Le Sud-Ouest du Maroc **a connu** des changements climatiques significatifs au cours des derniers 2000 ans, avec des impacts **positifs** sur l'écosystème, l'environnement et les populations locales.
- ✓ Le Sud-Ouest du Maroc **n'a pas connu** de changements climatiques significatifs au cours des 2000 dernières années.

IX. Synthèse sur les études antérieures en climatologie et en paléoclimatologie dans le domaine d'étude :

La présente étude couvre les 2000 dernières années et documente les changements climatiques et environnementaux au Sud-Ouest du Maroc. Ce domaine d'étude avait déjà fait l'objet d'études préalables sur la variabilité climatique récente (Sebbar et al, 2012 ; Bridi et al, 2012 ; Ed-Daoudi, 2014 ; Zamrane et al, 2016) et sur les changements climatiques et océaniques anciens (Cheddadi et al, 1998 ; Kuhlmann et al, 2004 ; Rebotim et al 2007 ; McGregor et al, 2007 et 2009 ; Morley et al. 2011 ; Janna Just 2012 ; Morley et al, 2014 ; El Frihmat et al, 2015 ; Zielhofer et al, 2017 ; Xueqin et al, 2019).

Ces dernières études, couvrant l'Holocène, ont notamment mis en évidence, de nouvelles approches pour caractériser et valider de manière croisée, les propriétés multiparamétriques (fluviales et éoliennes) déposées à la marge continentale du Sud du Maroc. Afin d'évaluer les changements climatiques, les températures de la surface marine et du signal de productivité de l'Holocène, un ensemble de « proxies » isotopiques, géochimiques et micro-granulométriques ont été utilisés pour ces études. Les enregistrements climatiques de l'Holocène moyen et récent, selon ces études, montrent souvent un changement rapide, en réponse au changement graduel de l'insolation orbitale. De plus, les événements et transitions climatiques marqués sont le résultat d'un processus de rétroaction positive, qui propage et amplifie les événements climatiques. En effet, l'évaluation des caractéristiques multi-proxys des sédiments terrigènes est une étape essentielle, dans l'objectif de distinguer et de quantifier les apports éoliens et fluviaux aux océans. La reconstitution de ces flux permet des reconstitutions paléoclimatiques, c'est-à-dire que, des conditions plus arides par un apport éolien plus important et des conditions plus humides par un apport fluvial plus important. Donc, les caractéristiques des sédiments fluviaux et éoliens reflètent les conditions environnementales dans les zones sources, et aussi, les conditions physiques pendant le transport. Enfin, les travaux sur les processus de sédimentation et la distribution des matériaux terrigènes, qui sont liés aux transports fluvial et éolien, indiquent une variabilité à l'échelle millénaire des processus de transport dominants sur le site d'investigation au large du Sud du Maroc, ainsi que des périodes récurrentes de conditions sèches pendant l'Holocène. L'enregistrement terrigène reflète des conditions généralement humides au début et au milieu de l'Holocène,

ainsi qu'après 1300 BP. En revanche, le ruissellement continental était réduit et les conditions arides étaient prédominantes pendant l'Holocène moyen et tardif.

Tous ces résultats ont motivé la réalisation d'autres nouvelles études plus approfondies dans l'objectif de caractériser la variabilité climatique actuelle, à partir des données mesurées par les instruments, et le changement climatique passé au Sud-Ouest du Maroc. Une mission de carottage marin long (~167cm de sédiments) et de la surface continentale a donc été utilisée pour le faire.

X. Mots clés de la thèse :

Quelques définitions des termes utilisés :

- ❖ **Climat** : Au sens étroit du terme, le climat désigne en général le « temps moyen », ou plus précisément une description statistique, en termes de moyennes et de variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes allant de quelques mois à des milliers ou des millions d'années (<http://www.clubdesargonautes.org/faq/climat1.php>), la période type est de 30 ans. D'après la définition de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), ces quantités pertinentes sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent.
- ❖ **Variabilité climatique** : La caractéristique inhérente au climat, qui se manifeste par des changements et déviations dans le temps. Le degré de variabilité climatique peut être décrit, par les différences entre les valeurs moyennes à long terme des paramètres climatiques (pluie, température, humidité, durée des saisons) et des valeurs observées prises à différentes échelles temporelles et spatiales (UICN, 2011).
- ❖ **Changement climatique** : Changement de climat qui est attribué directement ou indirectement à une activité humaine, altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui est, en plus de la variabilité naturelle du climat, observé sur des périodes comparables » (UICN, 2011).
- ❖ **Vulnérabilité** : Les caractéristiques et les circonstances d'une communauté ou d'un système, qui le rendent susceptible de subir les effets d'un danger. Les aspects de la vulnérabilité découlent de divers facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux (UNISDR, 2009).
- ❖ **Sécheresse** : La sécheresse est un phénomène qui se traduit par un assèchement des sols, altérant le bon développement de la faune et de la flore. Elle est due à un dérèglement du cycle normal de pluviosité, et donc à l'absence d'eau. Les températures élevées sont aussi, un élément qui accentue la sécheresse, témoignant ainsi d'un sérieux changement ou d'une grande perturbation du climat (<http://www.planete-durable.com/les-15-indicateurs-du-changement-climatique>).
- ❖ **Paléoclimat** : Le terme « paléoclimat » désigne un climat ancien, par opposition au climat actuel, sans référence à une échelle de temps. La paléoclimatologie est un des éléments de la paléoécologie, et de la climatologie (Jean-Claude et al, 2013).
- ❖ **Paléoclimatologie** : Est la science qui étudie les climats passés et leurs variations. Elle tente d'établir les conditions environnementales caractéristiques de chaque période

géoclimatique, notamment, en termes de paléotempératures de l'atmosphère, des océans et des continents (Jean-Claude et al, 2013).

- ❖ **Indicateur climatique** : En climatologie, est à la fois une mesure de base et une composition à partir de ces mesures, qui doit être bien différenciée de l'indicateur climatique (le bio-indicateur), valeur quantitative ou qualitative, donc parfois adimensionnelle, caractérisant l'état d'un système de façon indirecte (carottes marines, état des coraux, par exemple).
- ❖ **Proxy (pl. proxies)** : Indicateur biologique, géochimique ou sédimentologique d'une archive étudiée, marquant des variations climatiques passées.
- ❖ **Avant le Présent (BP)** : Notation accompagnant les âges exprimés en nombre d'années, comptées vers le passé, à partir de l'année 1950.

XI. La structure de la thèse :

Les champs abordés pour comprendre l'évolution du climat récent et ancien (derniers 2000 ans) dans le Sud-Ouest du Maroc sont très divers. Le plan proposé pour atteindre les objectifs fixés auparavant, se compose de 3 grandes parties (fig.2).

- **La première partie** de la thèse a pour objectif d'identifier le cadre général de l'étude et de présenter les caractéristiques générales des domaines d'étude. Cette section est composée de deux chapitres principaux. Dans le premier chapitre, nous analysons en détail les caractéristiques des deux bassins versants, à savoir Tensift et Souss-Massa, ainsi que les particularités de la côte atlantique située au Sud-Ouest du Maroc, entre 30-31N° ET 10-11O°. Le deuxième chapitre s'articule autour du cadre théorique des changements climatiques passés (Holocène) et récents, à l'échelle mondiale et nationale. Ensuite, nous exposons la méthodologie de travail, qui repose principalement sur trois approches : statistique, sédimentologique et géochimique.

- **La deuxième partie** de la thèse se focalise sur la compréhension et l'analyse du fonctionnement climatique actuel des bassins versants de Tensift et de Souss-Massa sur la période de 1969 à 2015. Cette analyse se base sur les données instrumentales enregistrées par les stations de mesure disponibles, dans le but de détecter l'évolution récente du climat et d'effectuer une analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans ces deux bassins. Cette partie se décompose en trois chapitres : Le premier chapitre est consacré à la présentation des stations de mesure et à une évaluation critique des données collectées. Le deuxième chapitre s'attache à l'analyse des données pluviométriques et thermiques, ainsi qu'à la réalisation d'un bilan hydrique pour les bassins de Tensift et de Souss-Massa. Le dernier chapitre de cette section se penche sur les situations climatiques extrêmes, en particulier la sécheresse, dans les bassins de Tensift et de Souss-Massa. Nous entreprenons une analyse de la sécheresse climatique actuelle et examinons les liens potentiels entre la variabilité annuelle des précipitations dans le Sud-Ouest du Maroc (Tensift et Souss-Massa) et les différents modes de circulation atmosphérique générale.

- **La troisième partie** de la thèse est consacrée à la présentation des résultats de l'étude sédimentologique et géochimique. Cette section se compose de trois chapitres distincts : Le premier chapitre met l'accent sur l'apport de l'étude géochimique des sédiments de surface, qu'ils proviennent de l'environnement marin ou continental du domaine d'étude. Ce chapitre

comprend une cartographie détaillée des échantillons et une analyse approfondie de leurs caractéristiques géochimiques. Le deuxième chapitre est consacré à l'explication et à l'interprétation des éléments géochimiques présents dans les sédiments de la surface marine au Sud-Ouest du Maroc. Il explore les significations climatiques de ces éléments et offre des perspectives claires sur la relation entre la géochimie des sédiments et les conditions climatiques. Le dernier chapitre de cette partie a pour objectif de discuter l'évolution paléoclimatique et paléo-océanique. Il se base sur une analyse à haute résolution des archives sédimentaires couvrant les 2000 dernières années dans la région du Sud-Ouest du Maroc. Ce chapitre permettra de mieux comprendre les variations climatiques passées dans cette zone géographique.

Finalement, les résultats jugés pertinents sont synthétisés et comparés aux données existantes, afin d'engager une discussion et finalement conclure.

Vers une meilleure compréhension de l'évolution du climat actuel et ancien (derniers 2000 ans) dans le Sud-Ouest du Maroc : approche statistique, sédimentologique et géochimique.

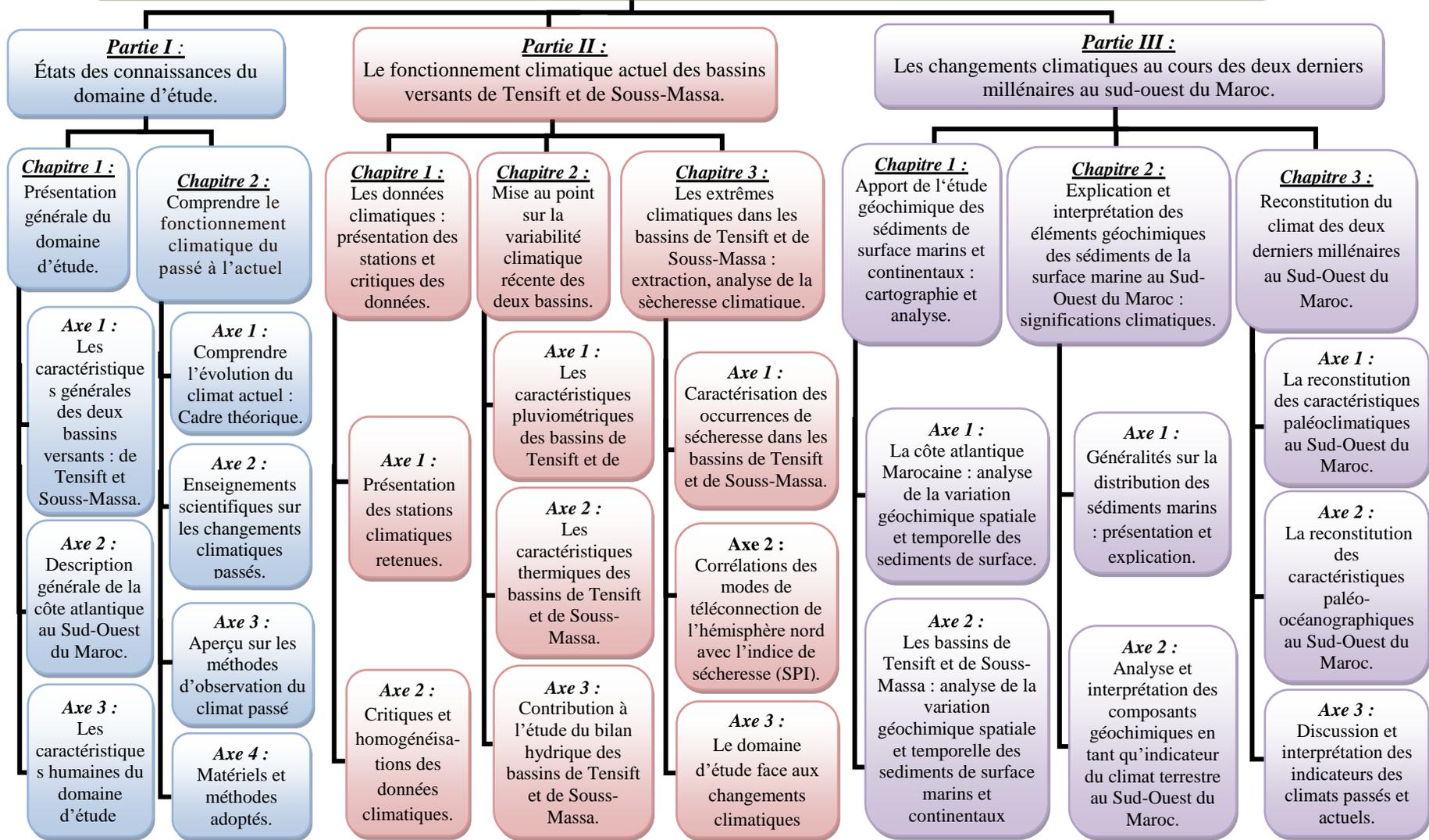


Figure 2 : Schéma de la structure de la thèse.

PREMIÈRE PARTIE :

ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LE DOMAINE D'ÉTUDE : B.V DE TENSIFT, B.V DE SOUSS-MASSA ET LA CÔTE ATLANTIQUE MAROCAINE

INTRODUCTION

Cette section est consacrée à la présentation du cadre général de l'étude. Elle a pour objectif de mettre en avant les caractéristiques générales du domaine d'étude, les éléments contextuels et méthodologiques de la thèse. Cette introduction se divise en deux chapitres. Le premier chapitre analyse essentiellement les principales caractéristiques physico-géographiques, géologiques, et climatiques des deux bassins versants : Tensift et Souss-Massa, ainsi que les particularités de la côte atlantique au Sud-Ouest du Maroc, située entre les latitudes 30°-31°N et les longitudes 10°-11°O. Dans le deuxième chapitre, nous nous appuyons sur le cadre théorique du changement climatique passé (Holocène) et récent à l'échelle mondiale et nationale. Nous présentons ensuite les méthodes largement utilisées pour reconstituer l'évolution du climat au cours du dernier millénaire. Ce chapitre correspond à la présentation de notre méthodologie et de nos approches de travail, décrivant comment la recherche a été menée.

CHAPITRE N° 1 :

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES DEUX BASSINS VERSANTS (TENSIFT ET SOUSS-MASSA) ET DE LA CÔTE ATLANTIQUE MAROCAINE

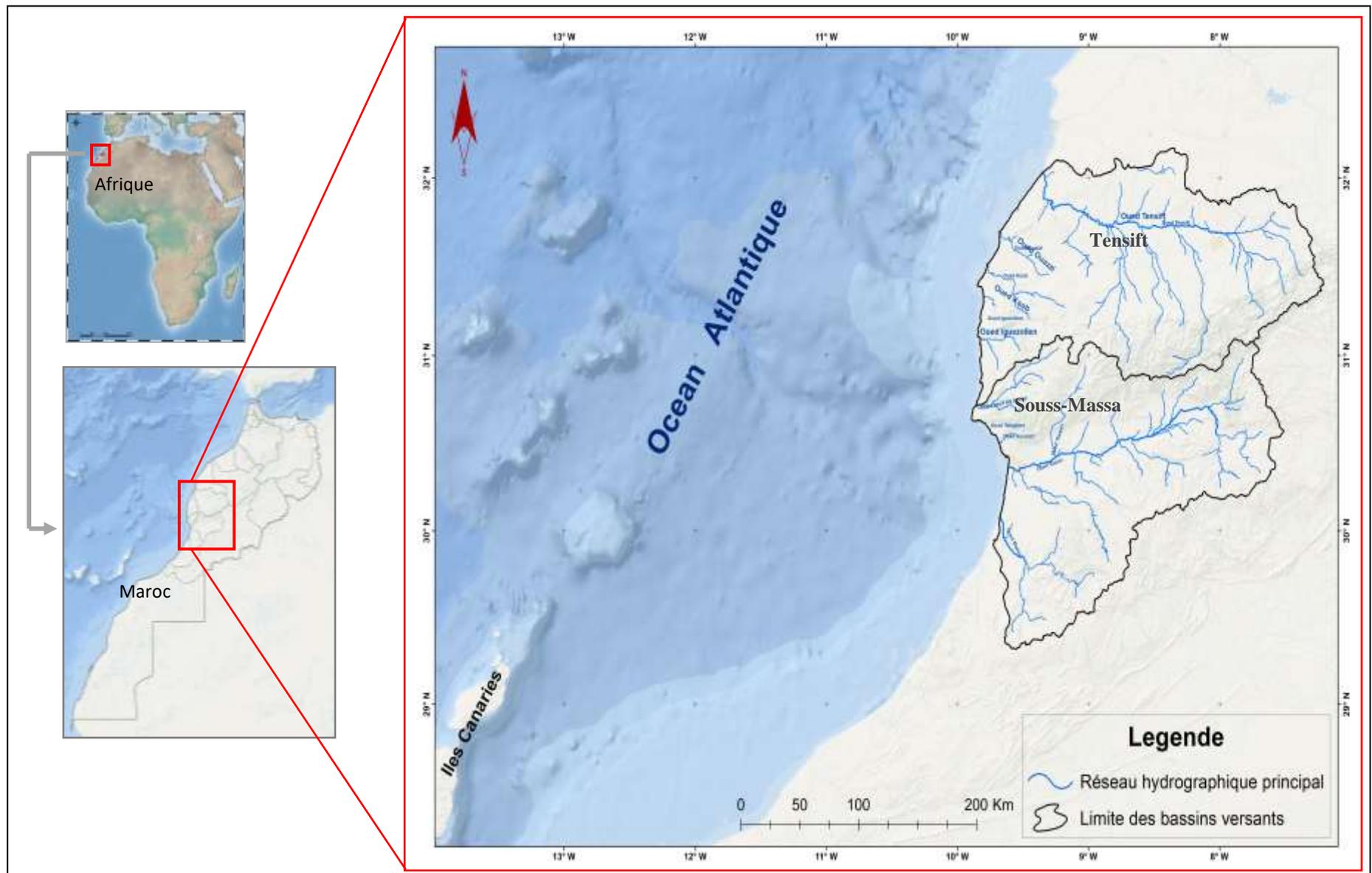
INTRODUCTION

La zone d'étude, qui fait partie du Sud-Ouest du Maroc, se compose de deux parties distinctes : une partie continentale, comprenant les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa, et une partie marine le long de la côte atlantique marocaine, située entre les latitudes 30°-31°N et les longitudes 10°-11°O. En effet, Dans toute approche du milieu naturel, il est essentiel de fournir des données quantitatives permettant de caractériser de manière précise la région en question. C'est pourquoi, dans le premier axe de ce chapitre, nous examinerons en détail les principales caractéristiques physico-géographiques, géologiques et climatiques des deux bassins versants (Tensift et Souss-Massa). Dans le deuxième axe, nous aborderons les caractéristiques générales de la côte atlantique marocaine. Ces informations, qui sont principalement descriptives, revêtent une importance fondamentale pour la compréhension du fonctionnement de ces bassins versants.

Axe 1 : Les caractéristiques générales du domaine continental : les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa

Les bassins versants étudiés, appartiennent à deux régions différentes du Maroc (carte 2). Il s'agit du :

- Le bassin versant de Souss-Massa, situé dans la région de Souss-Massa-Draa, est drainé par l'oued Souss, qui se jette dans l'océan Atlantique.
- Le bassin versant de Tensift, localisé dans la région de Marrakech, est drainé par l'oued Tensift, également se jetant dans l'océan Atlantique.

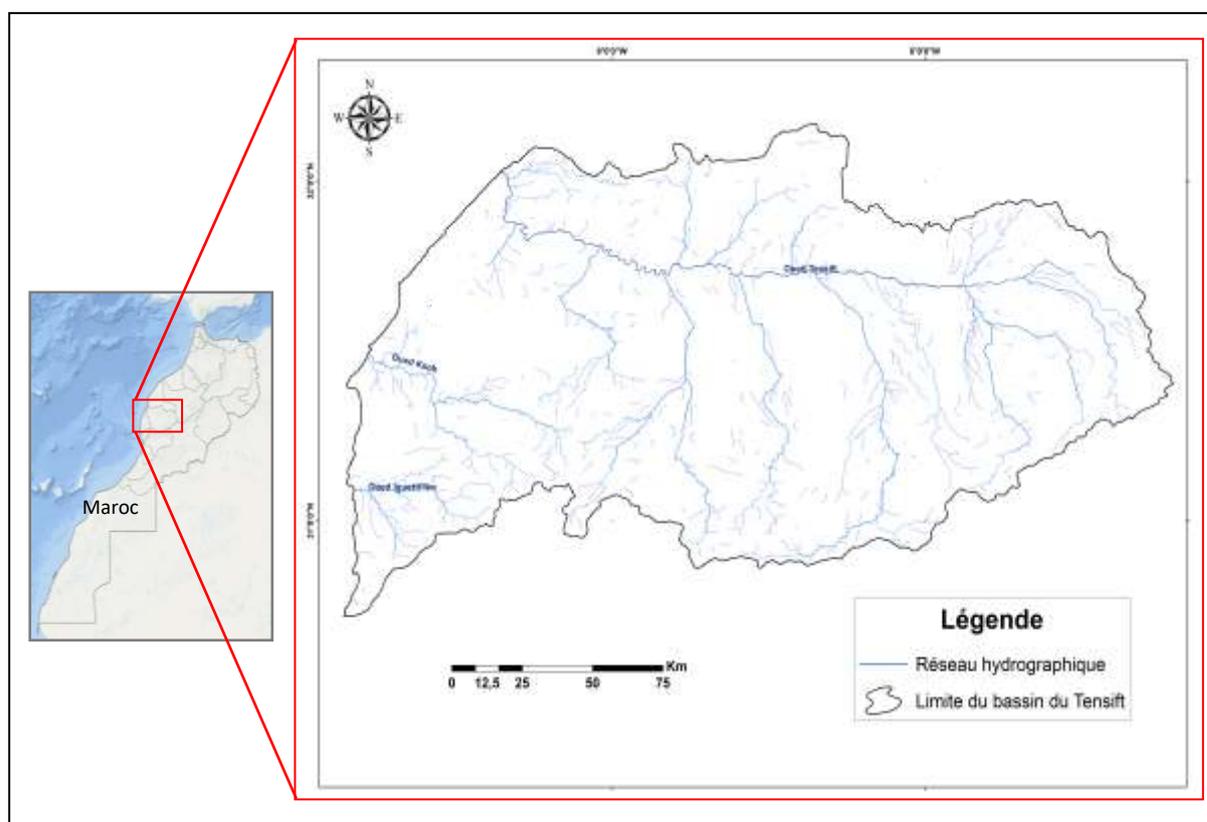


Carte 2: Situation géographique des bassins versants étudiés à l'échelle du Maroc

I. Contexte général des deux bassins versants :

1. Le bassin versant de Tensift :

Le bassin hydrographique de Tensift est un hydrosystème semi-aride situé au Maroc, composé de deux principales entités morphologiques : un massif montagneux très élevé et une vaste plaine alluviale. Le Haut-Atlas de Marrakech, qui constitue la montagne principale, joue un rôle essentiel en tant que réservoir d'eau, contribuant de manière significative aux écoulements normaux et aux phénomènes hydrométéorologiques extrêmes qui se dirigent vers la plaine de Tensift. En raison de ses altitudes élevées, atteignant jusqu'à 4165 mètres, et de l'orientation de ses versants vers le Nord-Ouest, cette région est capable de recevoir des quantités substantielles de précipitations lorsque les conditions météorologiques le permettent (ABHT, 2009).



Carte 3 : Situation géographique du bassin versant de Tensift.

Le bassin versant du Tensift peut être divisé en deux parties présentant des caractéristiques hydrologiques distinctes :

- ✍ **Les montagnes du Haut-Atlas :** Cette région reçoit les précipitations les plus abondantes dans le bassin et génère des écoulements de surface très actifs. En raison de l'altitude élevée, les précipitations se présentent sous forme liquide et solide. Les oueds qui drainent les versants nord des montagnes de l'Atlas constituent la source principale d'alimentation des nappes phréatiques dans la plaine du Haouz (Boudhar, 2009). Ces montagnes jouent un rôle crucial en tant que réservoir d'eau pour la région.
- ✍ **La plaine centrale semi-aride du Haouz :** Cette zone fonctionne comme une région de transit et de consommation des ressources hydriques. L'irrigation y représente plus de 85 % de la consommation totale des ressources en eau disponibles (Boudhar, 2009).

L'oued Tensift, qui traverse cette région, agit essentiellement comme une gouttière, recevant principalement des eaux en provenance des versants nord du Haut-Atlas. Il s'écoule d'est en ouest, depuis sa source jusqu'à son embouchure dans l'océan Atlantique, sur une distance totale de 260 km. Sa source se situe à une altitude de 550 mètres par rapport au niveau général du Maroc, et le bassin qu'il draine couvre une superficie totale de 19 750 km², dont seulement 7 075 km² sont considérés comme actifs (ABHT, 2009).

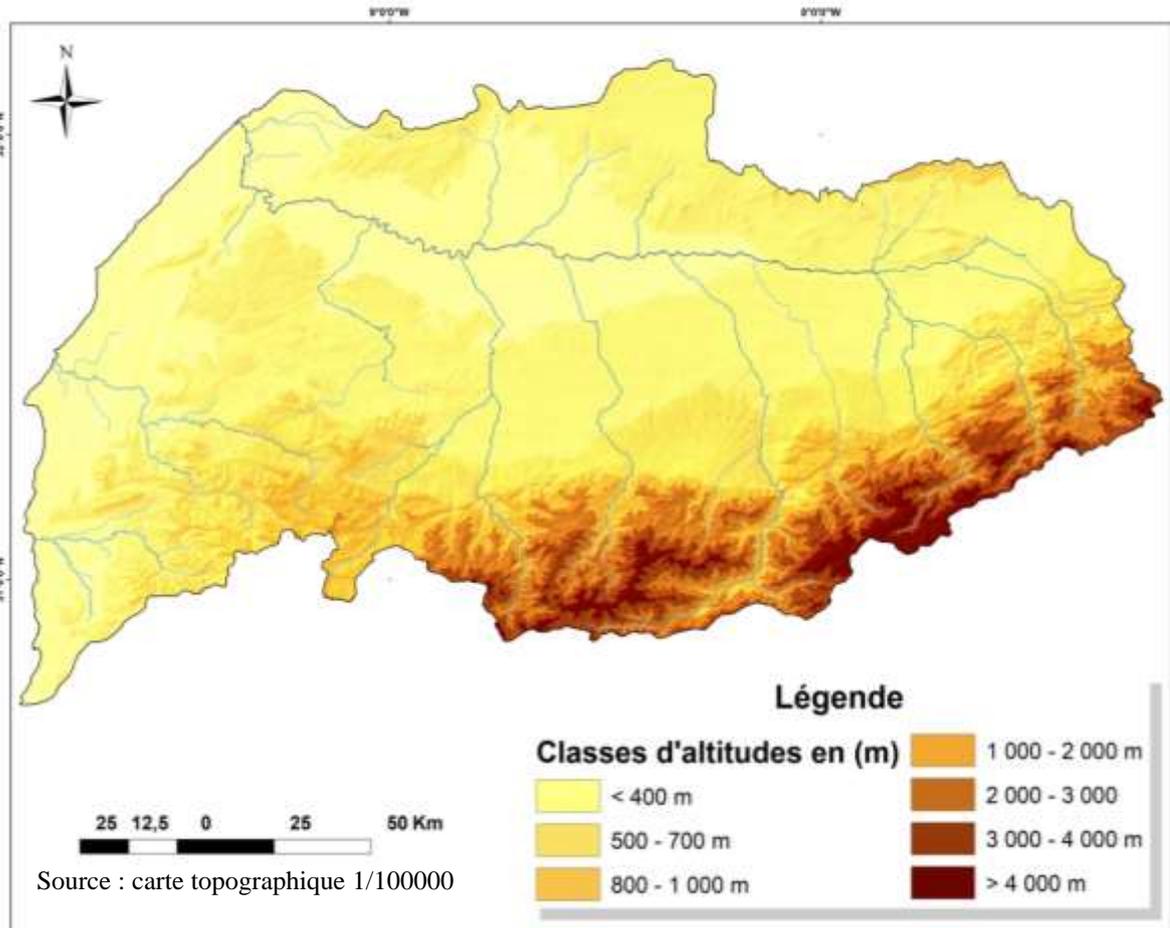
Cette région représente l'un des bassins les plus densément peuplés du Maroc, avec une population recensée de 4 520 569 habitants en 2009. Les principales activités économiques de la région sont axées sur l'agriculture, l'élevage, le tourisme, l'agroalimentaire et l'artisanat (ABHT, 2009).

2. Le bassin versant de Souss-Massa :

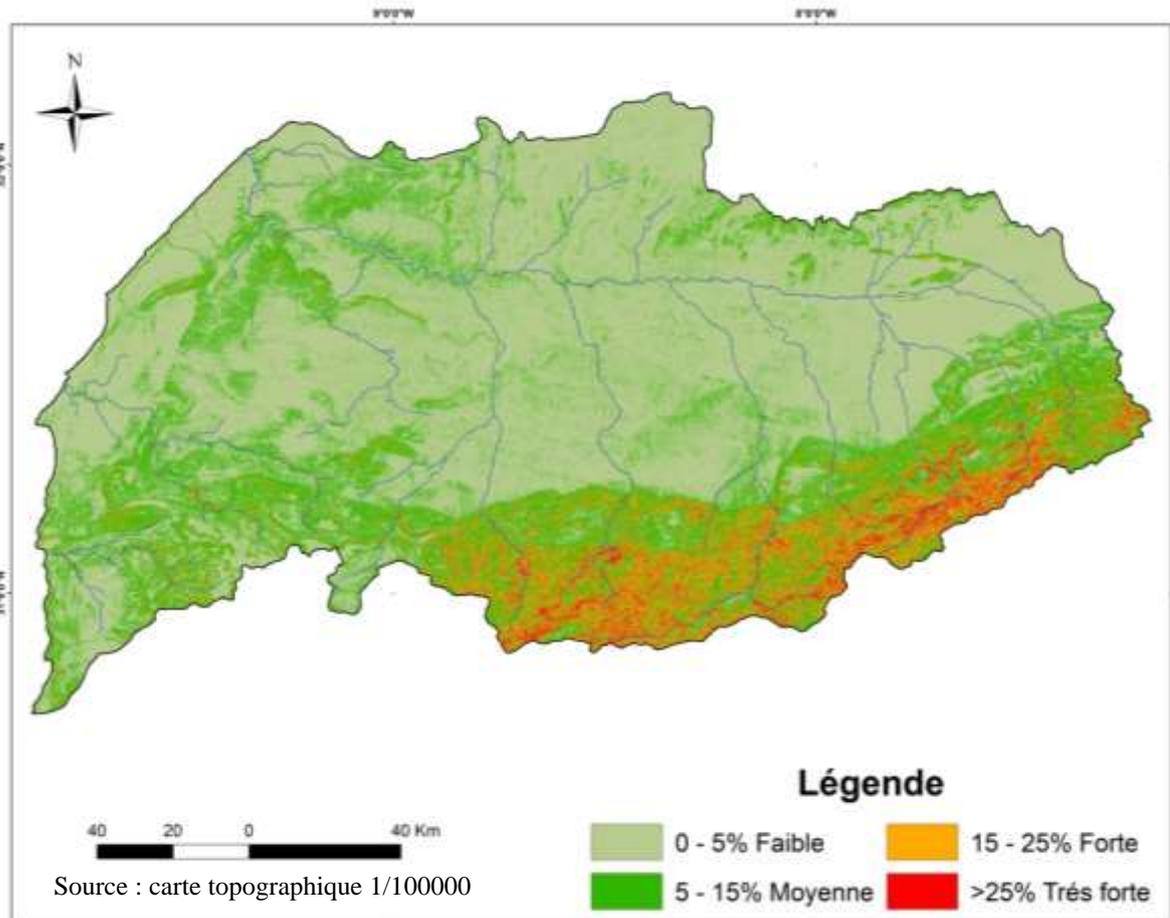
De nombreux auteurs s'accordent sur le fait que parmi tous les bassins du Maroc sud-atlasique, le bassin du Souss-Massa est le plus distinctement défini. Cette distinction est due à son environnement montagneux imposant qui l'entoure, avec le Haut-Atlas à l'embouchure nord et l'Anti-Atlas jusqu'à la plaine de Biougra. De plus, contrairement à d'autres bassins arides du Maroc tels que le Ziz, le Rheris, le Guir et le Draa, qui prennent leur source sur les versants sud-est du Haut-Atlas et de l'Anti-Atlas, le bassin du Souss-Massa s'étend dans une direction est-ouest et s'ouvre directement sur l'océan (ABHSM, 2009).

Cette région se compose donc d'une plaine, la vallée du Souss, et d'un massif montagneux environnant. La plaine du Souss, qui prend la forme d'un triangle ouvert vers l'océan, est principalement constituée de terrains récents, isolés entre les deux massifs montagneux, où prédominent des terrains paléozoïques (ABHSM, 2009). Le cadre montagneux environnant se divise comme suit :

- ✍ **Au nord** : la chaîne du Haut-Atlas, qui atteint son point culminant au Jbel Toubkal, à 4167 mètres, faisant de lui le sommet le plus élevé d'Afrique du Nord. La crête de cette chaîne marque la frontière entre le Maroc atlantique et le Maroc présaharien.
- ✍ **Au sud** : l'anticlinal bombé de l'Anti-Atlas occidental, où le socle cristallin affleure en de nombreux endroits, et où des formations rocheuses résistantes peuvent atteindre des altitudes considérables, culminant à 2531 mètres (Adrar n'Aklim).
- ✍ **À l'est** : une zone de transition, le Siroua, qui est un bombement cristallin fortement fracturé et recouvert de coulées éruptives tertiaires.



Carte 5 : Carte hypsométrique du bassin de Tensift.



Carte 6 : Carte des pentes du bassin versant de Tensift.

2. Le bassin versant de Souss-Massa :

Dans le bassin du Souss-Massa, la carte hypsométrique (carte 7) se présente sous forme de mosaïque, où se succèdent des zones de très hautes altitudes (dépassant 4000m) et des étendues planes peu élevées.

Le cadre montagneux du bassin de Souss-Massa est divisé en 7 classes d'altitudes, qui correspondent à trois massifs très différents, dans leur aspect et leur constitution :

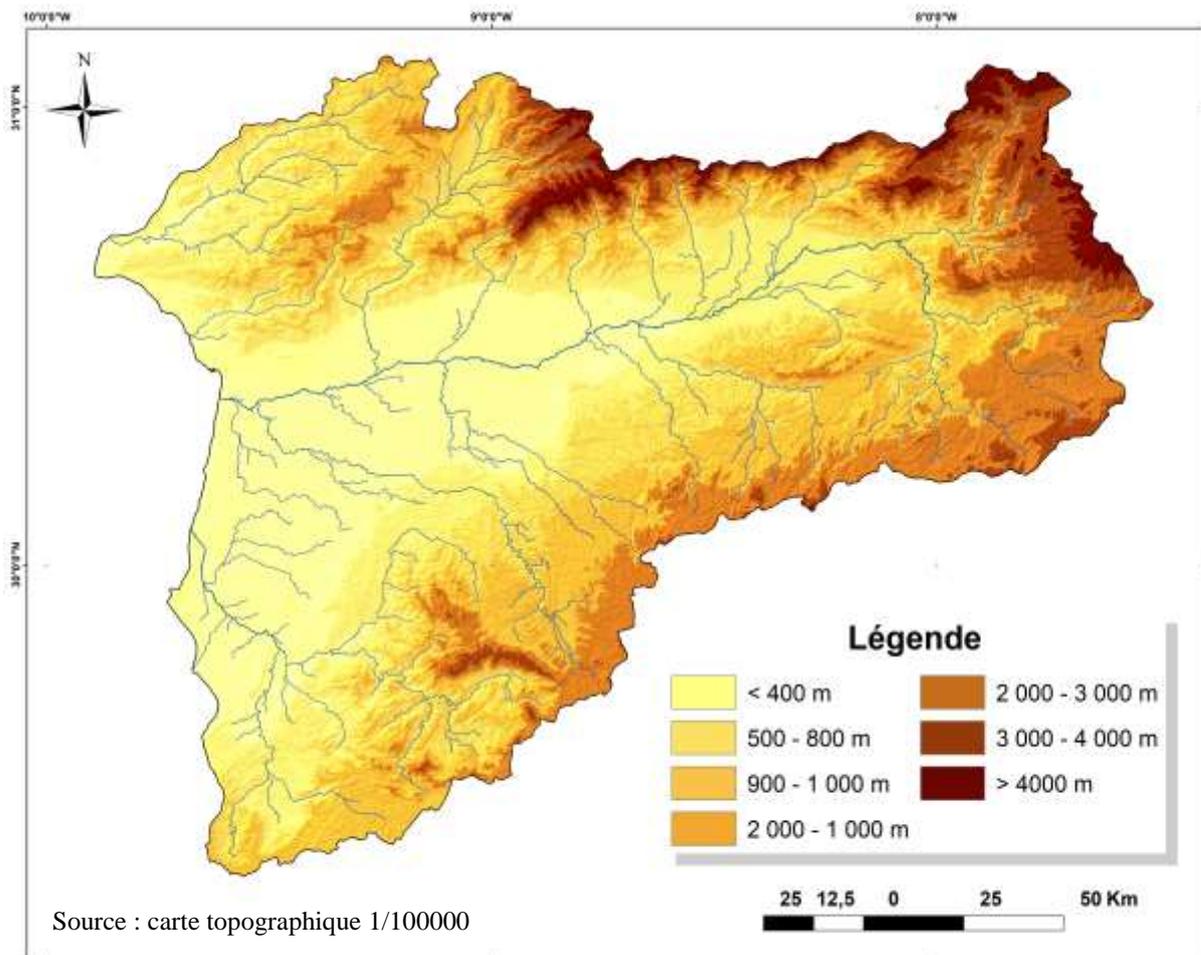
- ✍ **Le Haut-Atlas :** Au nord, le bassin commence par le Haut-Atlas, culminant au Jbel Toubkal à 4167 mètres, le plus haut sommet d'Afrique du Nord. Cette chaîne montagneuse présente un versant sud (bassin du Souss) beaucoup plus abrupt et étroit que son versant nord (bassin de Tensift). Les crêtes du Haut-Atlas occidental forment une ligne continue qui domine le versant sud, contribuant ainsi à maintenir un climat relativement clément dans la vallée malgré sa latitude désertique (ABHSM, 2009).
- ✍ **L'Anti-Atlas :** est un vaste massif montagneux moins élevé que le Haut-Atlas, mais il est fortement érodé. Cette zone présente diverses formations géologiques, notamment le Jbel Iguelguil (2320 mètres), les falaises de l'Adrar n'Aklim (2512 mètres, le point culminant de l'Anti-Atlas), le dôme du Fidoust (2200 mètres), la boutonnière des Ait Abdellah (2092 mètres) et l'arc puissant du Jbel Lkst (2500 mètres). L'altitude de la chaîne dépasse souvent 1800 mètres (ABHSM, 2009).
- ✍ **Le Siroua :** Situé entre le Haut-Atlas et l'Anti-Atlas, le Siroua est enneigé pendant plusieurs mois d'hiver et atteint une altitude de 3300 mètres. Ses pentes sont plus raides à l'ouest et au sud, où l'on trouve des vallées habitées. L'Anti-Atlas et le Siroua agissent comme une barrière protectrice contre les conditions climatiques sahariennes, préservant ainsi la vallée du Souss tout en modérant son climat. Cependant, contrairement au Haut-Atlas plus élevé, ils ne peuvent pas empêcher complètement le déplacement vers le nord des fronts chauds sahariens en été (ABHSM, 2009).
- ✍ **La plaine :** La plaine dans la région présente l'apparence d'une gouttière légèrement inclinée vers les piémonts montagneux, avec l'oued Souss qui a tracé son lit en formant un réseau de cours d'eau large dans la partie amont et moins encaissé dans la partie aval. Cette inclinaison de la plaine varie d'est en ouest, passant de 1 % près d'Aoulouz à 0,5 % près de Taroudant, puis à 0,3 % dans la partie aval. Sur une distance d'environ 150 km, de Aoulouz à l'océan, la dénivellation totale atteint 700 mètres (ABHSM, 2009).

En ce qui concerne l'hypsométrie, elle revêt une grande importance pour comprendre la topographie du bassin. La pente moyenne du cours d'eau est un facteur déterminant pour la vitesse à laquelle l'eau s'écoule vers l'exutoire du bassin, ce qui influe sur le temps de concentration. Plus la pente est élevée, plus l'eau de ruissellement s'écoule rapidement dans les affluents et le cours principal, ce qui signifie que le bassin réagit rapidement aux précipitations.

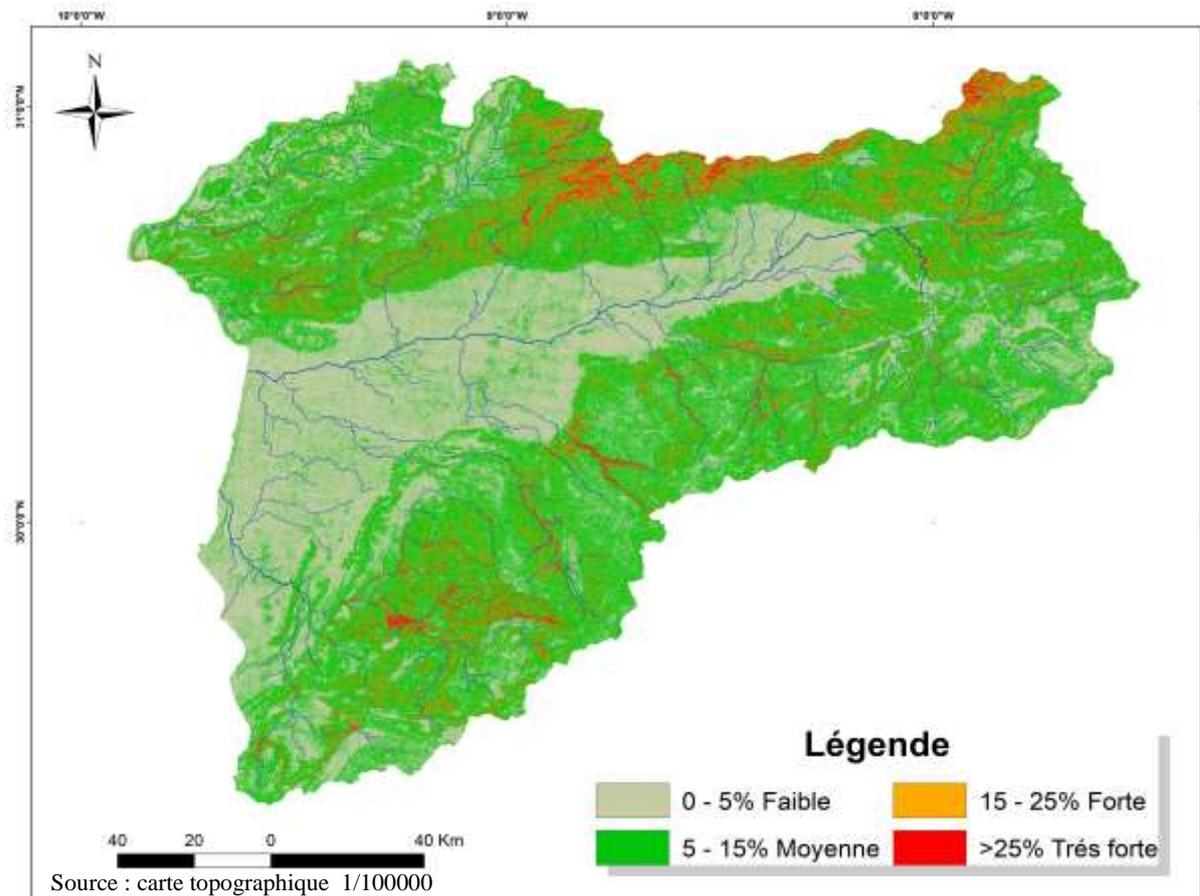
L'analyse de la carte des pentes (Carte 8) permet de distinguer trois grandes zones en fonction de la pente :

- ✓ Une zone montagneuse avec des pentes très raides (>25 %), située au sud et au nord des bassins de Tensift et de Souss-Massa, englobant les régions du Haut et de l'Anti-Atlas.

- ✓ Une deuxième zone avec des pentes moyennes (entre 15 % et 25 %) qui couvre la majeure partie des bassins, notamment à l'est, à l'ouest, et dans les régions côtières.
- ✓ Une troisième zone de plaine avec des pentes relativement faibles (<5 %) dans la partie centrale et au nord du bassin.



Carte 7 : Carte hypsométrique du bassin de Souss-Massa.



Carte 8 : Carte des pentes du bassin versant de Souss-Massa.

III. L'organisation du réseau hydrographique dans les deux bassins versants :

1. Dans le bassin versant de Tensift :

Le bassin du Tensift est principalement alimenté par des cours d'eau situés dans la région atlasique. Le réseau hydrographique de ce bassin est dominé par l'Oued Tensift, qui coule d'est en ouest depuis sa source jusqu'à son embouchure dans l'océan Atlantique. Cet oued draine environ les trois quarts du massif ancien du Haut Atlas par le biais de ses affluents situés sur la rive gauche. Ces affluents traversent un relief montagneux caractérisé par une structure géologique hétérogène, et ils ont généralement un régime torrentiel. Le bassin du Tensift peut être subdivisé en deux zones distinctes (P.D.A.I.R.E, 2009) :

- La zone du cours amont du Tensift et ses affluents de la rive gauche, couvrant une superficie d'environ 11 900 km². Cette zone joue un rôle essentiel dans l'écoulement des eaux de surface et représente la partie active du bassin du point de vue hydrologique.
- La zone du bas Tensift, qui comprend le cours aval de l'Oued Tensift et le bassin de l'Oued Chichaoua, s'étendant sur une superficie d'environ 7 900 km².

Les principaux affluents de l'Oued Tensift prennent leur source dans le Haut-Atlas et sont principalement situés sur la rive gauche. Ils contribuent de manière significative aux écoulements de surface du Tensift. Parmi ces affluents, on peut citer l'Oued Ghdat, l'Oued Zat, l'Oued Ghmat, l'Oued N'fis, l'Oued Reraya, l'Assif El Mal, l'Oued Chichaoua, l'Oued Tiroula et l'Oued Talmest. Le régime d'écoulement de l'Oued Tensift est irrégulier et dépend

étroitement de la pluviométrie dans le bassin ainsi que de la fonte des neiges dans le Haut-Atlas (voir carte 9).

Par ailleurs, il convient de noter que les ressources en eau dans le bassin hydrologique du Tensift Al-Haouz ne sont pas uniformément réparties. Les cours d'eau les plus importants prennent toute leur source dans le Haut-Atlas. Sur ce relief montagneux caractérisé par des structures et des natures géologiques variées, des écoulements de type torrentiel se produisent, qui sont collectés par l'Oued Tensift avant d'être acheminés vers l'océan. Les principales nappes aquifères de la région comprennent celles du Haouz, du Mejjat, de la Bahira et du bassin d'Essaouira Kourimate (P.D.A.I.R.E, 2009).

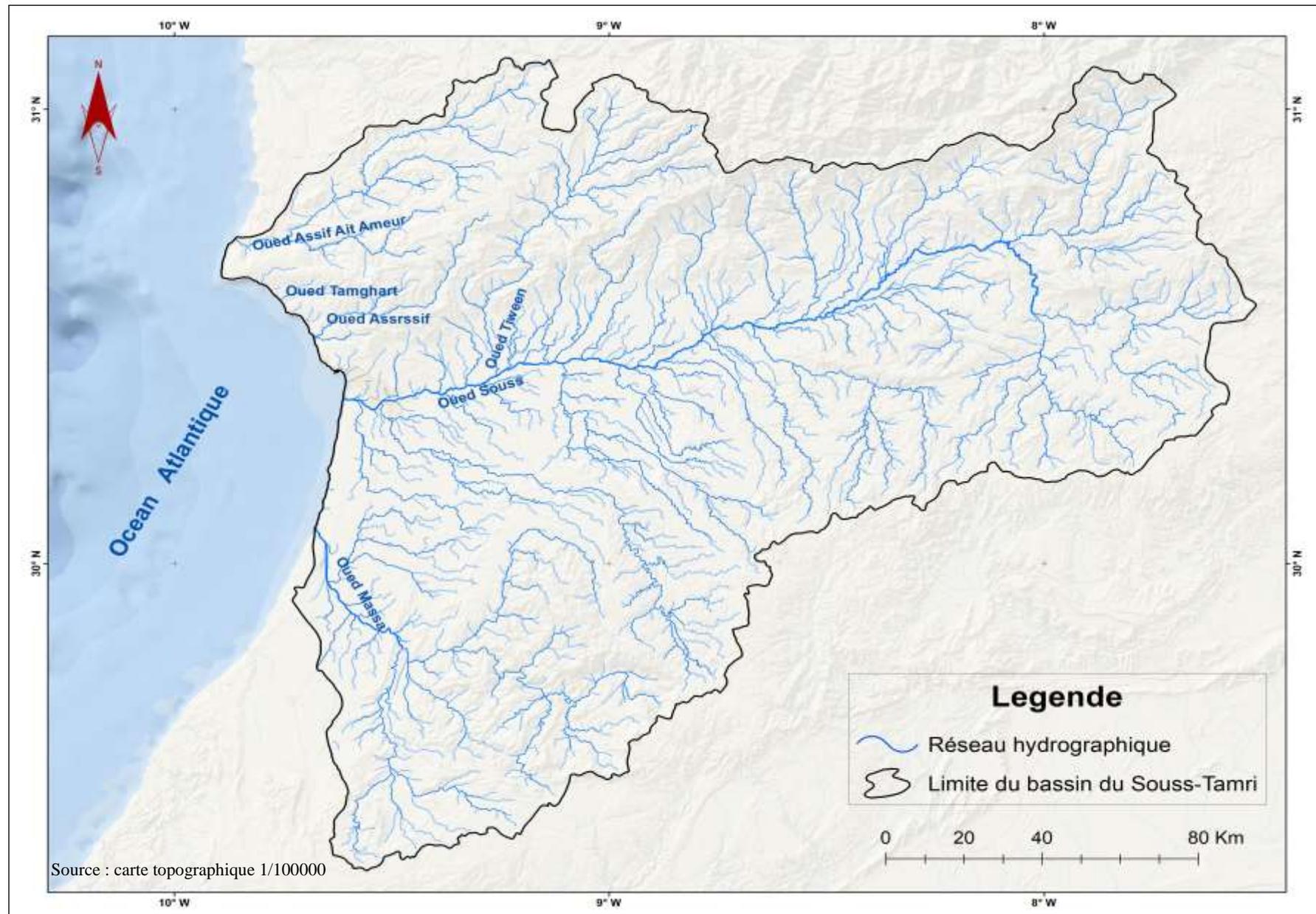


Carte 9 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Tensift.

2. Dans le bassin versant de Souss-Massa :

Le réseau hydrographique du bassin du Souss-Massa est principalement caractérisé par l'Oued Souss, qui traverse le bassin d'est en ouest, depuis sa source jusqu'à son embouchure dans l'océan Atlantique. Selon l'ABHSM (2009), ce bassin peut être divisé en quatre zones distinctes :

- ✍ **La zone d'amont :** Cette zone se situe en amont d'Aoulouz, où l'Oued Souss prend le nom d'Assif n'Iouzioua. Elle recueille les apports d'eau de trois principaux affluents : Tifnoute, Immerguène et Oumzaourou. La convergence de ces cours d'eau à l'amont d'Aoulouz entraîne la formation de gorges étroites et de crues violentes. Aoulouz marque un point important dans le bassin du Souss, car c'est là que le bassin reçoit une grande partie de ses apports en eau.
- ✍ **La zone haut-atlasique :** Cette zone s'étend d'est en ouest et est alimentée par plusieurs affluents issus du Haut-Atlas. Parmi ces affluents, on peut citer l'Oued Lemdad, l'Oued Bousriouil, l'Oued Targa, l'Oued Talekjounte, l'Oued Aguerd-el-Had (ou Nokheil), l'Oued Mentaga (composé de l'Assif n'Aït el Haj et de l'Oued l'Ouaar), l'Oued Assif n'Irguiten, l'Oued Béni M'hammed, l'Oued Menizla, Aoukourta et l'Oued Issen.
- ✍ **La zone sous-bassins rive gauche :** Les cours d'eau issus du versant nord de l'Anti-Atlas ne rejoignent pas tous l'Oued Souss, car ils traversent des bassins peu arrosés caractérisés par des plateaux calcaires. Parmi ces cours d'eau, on peut citer l'Oued Imaoun, l'Oued Aït Hosseïn, l'Oued Tangarfa, l'Oued Arrhène, l'Oued Merkh-Sdass, l'Assif Tiout, Assif Assadas et l'Oued Aouerga.
- ✍ **Le cours d'eau principal du Souss :** À partir de la station d'Aoulouz, où il termine son parcours montagneux, l'Oued Souss élargit considérablement son lit, se divisant en plusieurs bras, dont trois principaux qui encerclent des îles entre Aït M'barq et Tinikt, formant une largeur d'environ quatre kilomètres. Le bras le plus important se trouve au nord, et il contourne le cône de déjection avec des pentes douces ne dépassant pas 2 %. Sous la pression des affluents de la rive droite, l'Oued Souss est repoussé vers le sud jusqu'à Igli, où il commence à s'orienter vers l'ouest. Juste avant d'atteindre Freija, l'Oued Souss décrit un arc à forte courbure et s'oriente vers le sud. La largeur de son lit atteint environ un kilomètre dans cette région.



Carte 10 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Souss-Massa.

IV. Les caractéristiques géologiques des deux bassins versants :

Lors de l'analyse des bassins versants, il est essentiel de prendre en compte les caractéristiques géologiques, car elles ont une influence significative sur la répartition des écoulements superficiels. La géologie d'un bassin, notamment le type de formations géologiques qui affleurent, peut affecter la perméabilité du sol et donc la manière dont l'eau interagit avec le paysage (Moukhchane ,1983).. Voici une description des caractéristiques géologiques du bassin versant du Tensift :

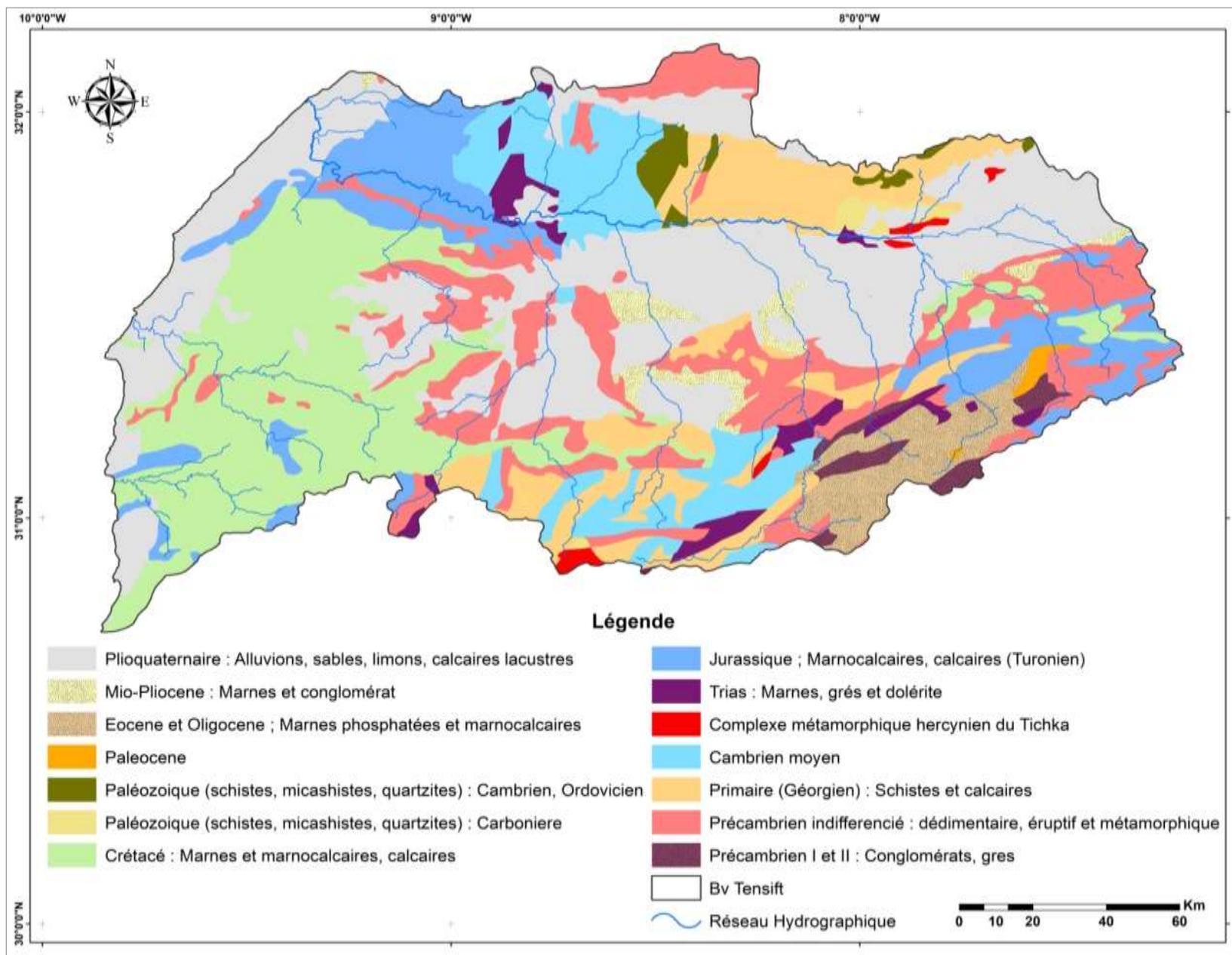
1. Le bassin versant de Tensift :

Le cadre géologique du bassin du Tensift est façonné par le socle primaire qui affleure dans le Haut Atlas, les Jbilet et les Rehamna. Ces formations géologiques se sont développées au fil des ères géologiques en réponse à des contraintes tectoniques, des phénomènes d'élévation et d'effondrement, ainsi que des périodes d'érosion et de sédimentation (Ambroggi et al, 1952).

En examinant la carte géologique du bassin du Tensift (Carte 11), on peut distinguer quatre zones géologiquement homogènes :

- ✓ La zone du Haut-Atlas : Cette région est principalement composée de formations géologiques de faible perméabilité. Cela signifie que le sol a une capacité limitée à permettre l'infiltration de l'eau, ce qui peut favoriser le ruissellement.
- ✓ La deuxième zone, au centre du bassin : Cette région est caractérisée par des formations géologiques du Néogène et du Quaternaire, qui ont une perméabilité moyenne. Cela signifie que le sol peut permettre une certaine infiltration de l'eau, bien que ce ne soit pas aussi efficace que dans les zones de perméabilité élevée.
- ✓ La troisième zone, au nord du bassin : Cette partie du bassin est composée de formations géologiques paléozoïques qui ont une perméabilité relativement faible. Cela peut entraîner un drainage limité des eaux superficielles et favoriser le ruissellement.
- ✓ La quatrième zone, à l'ouest du bassin : Cette région est principalement constituée de couvertures géologiques secondaires et tertiaires qui ont une très bonne perméabilité. Le sol dans cette zone peut permettre une infiltration efficace de l'eau.

En résumé, la géologie du bassin du Tensift est diversifiée, avec des zones de sols de différentes perméabilités. Cela a un impact direct sur la répartition des écoulements d'eau de surface, avec certaines zones favorisant l'infiltration et d'autres favorisant le ruissellement.



Carte 11 : Carte géologique du bassin de Tensift.

2. Le bassin versant de Souss-Massa :

La géologie joue un rôle essentiel dans la formation et la structure des bassins versants. Dans le cas du bassin du Souss-Massa, la limite entre le domaine atlasique et le domaine anti-atlasique est marquée par une vallée profonde qui se caractérise par l'opposition de deux grands massifs à matériel primaire, lithologiquement différents, encadrant une large plaine alluviale. Voici un aperçu de la géologie de chaque zone de ce bassin :

a. Dans le versant Nord de l'Anti-Atlas :

- ❖ **Précambrien** : Cette région comprend des terrains précambriens qui affleurent en boutonnières alignées selon un axe ENE-WSW. Les formations précambriennes sont classées en Précambrien 0, Précambrien II, et Précambrien II-III.
- ❖ **Infracambrien et Géorgien** : Cette zone comprend des formations infracambriennes et géorgiennes, notamment l'Adoudounien inférieur, l'Adoudounien moyen, l'Adoudounien supérieur et le Géorgien.
- ❖ **Acadien** : Cette zone présente des alternances de schistes et de grès qui affleurent sur les formations précédentes. Ces roches plus tendres constituent des zones déprimées propices à l'élargissement des vallées des oueds.
- ❖ **Quaternaire** : Le Quaternaire est caractérisé par des dépôts abondants, bien que généralement peu épais. On y trouve d'anciens sols développés dans les dépressions des plateaux calcaires et des thalwegs.

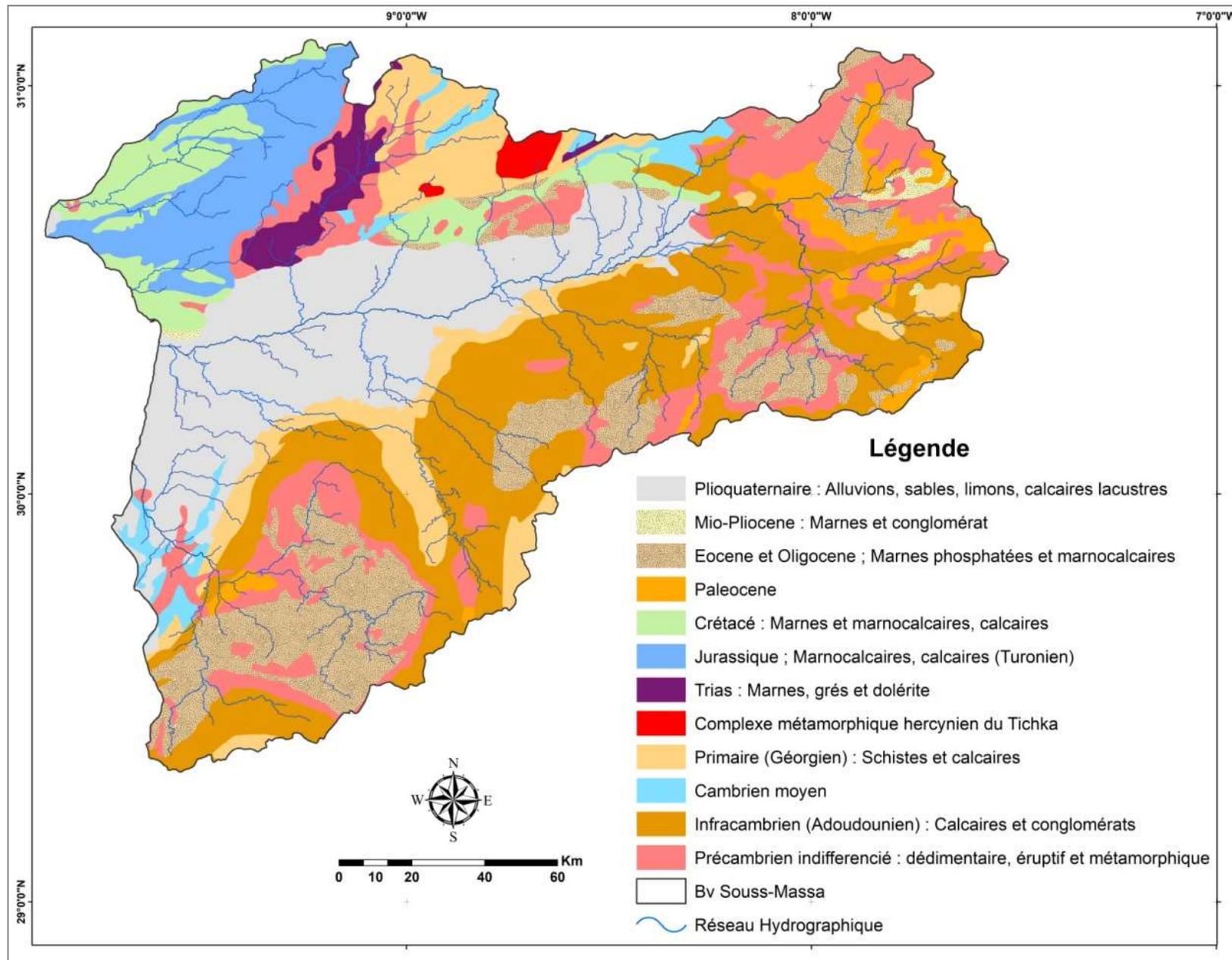
b. Dans le Haut Atlas :

Cette région est principalement constituée de roches éruptives précambriennes qui culminent au Jbel Toubkal, le point culminant de l'Afrique du Nord. Ces roches sont ensuite recouvertes par des formations cambro-ordoviciennes. Au nord du Haut-Atlas se trouvent les formations de l'Anti-Atlas. Entre le Haut-Atlas et l'Anti-Atlas se situe le massif volcanique du Siroua, qui est recouvert de coulées phonolitiques datant du Pontien et du Pliocène (ABHSM, 2003).

c. Dans la plaine du Souss :

Les formations géologiques de la plaine du Souss comprennent des dépôts de remplissage situés sous les alluvions et les limons quaternaires. Ces dépôts sont fluvio-lacustres, marno-calcaires et détritiques. Ils recouvrent des formations crétacées et éocènes qui forment un synclinal orienté d'est en ouest. Ces sédiments se sont accumulés dans le sillon subsident, qui s'est formé au sud du Haut-Atlas pendant le Néogène et le Quaternaire (Combe et al, 1972).

Ces informations géologiques contribuent à expliquer la topographie, la composition du sol et la distribution des eaux dans le bassin du Souss-Massa, ce qui est essentiel pour comprendre les processus hydrologiques de la région.



Carte 12 : Carte géologique du bassin de Souss-Massa.

V. La végétation dans les deux bassins versants :

1. Dans le bassin versant de Tensift :

La couverture végétale dans le bassin versant de Tensift est généralement pauvre. Les types de végétation varient selon l'altitude et la nature des terrains.

Forêts et végétation : Le bassin versant de Tensift présente une variété de types de végétation en fonction de l'altitude et de la nature des terrains. Les forêts de chêne à feuilles persistantes, comprenant des arbres comme l'Arganier, le Thuya et le Genévrier rouge, s'étendent sur la chaîne de montagnes de l'Atlas jusqu'aux collines de Rhamna, couvrant une superficie de 541 000 hectares. Ces forêts sont importantes en termes de biodiversité et de ressources écologiques.

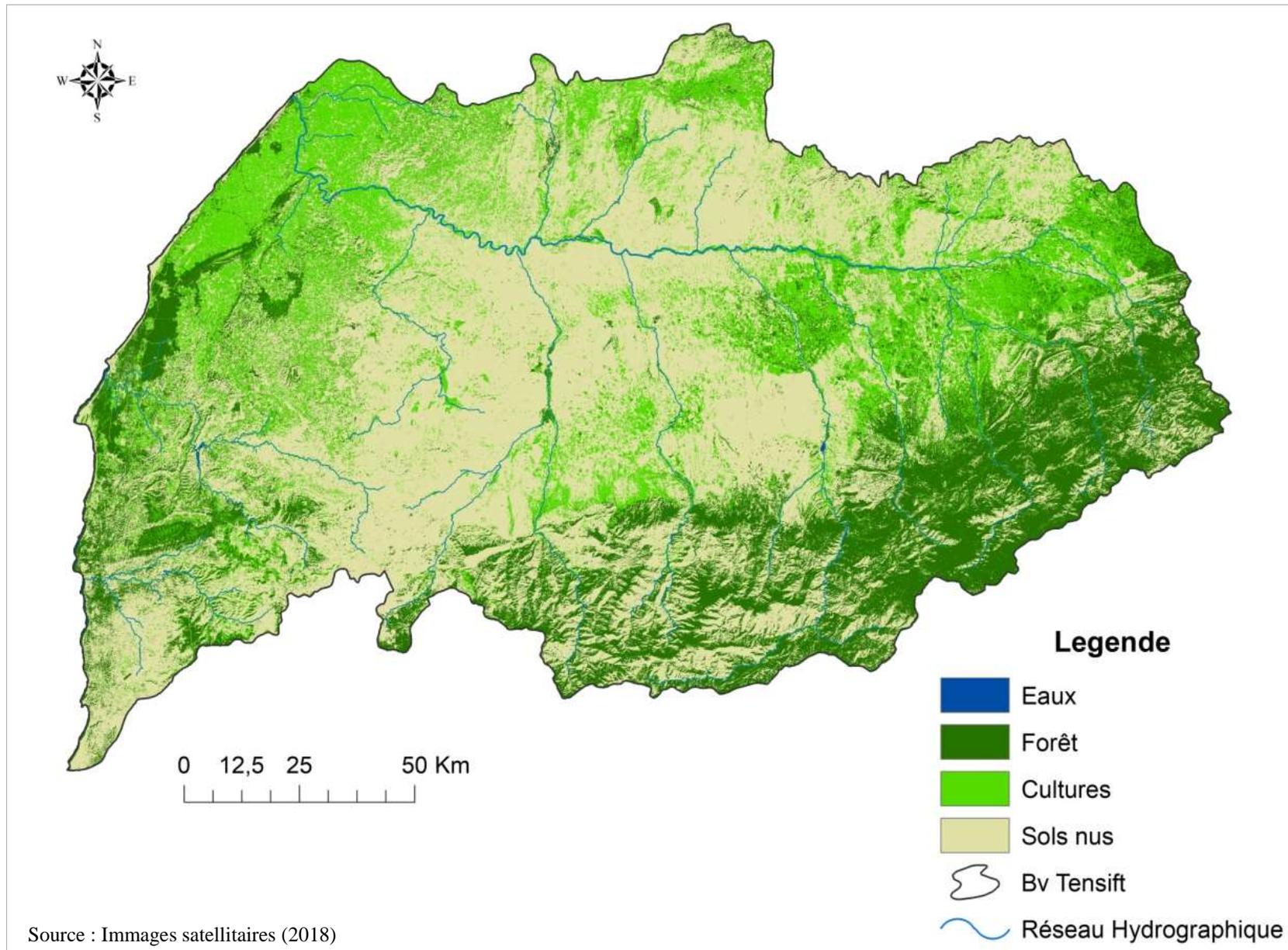
Végétation agricole : La région comprend également des zones cultivées avec une grande variété de cultures, notamment des céréales, des oliviers, des abricotiers, des orangers, des rosiers, des pommiers et des plantes fourragères. Par exemple, dans la province d'Al Haouz, une grande partie de la zone cultivée est occupée par des plantations d'arbres fruitiers (JICA, 2007).

A partir de la carte d'occupation des sols et de la végétation de la zone d'étude (carte 13), on peut distinguer 4 zones homogènes:

- ✓ Une région qui se caractérise par la densité végétale faible et ses plantes dispersées ;
- ✓ Une deuxième région, dans la partie centrale entourant la zone de Marrakech, avec une forte densité urbaine ;
- ✓ Une troisième zone dans la partie Nord caractérisée par ses prairies et ses forêts.
- ✓ Une quatrième zone dans la partie Ouest dans la plaine d'Essaouira qui se distingue par ses prairies et forêts et ses terres à usage agricole.

La forêt est peu répandue et présente principalement sur les piémonts. Elle est constituée de résineux, de quelques feuillus et de Genévrier thurifère en altitude. Au fond des vallées encaissées de l'Atlas, les terres sont cultivées (Haddani, 2012).

Ces informations sur la végétation et l'utilisation des terres dans le bassin de Tensift sont précieuses pour comprendre les interactions entre la couverture végétale, les activités humaines et le cycle hydrologique de la région.



Carte 13 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de Tensift.

2. Dans le bassin versant de Souss-Massa :

L'information que nous avons fournie sur la végétation dans le bassin du Souss-Massa illustre l'importante diversité biologique de cette région marocaine et met en lumière l'impact des différents domaines climatiques sur la répartition des espèces végétales.

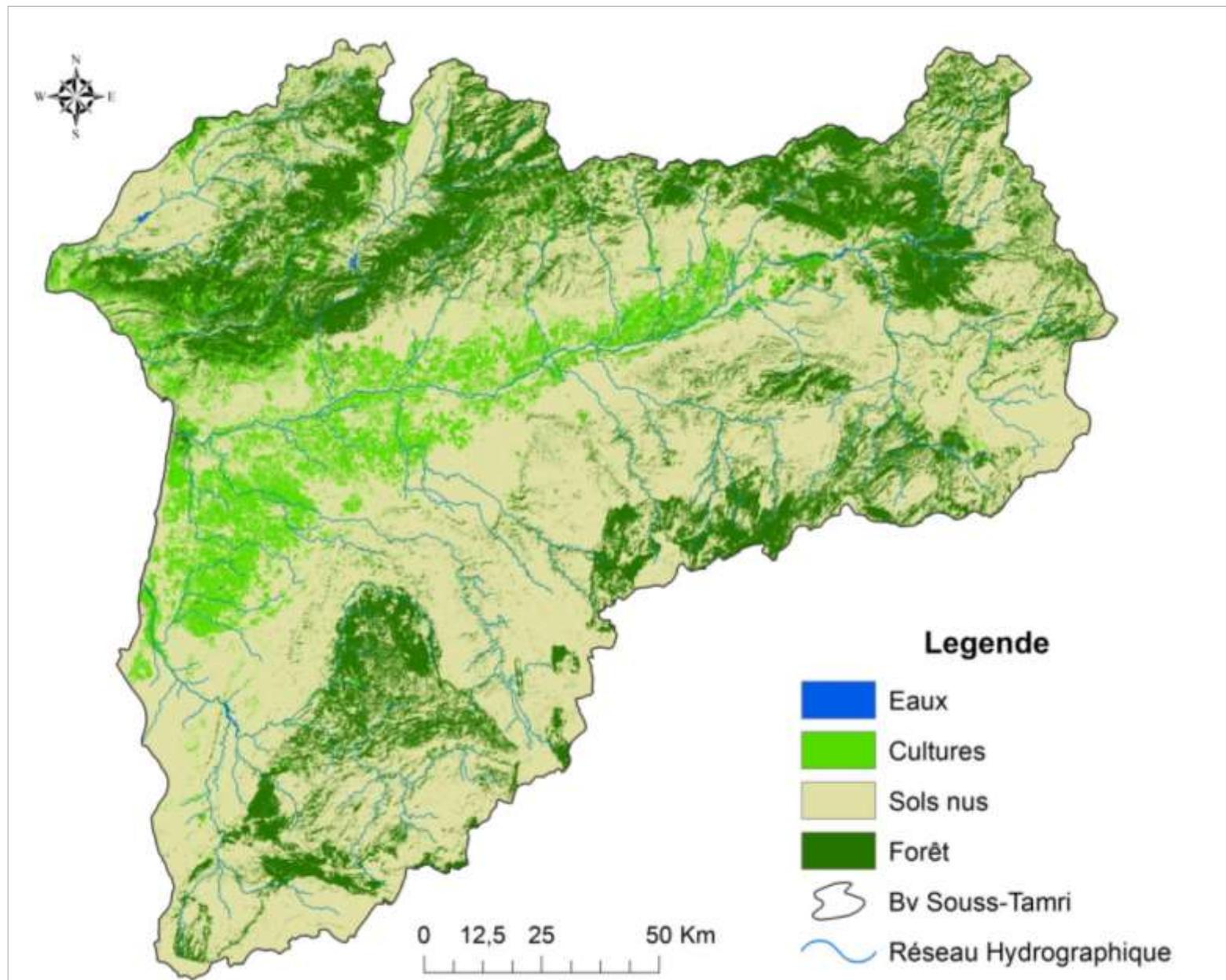
L'interférence de plusieurs domaines climatiques différents dans le bassin du Souss-Massa (méditerranéen, atlantique, saharien et de haute montagne), s'exprimerait avec évidence dans sa végétation. Celle-ci présenterait une sorte de mosaïque qui suivrait, dans une certaine mesure, les étages bioclimatiques du bassin. C'est ainsi que, l'Arganier -par exemple- occupe l'étage aride, le Thuya l'étage semi-aride et le Chêne-vert l'étage subhumide. Quand ces arbres disparaissent (généralement sous l'action de l'homme), l'étage se caractérise par des végétaux ligneux buissonnants, notamment, les Euphorbes cactoides, en milieu aride et vers les zones côtières, et le Palmier nain, dans l'étage semi-aride. Les forêts sont partout dégradées et clairsemées. L'Arganeraie constitue le peuplement arboré, le plus important et le plus étendu. Par ailleurs, la formation naturelle la plus répandue dans l'étage aride est la steppe, constituée de quelques graminées, buissons ou plantes épineuses (Saidi, 1995).

L'Arganeraie couvre la plupart des versants montagneux proches de l'océan, ou exposés à son influence, jusqu'à une altitude pouvant dépasser 1500 m ; et aussi, dans la plaine du Souss, surtout dans sa partie aval, où il forme des forêts : forêt d'Ademine, à l'Est d'Aït Melloul, ou la forêt des Haffaïa plus à l'Est. « *Argania spinosa* » est une espèce endémique, appartenant à la famille des sapotacées, "c'est l'arbre le plus remarquable du Maroc, tant par son intérêt botanique que par sa valeur économique, sa qualité de genre monotype, sa morphologie archaïque et son isolement géographique, affirment sa haute ancienneté" (Emberger, 1955).

Par ailleurs, le Thuya est assez répandu sur les versants Sud du Haut-Atlas, et quelques rares secteurs de l'Anti-Atlas occidental. Ce conifère caractérise l'étage semi-aride. Le Génévrier et le Chêne vert sont rares, on les trouve en très haute altitude (1500 à 2000 m) dans les étages subhumides et humides. Enfin, dans le lit de l'oued Souss, on rencontre souvent le Laurier rose ou parfois des Tamaris (Saidi, 1995).

Il faut signaler que la dégradation des peuplements forestiers, en particulier l'Arganier, avait, et a encore, pour cause, l'augmentation de la population qui provoque la destruction des arbres et des buissons, pour le bois, le surpâturage, ou même, pour mettre en place des constructions diverses. Ceci entraîne l'érosion des sols, la baisse des nappes et la disparition de nombreuses plantes (Peltier, 1982).

Cette description de la végétation dans le bassin du Souss-Massa souligne l'importance de la préservation de ces écosystèmes diversifiés et des mesures de conservation pour lutter contre la dégradation continue de la végétation due à des activités humaines et aux pressions environnementales.



Carte 14 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de Souss-Massa, (images satellitaires, 2018).

VI. Contexte climatique général, des deux bassins versants :

Le climat de la zone d'étude en général est caractérisé par l'influence de l'Atlantique, cette influence diminue d'autant plus que l'on s'éloigne vers l'intérieur. La zone d'étude est également influencée par la présence du Haut-Atlas. La zone est dotée d'un climat aride ou semi-aride en général, et humide dans l'Atlas (entre 1500 m et 2000 m d'altitude). Le caractère semi-aride est atténué par la proximité de l'océan Atlantique et l'influence du courant froid des Canaries, ainsi que par la protection contre les vents du Sud assurée par l'Anti-Atlas (CSEC, 2001).

1. Contexte climatique général, dans le bassin versant du Tensift :

1.1. Précipitations et températures :

Les précipitations sont en général faibles et caractérisées par une grande variabilité spatio-temporelle. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 200 mm dans la plaine, tandis qu'elle dépasse les 800 mm sur les sommets de l'Atlas. Le nombre de jours de pluie par an varie entre 25 et 50 dans les zones côtières et la plaine du Haouz, et entre 45 et 70 dans la région montagneuse (Boudhar, 2009).

À l'inverse des précipitations, la température est un facteur climatique beaucoup plus régulier à l'échelle temporelle. Les écarts entre les températures journalières sont assez importants, avec une maximale d'environ 45°C dans la plaine et une minimale de 17°C en montagne. Les températures moyennes mensuelles varient entre 13°C et 28°C dans la plaine et entre 2°C et 18°C en haute montagne. Les mois les plus chauds sont généralement juillet et août, tandis que le mois le plus froid est janvier (Boudhar, 2009).

Le régime climatique du bassin versant de Tensift est caractérisé par une grande aridité, dont l'intensité est principalement conditionnée par l'altitude, et dans une moindre mesure, par la continentalité.

De plus, le contraste saisonnier est très marqué. Les pluies se concentrent généralement pendant la période automnale et hivernale, étant irrégulières, intenses et violentes. Le reste de l'année, la sécheresse prend une ampleur considérable, surtout dans les zones de plaine où les températures et l'évaporation sont élevées (CID, 2004).

Ainsi, la climatologie du bassin versant du Tensift se caractérise par un climat semi-aride de type continental. Les amplitudes thermiques sont assez importantes, avec une température maximale atteignant jusqu'à 45°C en été et une température minimale descendant à 5°C en hiver.

La pluviométrie moyenne est faible, variant de 250 à 350 mm par an en plaine. Cependant, il existe d'importantes variations interannuelles et inter-saisonnières. À des altitudes dépassant 1000 mètres, la pluviométrie est plus importante, pouvant varier entre 300 et 700 mm par an.

1.2. Évaporation :

L'évaporation moyenne annuelle varie de 1800 mm sur le versant atlasique à 2600 mm dans la plaine du Haouz. Son point minimal se situe en décembre et janvier, tandis que son maximum survient pendant les mois d'été. Environ 50% de l'évaporation totale se produit au cours des quatre mois de juin à septembre (ABHT, 2014).

1.3. Vents :

La région est soumise à l'influence de deux principaux types de vents : le Chergui, un vent chaud et sec venant de l'Est, et le vent du Sud, également chaud et sec, ainsi que le Gharbi, un vent humide porteur de pluie qui souffle depuis l'Ouest.

2. Contexte climatique général dans le bassin versant de Souss-Massa :

2.1. Précipitations et températures :

Les précipitations dans le bassin du Souss-Massa présentent une grande variabilité à la fois en termes d'espace et de temps. Les moyennes annuelles varient de 600 mm au nord, sur les sommets du Haut-Atlas, à seulement 150 mm au sud, dans la partie orientale de l'Anti-Atlas. La plaine reçoit en moyenne environ 200 mm de pluie (ABHSM, 2005).

En ce qui concerne les températures, les moyennes annuelles varient de 14°C dans le Haut-Atlas au nord à 20°C dans l'Anti-Atlas au sud. Les températures maximales quotidiennes peuvent atteindre jusqu'à 49°C, tandis que les minimales descendent parfois jusqu'à -3°C. La région bénéficie d'environ 3000 heures d'ensoleillement par an (CSEC, 2001).

L'aridité augmente à mesure que l'on se déplace vers l'aval du bassin, et dans certaines zones caillouteuses, sableuses et désertiques, les écoulements d'eau peuvent disparaître. Dans le cas du Souss, l'aridité est particulièrement prononcée au sud-est du bassin, où toute la moitié méridionale du bassin amont d'Aoulouz est fortement touchée par la sécheresse par rapport à la partie aval du bassin (ABHSM, 2005).

2.2. Évaporation :

L'évaporation moyenne annuelle varie entre 1400 mm en montagne et près de la côte Atlantique, et 2000 mm en plaine. Le minimum est enregistré au mois de Janvier avec en moyenne 35 mm en montagne et 100 mm en plaine, tandis que le maximum est enregistré en Juillet avec en moyenne de 240 mm en montagne et 270 mm en plaine (CSEC, 2001).

2.3. Vent :

Le bassin du Souss-Massa est soumis à deux types de vents dominants. Les vents d'est, connus sous le nom de "Chergui", sont des vents chauds et desséchants. Ils se manifestent généralement de la fin du printemps jusqu'au milieu de l'automne, apportant sécheresse et températures élevées. Leur origine réside dans la combinaison de hautes pressions en Méditerranée et de l'extension vers le nord de la dépression saharienne. Ces vents peuvent souffler de manière constante ou sous forme de rafales violentes, en fonction du gradient barométrique (ABHSM, 2005).

Les vents d'ouest proviennent de l'océan Atlantique et génèrent une brise marine. Leur impact climatique est plus marqué dans la zone côtière, s'étendant jusqu'à environ 25 à 30 km à l'intérieur des terres. Les effets de ces vents dépendent de leur direction. Ils peuvent accentuer ou atténuer le degré d'aridité de la région en fonction de leur origine. Sur le plan topographique, ils contribuent à la formation de dunes côtières et de sebkhas dans les zones déboisées, notamment au sud de Taroudant (Saidi, 1995).

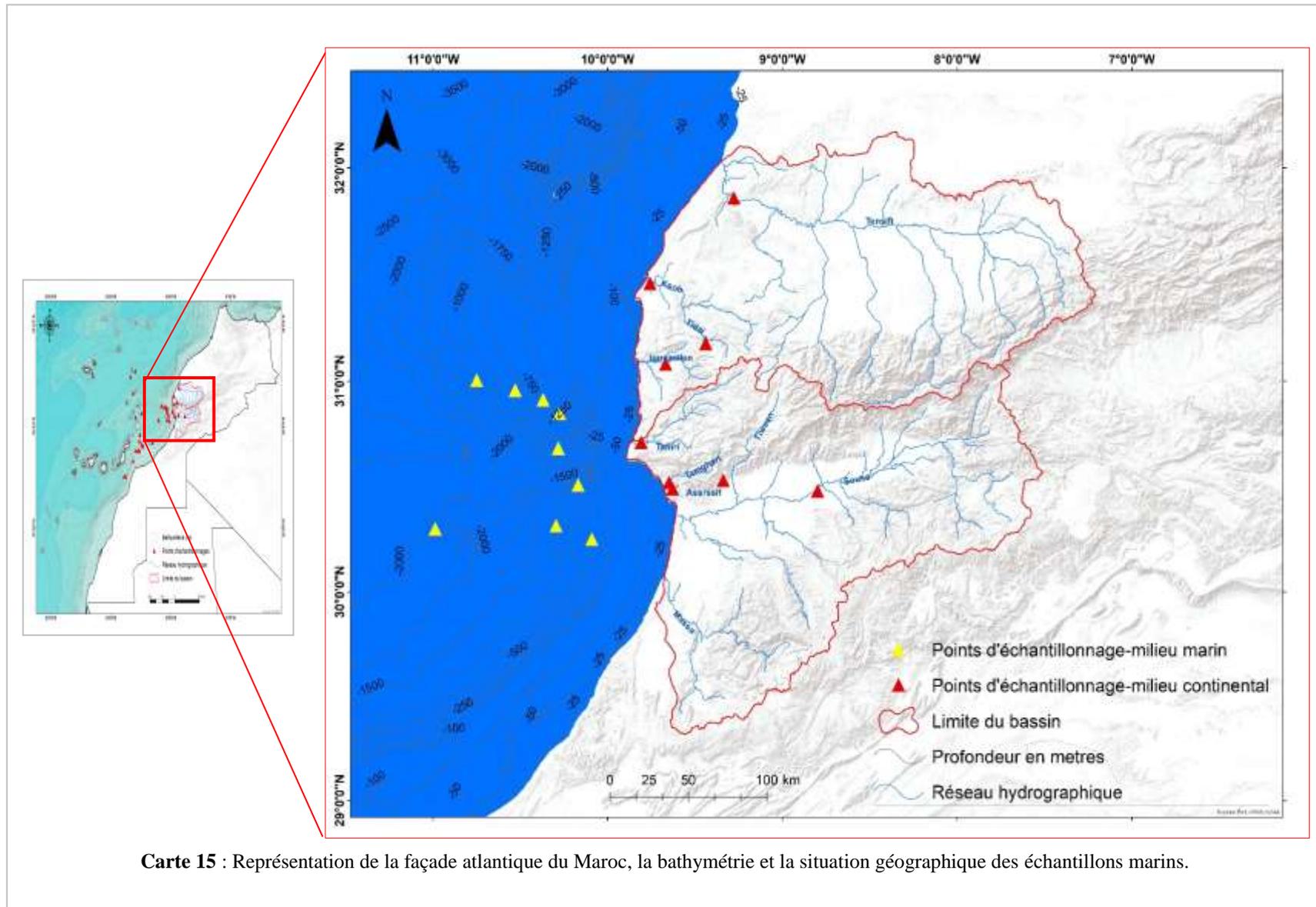
En résumé, il est important de noter que les deux bassins versants, chacun ayant ses caractéristiques distinctes, jouent un rôle essentiel dans le régime climatique de leur région respective.

AXE 2 : Description générale du domaine marin : la côte atlantique au Sud-Ouest du Maroc (30°-31°N et 10°-11°O).

I. La côte atlantique marocaine : localisation et présentation :

L'océan, qui couvre 71% de la surface de la Terre, joue un rôle essentiel en tant que régulateur du climat mondial. Ses échanges constants avec l'atmosphère sont cruciaux pour le maintien de la vie sur notre planète. En outre, l'océan joue un rôle crucial dans l'absorption du dioxyde de carbone (CO₂) émis par l'activité humaine, absorbant plus de 25% des émissions annuelles de CO₂, et il est également le principal fournisseur d'oxygène pour notre planète, ce qui en fait une ressource tout aussi vitale que nos forêts (Benzakour, 2000).

La côte atlantique marocaine étudiée se situe au Sud-Ouest du Maroc, entre les coordonnées 30°-31°N et 10°-11°O (voir carte 15). Cette région côtière est reconnue comme l'une des zones maritimes les plus riches en ressources biologiques exploitables. Ces ressources sont classées en trois catégories en fonction de leurs caractéristiques bioécologiques et de leur importance socio-économique : les ressources pélagiques, démersales et les grands migrateurs (INRH, 2014). En outre, la côte atlantique marocaine joue un rôle crucial dans le climat du Maroc et revêt une importance significative en tant qu'archive climatique précieuse.



Carte 15 : Représentation de la façade atlantique du Maroc, la bathymétrie et la situation géographique des échantillons marins.

L'océan Atlantique, qui communique avec la Méditerranée par le détroit de Gibraltar dans l'extrême Nord, s'étend le long de la côte marocaine sur une distance linéaire de 2934 km, allant du cap Spartel à Lagouira. Cette vaste étendue latitudinale, s'étendant de 35°N à 16°N, modère les influences océaniques et marque la transition entre le climat tempéré et tropical. L'océan Atlantique joue ainsi un rôle essentiel dans le transport des perturbations provenant de l'Arctique (Benzakour, 2000).

En hiver, le Maroc reçoit les bordures des perturbations qui atteignent sa façade atlantique lorsque le système anticyclonique des Açores se déplace vers le Sud. Ces systèmes anticycloniques mobiles polaires (AMP) qui parcourent l'océan avant d'atteindre le Maroc sont généralement moins puissants et se caractérisent par des températures plus douces que ceux venant de l'Est. L'océan Atlantique constitue également la principale source d'humidité pour le Maroc (Karrouk, 2003).

Les Anticyclones Mobiles Polaires (AMP) sont de vastes masses d'air froid et dense en pression relative et absolue, résultant du refroidissement et de l'affaissement de l'air au-dessus des régions polaires. Les AMP les plus puissants peuvent atteindre une pression de 1050 hPa, avec une épaisseur moyenne d'environ 1500 m et un diamètre moyen de 2000 à 3000 km (Leroux, 2000).

L'influence prépondérante de l'océan sur le climat des régions avoisinantes, bien que sujette à des débats, a été largement étudiée, comme le résume Bryan (1962). L'océan, en contact direct avec l'atmosphère sur 71% de la surface de la Terre, entretient une relation constante d'échanges d'énergie, d'eau et de dynamique éolienne avec la troposphère. Il joue donc un rôle clé dans la variabilité climatique à différentes échelles temporelles. De par sa capacité de stockage élevée (1200 fois celle de l'atmosphère), il influe sur le climat à l'échelle séculaire en stockant de l'énergie dans ses couches profondes. Les courants marins de surface contribuent, quant à eux, à moduler les variations climatiques à court terme, notamment les fluctuations climatiques quotidiennes, saisonnières et annuelles (Merle, 2006).

L'atmosphère, de son côté, influence la dynamique océanique superficielle par le biais de l'activité éolienne. La combinaison de la force du vent et de l'effet de Coriolis génère des déplacements horizontaux dans les couches superficielles de l'océan. Ce processus enclenche d'autres mécanismes, donnant lieu à des phénomènes océano-atmosphériques locaux voire régionaux, tels que l'upwelling côtier qui influence fortement le climat de la côte marocaine (Caroli, 1999).

1. La topographie du plateau continental :

Le Maroc s'étend le long de 2934 km de côte atlantique, depuis le Cap Spartel jusqu'à Lagouira (Gaadi, 2000). La profondeur moyenne au point où la pente du plateau continental rencontre le talus est d'environ 103 mètres, ce qui est considéré comme relativement peu profond (Caroli, 1999). Cependant, le plateau continental présente de nombreuses dépressions de grande profondeur. Les isobathes, qui sont des lignes représentant des profondeurs égales, dessinent généralement des motifs réguliers et parallèles à la côte. Il convient de noter une exception dans la zone située entre le Cap Ghir et le Cap Bojador, où le plateau continental s'élargit, et les isobathes évoluent vers le large dans une structure plus complexe.

La pente de la plate-forme continentale est généralement douce et régulière jusqu'à atteindre une profondeur d'environ -150 mètres, après quoi elle devient nettement plus accentuée, descendant rapidement à des profondeurs de 200 à 300 mètres. Les pentes les plus marquées se trouvent notamment entre El Jadida et le Cap Ghir, entre le Cap Juby et le Cap Bojador, ainsi qu'au Cap Timiris (Amraoui, 2013).

2. La bathymétrie :

La topographie de la côte atlantique marocaine présente une grande diversité, ce qui influe sur la circulation des eaux le long de la côte et crée des variations locales dans les vents. Cela a un impact significatif sur la dynamique de l'upwelling côtier, qui est une caractéristique climatique essentielle de la côte atlantique marocaine (INRH, 2014).

La ligne côtière montre une succession de segments rectilignes avec des orientations variables. Ces changements d'orientation sont marqués par la présence de caps et de baies, ainsi que par des reliefs qui se prolongent jusqu'au littoral et sont en continuité avec les montagnes de l'Atlas. Par exemple, dans la région située entre le Cap Ghir et Agadir, le relief montagneux se prolonge jusqu'à la côte (Atillah, 1993).

La côte commence au nord avec le Cap Spartel ($35^{\circ} 47' 13''$ N), puis se succèdent le Cap Jorf-el-Asfar ($33,2^{\circ}$ N), le Cap Cantin ($32,54^{\circ}$ N), le Cap Hadid ($31,7^{\circ}$ N), le Cap Sim ($31,39^{\circ}$ N), le Cap Tafelney ($31,10^{\circ}$ N), le Cap Ghir ($30,63^{\circ}$ N), le Cap Juby ($27,90^{\circ}$ N), le Cap Bojador ($26,8^{\circ}$ N), le Cap Blanc ($21,45^{\circ}$ N), le Cap Barbas ($22,20^{\circ}$ N), et le Cap Timiris ($19,45^{\circ}$ N). Chaque cap est suivi d'une baie abritée des vents du nord et du nord-est, ainsi que de la houle venant de l'océan. Au Maroc, on peut citer des exemples tels que la baie de Sidi Moussa, la baie de Safi, la baie d'Agadir (Debenham et al, 1983).

3. La circulation océanique :

L'étude de l'upwelling, ou des remontées d'eau froide le long des côtes marocaines, revêt une grande importance. Cette région est l'une des quatre zones mondiales où ce phénomène est particulièrement influent, ce qui la rend riche en ressources halieutiques. Au cours des 25 dernières années, de nombreuses recherches ont été menées pour mieux comprendre cet upwelling côtier, à la fois par des observations sur le terrain et par la modélisation (Hagen, 2001).

Le Courant des Canaries, qui constitue la branche orientale du gyre subtropical atlantique, longe les côtes marocaines jusqu'aux environs du Cap Blanc en été, et jusqu'aux côtes sénégalaises en hiver. Les eaux transportées par ce courant se mélangent avec des eaux plus chaudes remontant vers le nord le long de la côte sénégal-mauritanienne (Atillah, 1993).

Ce courant, qui se déplace vers le sud-ouest, se situe généralement entre la surface et une profondeur de 500 mètres. Sa vitesse moyenne est d'environ 0,5 nœud, mais elle peut parfois atteindre 2 nœuds lorsque les vents soufflent du nord ou du nord-est. Sa largeur peut atteindre jusqu'à 1000 km, et son débit est d'environ 16,106 mètres cubes par seconde. Ce courant est caractérisé par sa fraîcheur, avec des températures de l'ordre de 18°C en plein été, car il provient de régions plus septentrionales et se nourrit en partie des remontées d'eau profonde qui se produisent au large des côtes marocaines (Orbi et al, 1998).

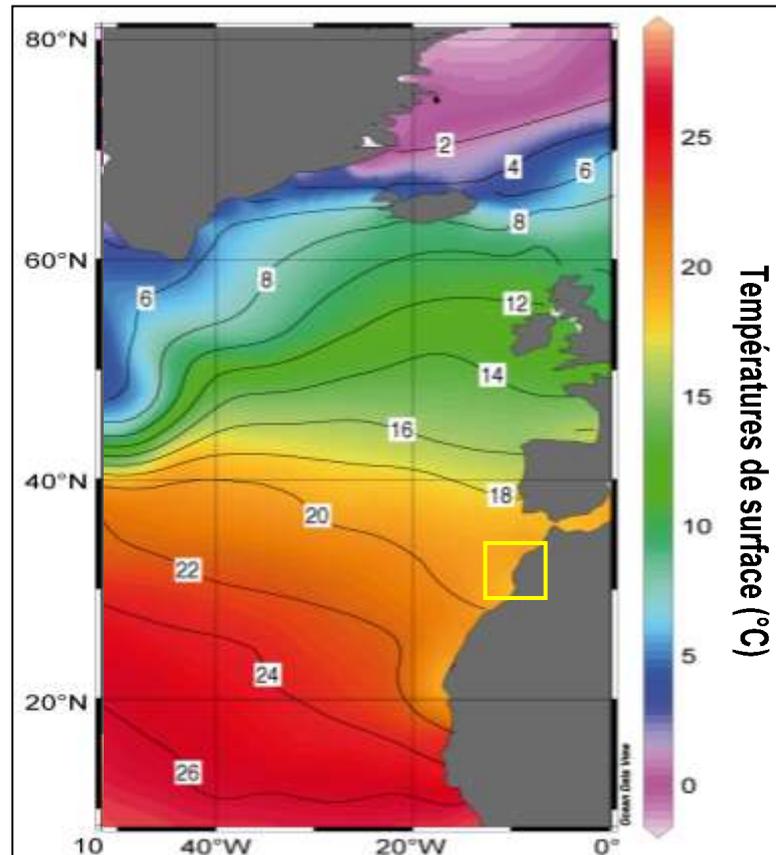


Figure 3 : Températures de surface de l'océan Atlantique dans l'hémisphère Nord. Le transfert de chaleur depuis l'Équateur vers les hautes latitudes est assuré par le courant de surface, formé d'eaux chaudes et salées. Figure créée avec Ocean Data View d'après les données WOCE et GEOSECS.

Sous l'action de la force de Coriolis, les vents (notamment les Alizés) présentant une composante parallèle à la côte dirigée vers l'équateur provoquent la migration des eaux de surface vers le large (dérive d'Ekman) et la remontée d'eaux profondes froides (Orbi et al, 1998). L'intensité du courant se déplaçant vers l'équateur diminue rapidement sous la surface marine, atteignant environ 100 mètres de profondeur. Le jet instable se sépare de la côte, créant ainsi des méandres, des tourbillons et des filaments, avec une organisation horizontale et verticale très sensible aux interactions entre les instabilités à l'échelle méso et subméso (Marchesiello et al, 2003).

Un contre-courant dirigé vers le pôle Nord peut apparaître en surface lorsque les vents se relâchent près de la côte. Le déplacement méridional des Alizés engendre un « upwelling » saisonnier aux extrémités Nord et Sud de la région étudiée, tandis que la zone centrale est caractérisée par un upwelling continu tout au long de l'année (Nykjaer et al, 1994).

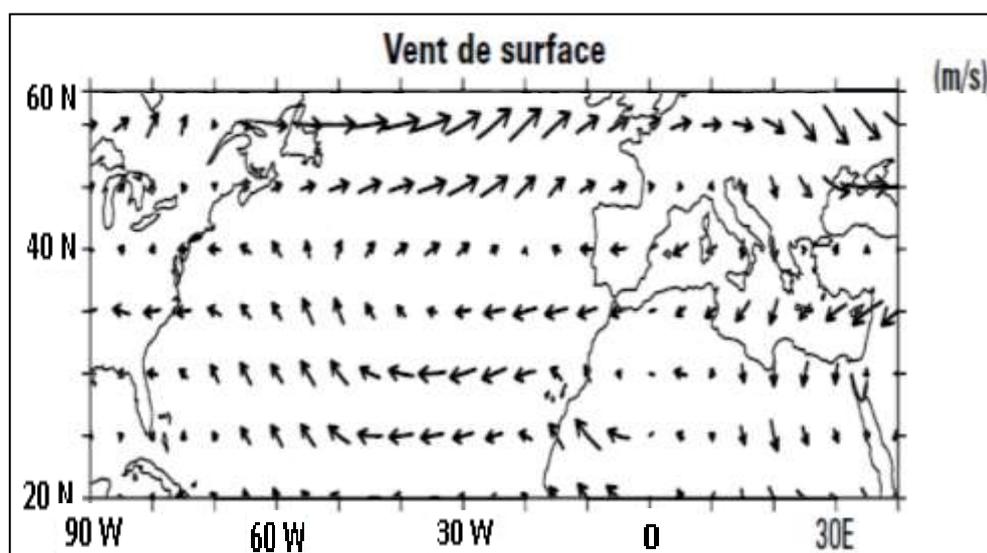


Figure 4 : Différence de vent au niveau 1000 hPa (m/s) sur vingt années en Hiver (mois de Décembre à Février) de la période 1980-1999 ; Les données proviennent des réanalyses NCEP (Kalnay et al, 1996).

II. Aperçu sur les courants généraux de la côte atlantique marocaine :

La situation géographique de la côte du Maroc par rapport au courant des Canaries lui confère le privilège d'être influencée par l'un des cinq courants mondiaux générateurs d'upwelling : le courant de Californie, le courant du Pérou, le courant des Canaries, le courant de Benguela et le courant de Somalie (Orbi et al, 1997).

Sur la côte atlantique du Maroc, les conditions propices aux mouvements ascendants sont réunies : (i) une orientation adéquate par rapport à la côte et la stabilité des vents dominants, (ii) une localisation en dehors des latitudes équatoriales (car la force de Coriolis ne doit pas être négligée pour assurer la dérive vers le large). La remontée des eaux froides se manifeste par l'apparition de taches d'eau froide près de la côte. Les isothermes forment un panache caractéristique à partir du centre de remontée, dont l'axe suit la dérive des eaux de surface (Van Camp et al, 1994).

1. Courant des Canaries :

À côté des courants provoqués par l'oscillation des marées (courants de marée), qui se manifestent surtout près des côtes en raison de l'attraction de la lune et du soleil, il existe d'énormes déplacements de masses d'eau à l'échelle mondiale, constituant les grands courants océaniques (Jones et al, 1970).

Au large de la côte marocaine, ces grands courants océaniques, générés par le déplacement de l'anticyclone des Açores, sont représentés par le courant des Canaries. Il s'agit d'un courant profond, froid (les températures ne dépassent jamais 18°C), constant, venant des hautes latitudes et se dirigeant vers le Sud en effectuant des méandres autour des îles Canaries. Il atteint son activité maximale sur la côte marocaine, s'étendant sur le plateau continental pendant l'hiver. Le retrait des eaux chaudes estivales et la position méridionale de l'anticyclone des Açores favorisent l'extension du courant froid. La salinité de ces eaux froides varie entre 3,6 et 3,65 % (selon Jones et al, 1970, cité dans Attilah, 1993). Selon Kendrew (1961), il contribue à limiter les excès de chaleur estivale et serait en partie responsable de la formation de rosée et de l'hygrométrie importante pendant cette période. Il circule entre 200 et

300 mètres de profondeur au large du Maroc, avec des vitesses en surface allant de 25 cm/s à 75 cm/s et pouvant exceptionnellement atteindre 100 cm/s (Erimesco, 1969).

De plus, les eaux canariennes, dont les températures varient entre 18°C et 22,5°C, commencent à apparaître dès le mois d'octobre dans le nord de la côte marocaine et couvrent l'ensemble du plateau continental en janvier, se mélangeant avec les eaux profondes de l'upwelling côtier. Les variations saisonnières du courant des Canaries sont liées à celles des alizés maritimes de secteur nord à nord-est générés sur la façade orientale de l'anticyclone des Açores. Ainsi, son extension latitudinale maximale correspond à la position la plus méridionale de l'anticyclone des Açores, atteignant son point culminant en janvier. L'extension des eaux canariennes est minimale en été. En juillet, elle se limite à la latitude du cap Blanc (Navarro et al, 2001).

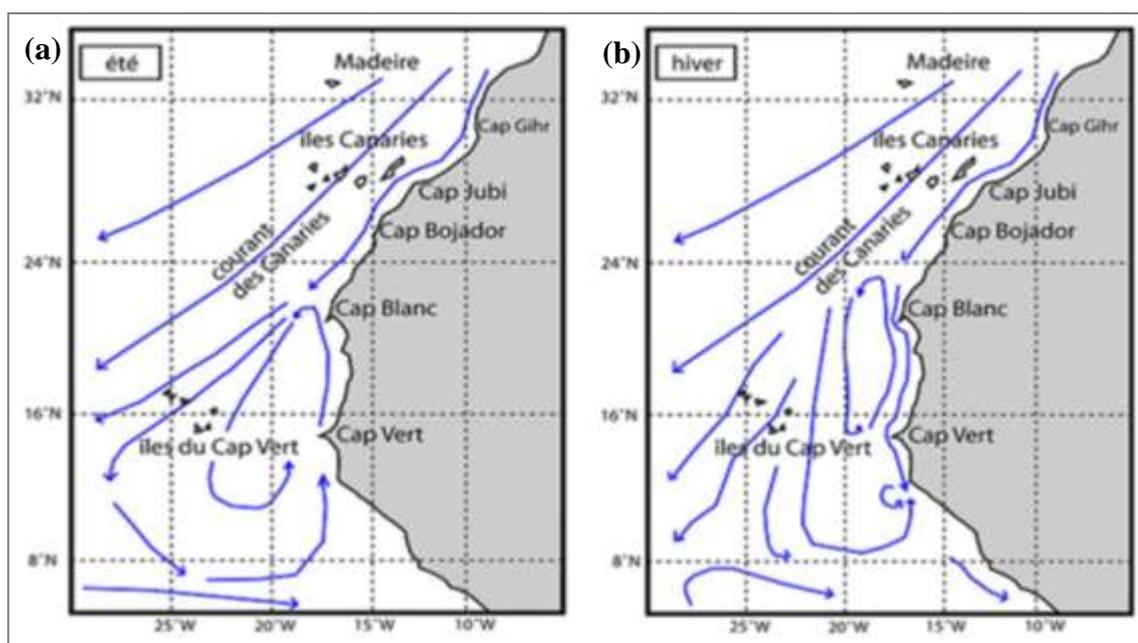


Figure 5 : Représentation de la circulation de surface du Courant des Canaries : **a-** en Été et **b-** en Hiver pour la région du CCLME (d'après Barton et al, 1998 cité par CCLME (2016)).

2. Courants parallèles au trait de côte :

2.1. Courant dû au vent :

Les vents exercent leur influence sur la mer en mettant l'eau en mouvement, ce qui engendre la formation de courants de surface. Le déplacement de ces courants se produit généralement parallèlement à la direction du vent. L'intensité de ces courants est la plus élevée près de la côte et dans la zone de déferlement des vagues, et elle diminue à mesure que l'on s'éloigne de la surface. Sur la partie sableuse du littoral d'El Jadida, les vents dominants, qui soufflent généralement du nord-nord-est (NNE), créent des courants orientés dans la direction nord-nord-est vers sud-sud-ouest (NNE-SSW). L'effet de ces courants sur les sédiments dépend de la vitesse du vent. À une distance de 90 kilomètres au nord de la zone d'étude, près de Casablanca, des courants ont été observés à une certaine distance de la côte, entre 500 et 2000 mètres du rivage, avec des vitesses de surface moyennes d'environ 15 mètres par seconde (Horikawa, 1988).

2.2. Courant induit par la houle :

Les houles déferlantes contrôlent le transit sédimentaire longitudinal et transversal dans la zone de déferlement. Les vagues arrivent en général sur le rivage avec une certaine obliquité qui explique l'existence, entre les lignes de déferlement et le trait de côte, d'un courant parallèle au littoral (Horikawa, 1988).

Ce courant joue un rôle crucial dans la transformation des rivages, en particulier en ce qui concerne les plages. Comprendre ce phénomène est essentiel pour étudier le transport des sédiments et constitue une étape préalable nécessaire à toute planification d'infrastructures affectant la zone sous-marine proche du rivage (Paskoff, 1998).

L'angle d'incidence des crêtes de houle par rapport à l'orientation de la ligne de rivage détermine la direction et l'intensité du courant longitudinal, ainsi que les transports de sédiments qui en résultent. Chaque fois que la direction de propagation de la houle n'est pas perpendiculaire à la côte, la houle peut engendrer un courant littoral. L'intensité de ces courants dépend également de la hauteur, de la période et de la direction de la houle, ainsi que des caractéristiques des fonds marins tels que leur nature, leur rugosité et leur pente (Levoy, 1994).

Lorsque les houles ont une orientation nord-ouest, elles induisent un déplacement dans la même direction vers le sud-ouest. Cependant, dans les zones où la côte est relativement rectiligne, comme au centre de la grande baie d'El Jadida et de la pointe de Jorf Lasfer, les crêtes de houle sont parallèles au trait de côte, ce qui peut provoquer une alternance dans le sens du courant littoral, soit vers le sud-ouest, soit vers le nord-est. En revanche, lorsque les houles ont une orientation ouest-sud-ouest, elles induisent un courant longitudinal dirigé vers le nord-est (Makaoui et al, 2005).

Ces phénomènes de courants dus aux houles, qu'ils soient parallèles ou perpendiculaires à la côte, peuvent avoir un impact sur le transport des sédiments. En raison des variations de hauteur, de période et de direction des vagues près de la côte, ainsi que de l'orientation de la côte elle-même, les modèles de transport des sédiments générés par les houles peuvent être très complexes (Makaoui et al, 2012).

2.3. Les fronts :

Dans tous les systèmes d'upwelling côtier, les eaux froides provenant de l'upwelling peuvent être facilement distinguées des eaux océaniques plus chaudes du large grâce à des images satellitaires thermiques. La limite entre les températures de surface de la mer (TSM) froides et chaudes est une zone relativement étroite, caractérisée par des gradients thermiques marqués s'étendant dans le sens nord-sud parallèlement à la ligne de côte. Cette limite, qui présente également des gradients intenses en ce qui concerne d'autres propriétés océanographiques et biologiques, notamment la chlorophylle, est connue sous le nom de front d'upwelling (Myrberg et al, 2010). Ces zones frontales complexes et entremêlées, où les eaux froides sont retenues à proximité des eaux chaudes, créent des structures hétérogènes qui favorisent le développement de la production biologique. De plus, elles peuvent servir de pièges pour les particules ou les organismes présents dans la masse d'eau (Roy, 1992).

En plus de l'impact de l'intensité de chaque épisode d'upwelling (Castelao et al, 2006), Durski et Allen (2005) ont souligné l'importance de la topographie locale dans la détermination des structures frontales de l'upwelling. L'idée est que la pente de la topographie

et les déplacements significatifs des interfaces contribuent à élargir les conditions d'instabilité, poussant ainsi la limite du front d'upwelling plus loin de la côte.

Sur la côte atlantique marocaine, la principale structure frontale se situe généralement autour de la latitude 10°N en hiver, où elle forme ce que l'on appelle le front des Bissagos. En été, cette zone de discontinuité remonte vers la latitude 21°N, où elle constitue le front du cap Blanc (INRH, 2014).

2.4. L'upwelling côtier :

L'upwelling est un phénomène qui caractérise la circulation océanique sur une grande partie de la plate-forme continentale marocaine. Il est engendré par l'interaction complexe entre les Alizés et le courant des Canaries. Les Alizés entraînent les eaux de surface vers le large, créant ainsi un vide qui est comblé par des eaux froides riches en éléments nutritifs provenant des profondeurs (Makaoui et al, 2012).

La côte atlantique marocaine est soumise à l'influence de l'upwelling côtier, un terme qui désigne la remontée des eaux froides et riches en nutriments vers la surface de l'océan en réponse aux vents. Lorsque ces eaux froides atteignent la surface, elles apportent avec elles des nutriments qui nourrissent le phytoplancton, qui à son tour utilise le gaz carbonique dissous pour effectuer la photosynthèse (Salah et al, 2012).

Le phénomène d'upwelling le long des côtes marocaines est considéré comme une composante climatique permanente, bien qu'il présente des fluctuations à différentes échelles spatiales et temporelles. Des études ont montré que la dynamique régionale de l'upwelling et les caractéristiques locales de l'écosystème, y compris la chaîne alimentaire, sont fortement influencées par ce phénomène (Cury et al, 1987). De plus, la géométrie de la côte et la structure du talus continental jouent un rôle essentiel dans le développement de l'upwelling saisonnier (Estrade et al, 2008).

Les variations saisonnières du vent sont principalement responsables de ces mouvements d'eau. Pendant l'hiver, lorsque les vents dominants proviennent de l'ouest et du nord-ouest, l'upwelling est moins intense. En revanche, il atteint son maximum d'activité de juin à octobre, lorsque les Alizés soufflent le plus fort. Les zones où l'upwelling est le plus intense se trouvent généralement à proximité des caps Spartel (au nord du Maroc), Blanc (Jorf Lasfer), Beddouza (à 90 km d'El Jadida) et cap Ghir.

Ces remontées d'eaux froides entraînent une baisse des températures de surface, ce qui se traduit par la montée des isothermes 15°C et 16°C, ainsi qu'une diminution de la teneur en oxygène. Cette remontée des eaux froides affecte une zone qui s'étend de la côte jusqu'à la profondeur de -200 mètres (Kabbachi et al, 2001).

La structure thermohaline résultant des résurgences côtières peut être perturbée par le brassage intense des eaux de surface provoqué par l'agitation des vagues. Dans la couche limite, les courants dus aux vagues peuvent transporter la matière en suspension vers la zone côtière (Zakaria, 1994).

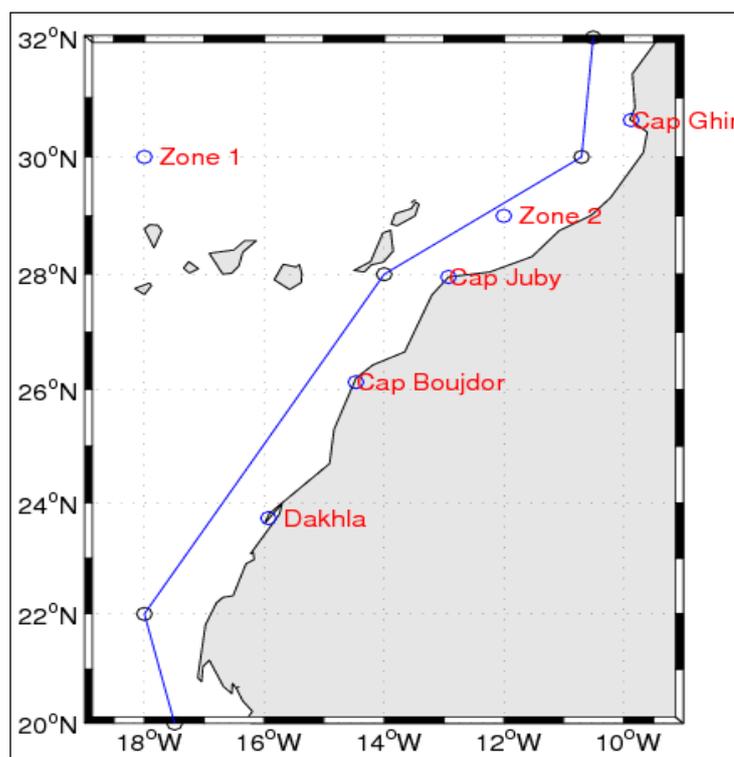


Figure 6 : Les zones d'upwelling de la côte atlantique marocaine (Moujane et al, 2011).

Les principales zones d'upwelling le long de la côte atlantique marocaine sont réparties comme suit (voir la figure ci-dessus) :

Zone 1 : Cette zone correspond à la zone de transition côtière typique des régions d'upwelling. Elle est caractérisée par une dynamique non linéaire qui est le résultat de l'activité turbulente des filaments d'eau froide créés par l'upwelling côtier (Bernikov, 1991).

Zone 2 : Cette zone côtière peut être subdivisée en quatre sous-zones distinctes :

- **Au Nord du cap Ghir :** Dans cette région, le plateau continental a une largeur qui varie de 5 à 25 mètres et s'approfondit progressivement depuis Safi (50 mètres) jusqu'au cap Ghir (200 mètres). Les vents y sont forts, ce qui génère un upwelling important et des températures froides qui répondent directement à l'influence du vent. L'upwelling dans cette zone est particulièrement actif en été (Furnestin, 1959).
- **Entre le cap Ghir et le cap Juby :** Dans cette partie, les Alizés sont plus réguliers et moins forts. Le plateau continental est plus large, moins profond, et sa pente est plus douce que celle au nord du cap Ghir. De plus, l'orientation de la côte s'incline nettement vers l'ouest. Cette configuration favorise un upwelling plus important en raison de la régularité des vents et de la faible profondeur de cette zone (Furnestin, 1959).
- **Au Sud du cap Juby et au Nord de Dakhla :** Dans cette région, les Alizés sont plus forts, et le plateau continental est plus large du nord au sud. L'upwelling y est plus intense que dans la zone précédente, en particulier pendant l'été (Makaoui et al, 2005).
- **Au Sud de Dakhla :** Les Alizés sont permanents et plus forts dans cette zone. Pendant les périodes de vents intenses, le centre de l'upwelling se déplace vers le talus continental et y reste jusqu'à ce que les vents Alizés se calment. La variation de l'intensité et de la direction des vents permet de définir une séquence de périodes

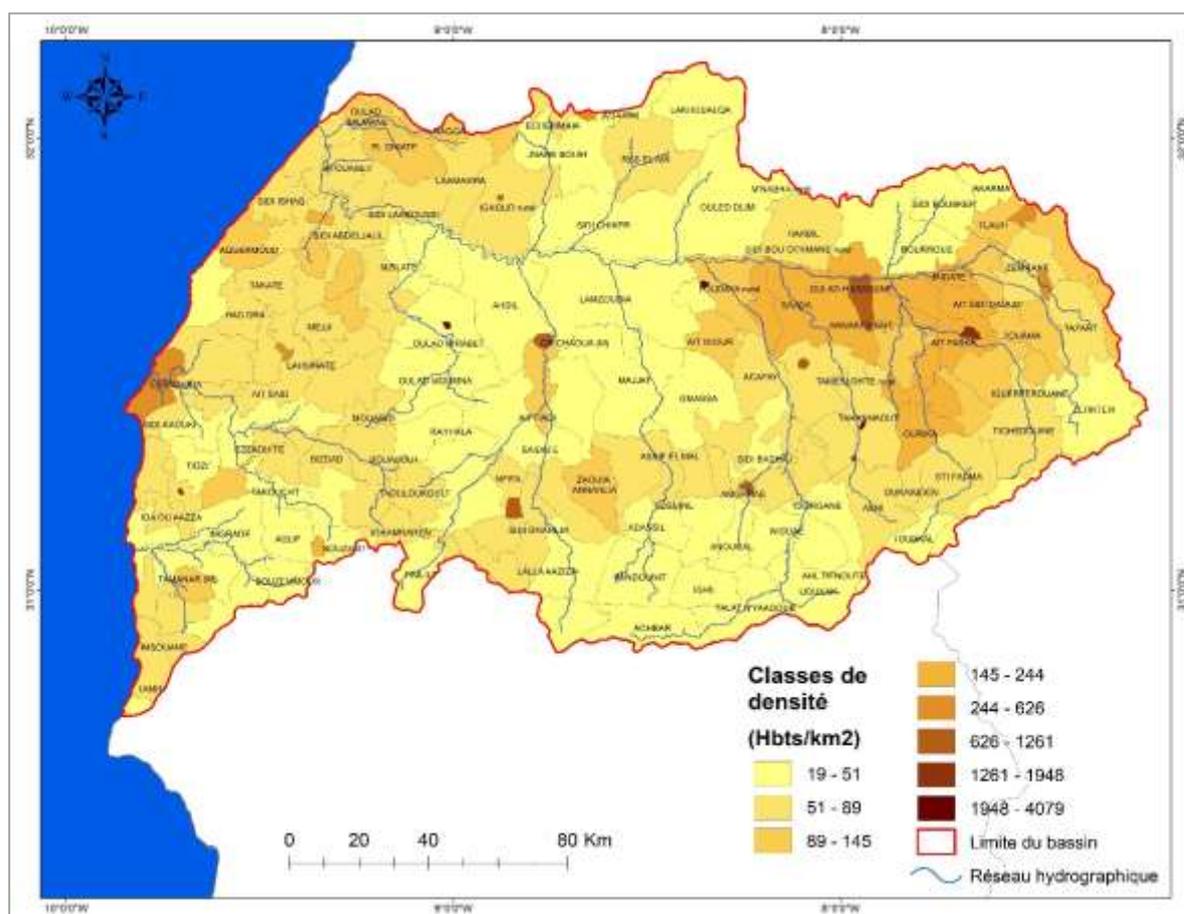
d'upwelling (d'une durée de 4 à 9 jours) séparées par des périodes de relaxation (d'une durée de 2 à 5 jours) (Coste et al, 1982).

AXE 3 : Les caractéristiques humaines des deux bassins versants :

I. Le cadre administratif et démographique du bassin de Tensift :

Administrativement, cette zone s'étend sur six préfectures et provinces. Elle couvre entièrement la préfecture de Marrakech ainsi que les provinces d'Al Haouz, de Chichaoua et d'Essaouira. De plus, elle englobe partiellement les provinces d'El Kalaâ des Sraghna et de Safi (monographie de la région, 2015).

Il est à noter que les limites de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT, 2014) ne correspondent pas nécessairement aux frontières administratives des provinces. Par conséquent, certaines communes se trouvent à cheval sur deux bassins. Dans de tels cas, l'étude n'a pris en compte que la moitié de la population des communes concernées. Cette approche vise à éviter toute double comptabilisation lors de l'analyse démographique des zones d'autres Agences du Bassin Hydraulique (ABH) qui partagent des frontières avec celle de Tensift.



Carte 16 : carte de la densité de la population en 2014 dans le bassin versant de Tensift.

Selon les résultats du recensement général de la population du Maroc en 2014, la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift compte une population totale de 3,04 millions d'habitants, ce qui équivaut à environ 9% de la population totale du Royaume. Il est important de noter que près d'un tiers de cette population réside dans la ville de

Marrakech. Les autres habitants se répartissent entre de plus petites villes et des zones rurales (ABHT, 2014).

II. Aperçu sur les activités socio-économiques dans le bassin versant de Tensift :

L'activité économique repose principalement sur l'agriculture et l'élevage, avec une importance particulière accordée à l'agriculture moderne dans les périmètres irrigués. Les cultures céréalières et l'arboriculture sont les principales cultures pratiquées dans la région. En plus de l'agriculture, d'autres secteurs économiques tels que l'industrie agro-alimentaire, le tourisme, l'artisanat et l'exploitation minière jouent un rôle significatif. De plus, la région abrite un port à Essaouira où l'activité de pêche se développe progressivement.

1. Agriculture et Élevage :

L'agriculture joue un rôle central dans cette région, caractérisée principalement par la culture des céréales et des arbres fruitiers. Les terrassements du terrain sont couramment utilisés pour valoriser les zones cultivables, où l'on trouve notamment des vergers de noyers, d'oliviers, de pommiers et de cerisiers. Les parcelles agricoles sont souvent de petite taille, et la superficie agricole utile (SAU) est divisée en plusieurs parcelles par exploitant (D.R.A.M.H, 2011).

L'agriculture représente le secteur clef de l'économie régionale, employant 53,2 % de la main-d'œuvre totale de la région, ce qui équivaut à environ 70 millions de jours de travail. La superficie agricole utile (SAU) s'étend sur environ 1,4 hectare, dont plus de 60 % est généralement consacrée à la culture céréalière. Les céréales et l'olivier sont les deux principales cultures de la région étudiée. L'olivier couvre près de 136 000 hectares, soit 20 % de la superficie nationale, et contribue à hauteur de 25 % de la production et de 75 % des exportations nationales d'olives.



Photos 3 : photos montrant quelques activités agricoles dans le bassin du Tensift (source : <https://www.lmi-trema.ma/contexte/enjeux-physiques-et-sociaux/>).

Selon la Direction Régional de l'Agriculture Marrakech-El Haouz (D.R.A.M.H, 2011) : les Céréales représentent environ 800.000 ha, dont 51 000 ha en irrigué, avec 10% de la production nationale (1ère région de production au niveau national en 2008/2009). L'Abricotier : 5.500 ha soit 50% de la superficie nationale et 50% des exportations nationales de conserves. Les Agrumes : 9 200 ha soit 8% de la superficie nationale. Les Cactus : 26.000

ha soit 30% de la superficie nationale. Le Noyer : 2000 ha soit 34% de la noyeraie nationale. L'Arganier : 136.000 ha soit 20% de l'arganeraie nationale

De plus, cette région contribue de manière significative à l'élevage national, avec une part de 14,1%. Cette contribution importante à l'élevage s'explique en partie par l'existence d'importants espaces pastoraux dans la région. Il convient de noter que cette région enregistre les rendements les plus faibles en matière de céréales au niveau national, ce qui démontre que l'élevage joue un rôle de substitution important par rapport à l'agriculture (D.R.A.M.H, 2011).

2. Activité touristique :

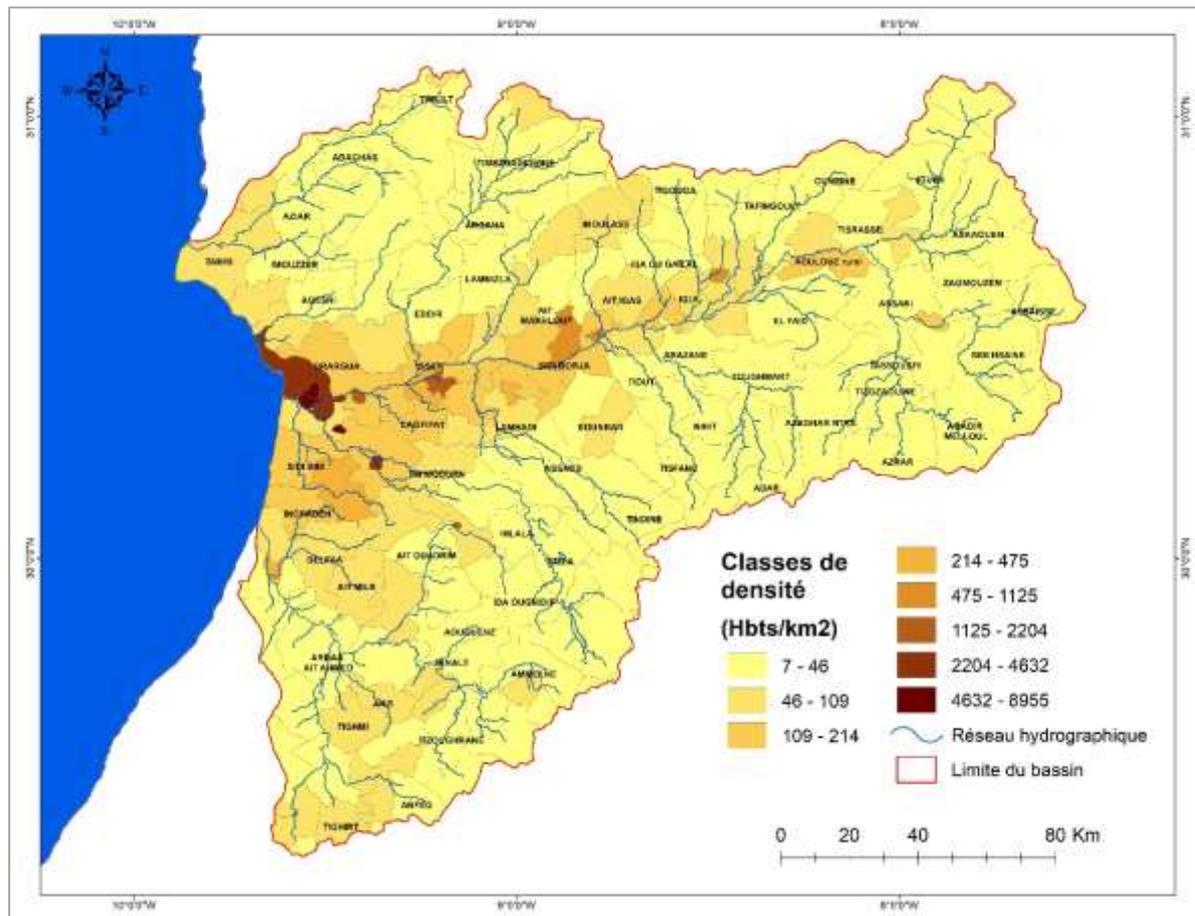
L'activité touristique est un secteur vital pour l'économie nationale, contribuant à la création d'emplois et à l'apport en devises, ainsi qu'au développement régional. Bien que l'activité touristique et récréative existe depuis longtemps dans la région, elle a connu une croissance rapide au cours des dix dernières années (Ben Massou, 2007). Des études ont été menées pour analyser le paysage, en établissant une typologie et une évaluation qualitative des paysages dans la région, en se basant sur des critères tels que la morphologie du terrain, le type d'environnement, l'occupation du sol, le point d'observation, le bassin de visibilité, l'amplitude, la profondeur, l'altitude et la surface dominante.

L'étude des nuitées touristiques révèle que Marrakech-Tensift-Al Haouz représente la première destination touristique au niveau national, avec 32,9% des nuitées enregistrées dans les hôtels classés en 2004 (Ben Massou, 2007). De plus, le taux d'occupation des hôtels classés est nettement supérieur à la moyenne nationale, atteignant 43% en 2004.

La région attire de nombreux touristes en raison de la beauté de ses paysages naturels, de sa faune et de sa flore, et de son authenticité culturelle (Ben Massou, 2007). Cependant, la croissance non maîtrisée de la fréquentation des sites touristiques entraîne actuellement quelques impacts négatifs susceptibles de nuire à la biodiversité et au patrimoine culturel (Flissate et al, 2008).

III. Contexte administratif et démographique du bassin de Souss-Massa :

Le découpage administratif du bassin de Souss-Massa comprend les 2 préfectures d'Agadir Ida Ou Tanane et d'Inzegane Ait Melloul, ainsi que les provinces de Chtouka Ait Baha, de Taroudant et de Tiznit. Il déborde légèrement sur les provinces de Sidi Ifni au sud, de Chichaoua au nord-est et d'Essaouira au nord.



Carte 17 : carte de la densité de la population en 2014 dans le bassin versant de Souss-Massa.

Selon les résultats du dernier recensement général de la population et de l'Habitat de 2014, effectué par le Haut-Commissariat au Plan (HCP, 2014), la population de la région Souss-Massa s'élevait à 2 669 480 habitants, ce qui représentait environ 8% de la population totale du pays. Cette population était répartie entre 56% de population urbaine et 44% de population rurale. En termes de poids démographique par rapport à la population nationale, la région Souss-Massa se classait au sixième rang parmi les douze régions du pays.

Les prévisions démographiques indiquent que la part de la région dans la population nationale augmentera légèrement, passant de 8,1% en 2020 à 8,5% en 2030. De plus, la région enregistre l'un des taux de croissance démographique annuelle les plus élevés, prévus à 1,36% par an, contre 0,96% au niveau national. Il s'agit du deuxième taux le plus élevé après la région Laayoune Sakiat Hamra, qui est de 1,38%. Le taux d'activité dans la région est de 52,2%, légèrement supérieur à la moyenne nationale de 52,1%. Cependant, il existe des différences significatives entre les zones urbaines (45,3%) et les zones rurales (57,7%) (HCP, 2014). En ce qui concerne la pyramide des âges, la population de la région est majoritairement jeune, avec une base pyramidale indiquant un niveau élevé de natalité. Cependant, cette base s'est rétrécie par rapport aux recensements précédents de 1982 et 1994. La taille moyenne des ménages en milieu rural en 2014 était de 4,3 personnes par ménage, en baisse de 0,6 par rapport à 2004.

IV. Potentialités économiques dans le bassin de Souss-Massa :

La région possède d'importantes opportunités économiques, principalement dans trois secteurs prioritaires : l'agriculture, la pêche et le tourisme. Cependant, la répartition de ces activités à travers la région montre qu'il existe encore des disparités au niveau des différentes zones géographiques de la région.

1. L'agriculture :

La région Souss-Massa, dans son ensemble, est principalement rurale, et l'agriculture joue un rôle central dans son économie malgré des conditions climatiques souvent arides. La Superficie Agricole Utile (SAU) de la région est évaluée à 450 000 hectares, ce qui ne représente que 8 % de la superficie totale de la région, selon les saisons agricoles (HCP, 2014).

La région de Souss-Massa comprend une grande variété de systèmes agricoles. L'agriculture intensive irriguée prédomine dans les plaines du Souss, de Chtouka et de Tiznit. Sur ces terres irriguées, la superficie totale est de 158 430 hectares, dont 107 800 hectares sont équipés en systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte (monographie de la région de Souss-Massa, 2014).

En ce qui concerne les terres cultivées, elles s'étendent sur une superficie totale de 434 400 hectares, avec une prédominance des céréales couvrant 206 650 hectares, soit 47,6 %. Ensuite, l'arboriculture fruitière occupe une superficie de 172 000 hectares, représentant 37 % de la SAU. Les cultures intensives, notamment le maraîchage et la culture des agrumes, couvrent quant à elles une superficie totale de 58 500 hectares (ORMVASM, 2019).



Photos 4 : Photos montrant quelques activités agricoles dans le bassin de Souss-Massa (source : travail de terrain).

La production agricole dans la région de Souss-Massa repose sur trois filières principales qui jouent un rôle stratégique dans l'économie régionale : l'arboriculture, le maraîchage et les fourrages. Environ 43 % de la superficie agricole de la région est occupée par des cultures telles que les agrumes, l'olivier, l'amandier et le bananier.

Cependant, en termes de production, ce sont les légumes et les fourrages qui dominent, représentant 73,4 % de la production agricole régionale, soit environ 2 784 715 tonnes. Ces productions agricoles dans leur ensemble génèrent une valeur estimée à 5,6 milliards de dirhams, dont 81 % proviennent des agrumes et des légumes produits principalement dans la zone du Souss-Massa (ORMVASM, 2019).

2. Pêches maritimes :

Le secteur de la pêche joue un rôle essentiel dans la région de Souss-Massa et représente une richesse d'importance nationale. Il génère un grand nombre d'emplois et attire d'importants investissements. La région abrite un important port de pêche, tant pour la pêche en haute mer que côtière, situé à Agadir. En plus de cela, il existe plusieurs petits points de débarquement réservés aux embarcations pratiquant la pêche artisanale, tels qu'Imessouane, Taghazoute, Aglou et Tifnit. Cette activité a également contribué à la création d'unités industrielles liées au secteur de la pêche, avec une orientation vers l'exportation (monographie de la région de Souss-Massa, 2014).



Photo 5 : Photos montrant quelques activités de pêche maritime dans le bassin Souss-Massa (source : travail de terrain, 2019)

La production halieutique débarquée à Agadir, atteignant 140 000 tonnes en 1997, en fait le premier port de pêche du Royaume. En ce qui concerne le port de Sidi Ifni, la production actuelle s'élève à 11 000 tonnes par an, mais cela pourrait augmenter à 80 000 tonnes par an avec la réalisation de la deuxième phase actuellement en cours. De plus, la région dispose d'une flotte de pêche importante, composée de 209 unités côtières, 249 unités hauturières et 1 206 unités de pêche artisanale. La flotte hauturière représente 60 % de la flotte nationale, tandis que la pêche côtière ne représente que 8 %. Ces ressources halieutiques ont également conduit au développement d'une importante industrie de transformation des produits de la mer, principalement destinée à l'exportation et concentrée principalement à Agadir, où l'on compte 15 unités de production de conserves de poissons, 11 unités de semi-conserves, 4 unités de sous-produits et 26 unités de congélation (HCP, 2014).

3. Activité touristique :

Région touristique par excellence, Souss-Massa est, de par son climat, son relief diversifié, son patrimoine historique et culturel, ainsi que ses plages étendues, une destination internationale privilégiée et la première au niveau national pour le tourisme balnéaire (monographie de la région de Souss-Massa, 2014).

Le secteur touristique constitue un pilier essentiel de l'économie de la région de Souss-Massa, en raison des énormes potentialités touristiques qu'elle recèle, telles qu'un climat ensoleillé, une longue façade atlantique, deux chaînes montagneuses, une abondance de flore, de belles vallées et des dunes de sable dans le désert. Cela confère indéniablement à la région une vocation touristique incontestable, faisant d'elle le principal pôle touristique du Royaume (CFCIM, 2019).

Le secteur touristique y dispose d'importantes infrastructures hôtelières de la région constituées en 2018 de 247 unités hôtelières qui se présentent (6.69%) du total national, de 18451 lits (17.73% du total national) assurant (16%) de l'offre nationale en termes de chambres (18451 chambres). La répartition de ces unités touristiques témoigne d'une nette disparité entre les unités constitutives de la région, du moment qu'elle montre une forte concentration des services touristiques à Agadir Ida Outanane, qui comprend à elle seule (59.51%) des unités touristiques et (89.88%) de la capacité hôtelière régionale. Le nombre de touristes dans la région a dépassé le seuil d'un million de visiteurs, en enregistrant l'arrivée de 1 161187 touriste en 2018. La préfecture d'Agadir Ida Outanane accueille un nombre très important de touristes qui est de 1 123123, soit (96,72%) du total régional. Pour les arrivées des touristes par nationalité, la région accueille une grande partie de touristes venant de l'Europe (53%), le tourisme national se représente 34%, les pays arabes (5%), l'Amérique du Nord et d'autres pays respectivement (1%) et (7%) (CFCIM, 2019).

CONCLUSION

L'analyse des différents paramètres physiques et géomorphologiques, notamment les caractéristiques lithologiques, nous a permis de mieux comprendre les causes des variations des régimes hydrologiques dans chaque bassin versant étudié. Cette compréhension est essentielle pour évaluer leur contribution à la genèse des crues et pour appréhender la variabilité spatio-temporelle des phénomènes hydrologiques. Les interactions complexes entre ces paramètres déterminent la dynamique des écoulements superficiels, ce qui nécessite l'utilisation d'outils statistiques pour analyser leur impact sur la répartition et l'évolution des débits.

De plus, l'analyse des paramètres de la façade Atlantique Marocaine revêt une grande importance pour comprendre l'interaction entre l'océan et la terre et son influence sur le climat de la zone d'étude. L'océan joue un rôle central dans la variabilité climatique à différentes échelles temporelles, ce qui souligne l'importance de prendre en compte cette dimension dans l'étude des bassins versants.

En combinant ces analyses physiques, géomorphologiques et océanographiques, nous sommes en mesure de mieux appréhender le comportement hydrodynamique des bassins versants étudiés et d'explorer les liens complexes entre les processus terrestres et marins qui façonnent notre environnement hydrologique. Cette compréhension approfondie est essentielle pour la gestion durable des ressources en eau et la prévention des risques liés aux crues.

CHAPITRE N° 2 :

COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT

CLIMATIQUE DU PASSÉ À L'ACTUEL :

CADRE CONCEPTUEL, THÉORIQUE ET

MÉTHODOLOGIQUE

INTRODUCTION

Pendant longtemps, les effets des changements climatiques ont été ressentis principalement à l'échelle mondiale (Foley et al, 2005). À l'échelle continentale et régionale, de nombreuses modifications climatiques ont été observées, telles que l'augmentation générale de la température moyenne et les variations des précipitations totales et saisonnières (IPCC, 2013).

L'objectif principal de ce chapitre est de mettre l'accent sur le cadre théorique de la variabilité climatique, ainsi que sur celui du changement climatique. Une autre préoccupation de ce chapitre est de mettre en lumière le cadre méthodologique du climat actuel et passé. Nous allons brièvement présenter les méthodes couramment utilisées pour reconstituer l'évolution du climat au cours du dernier millénaire, en mettant particulièrement l'accent sur les méthodes et les approches employées dans cette étude (méthode XRF et Mg/Ca).

Axe 1 : Comprendre l'évolution du climat actuel : cadre théorique

Grâce à la datation radiométrique, l'âge de la Terre a été estimé à 4,6 milliards d'années. Depuis lors, le climat a toujours connu des variations, principalement dues à des processus naturels et normaux (Githeko et al, 2000). Ces variations climatiques se sont produites sur des périodes relativement longues, s'étalant sur environ cent dix millions (110) à cent vingt millions (120) d'années, marquées par les cycles d'interglaciaires, caractérisés par des alternances de saisons chaudes et froides.

Cependant, ce qui se passe actuellement est que ces changements climatiques se produisent sur une échelle de temps inhabituellement courte, soit de cinquante (50) à cent (100) ans, ce qui est quasiment anormal. La principale raison de cette accélération réside dans l'activité humaine, car nous avons introduit dans l'atmosphère des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), les acides nitreux (HNO₂ / NO₂), ainsi que divers autres gaz, principalement issus de la combustion d'hydrocarbures, du monoxyde de carbone, et d'autres sources. Ainsi, il est possible de distinguer la variabilité climatique du changement climatique en se basant sur ces deux intervalles de variations (Bouchouraki, 2018).

I. La notion de variabilité climatique au changement climatique :

Les changements climatiques sont actuellement considérés comme l'une des menaces les plus graves pesant sur le développement, avec des impacts significatifs sur l'économie des pays en développement et les moyens de subsistance des populations les plus pauvres de la planète.

En général, la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC, 1992) fait une distinction entre les « *changements climatiques* », qui peuvent être attribués aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère, et la « *variabilité climatique* » due à des causes naturelles, astronomiques et géophysiques, dont la compréhension des processus induits permet d'expliquer les variations climatiques passées, de quantifier les impacts anthropiques, et de produire des scénarios d'évolution future.

Compte tenu de la difficulté à distinguer la variabilité climatique des changements climatiques, en particulier dans le contexte africain, le terme "variabilité et changement climatique" sera souvent utilisé dans cette thèse. Cela permet de mieux refléter la question et d'éviter des débats complexes et interminables.

Ainsi, la notion de variabilités et changements climatiques désigne la modification ou variation significative du climat, qu'elle soit d'origine naturelle ou due à des facteurs anthropiques (Afouda, 2004 ; Amani, 2004). Cette définition simplifie celle donnée par la Convention Climat et prend également en compte celle du GIEC, qui considère le changement climatique comme une variation à long terme du climat, qu'elle soit d'origine anthropique ou naturelle.

1. Définition du Changement Climatique :

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) définit le changement climatique comme une modification de la tendance moyenne des conditions météorologiques sur une longue période de temps, généralement de plusieurs décennies ou plus. Ce phénomène est principalement causé par la concentration croissante des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui entraîne progressivement la dégradation de la couche d'ozone et, par conséquent, une augmentation globale de la température. Au cours du 20^e siècle, nous avons déjà observé une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre d'environ 0,6°C. Selon les modèles climatiques et les scénarios d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂), le réchauffement futur devrait se situer en moyenne entre 1,4 et 5,8°C, accompagné de changements dans les régimes de précipitations et une augmentation de la fréquence d'événements climatiques extrêmes (GIEC, 2014).

La Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC, 1992), dans son Article 1, définit les changements climatiques comme étant "des changements de climat qui sont attribués 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 de périodes comparables." Ainsi, la CCNUCC établit une distinction entre le changement climatique attribuable aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité climatique due à des causes naturelles.

Les changements climatiques peuvent être la conséquence de processus naturels internes ou de forces externes telles que les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques et les changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou l'utilisation des terres. Les changements climatiques sont provoqués par des altérations de l'atmosphère résultant de la transformation chimique par les gaz à effet de serre (GES). Cette perturbation de l'équilibre atmosphérique se traduit par une augmentation des températures moyennes à la surface de la Terre, ce qui modifie ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Les impacts sur l'environnement sont multiples, significatifs et de plus en plus fréquents, notamment des sécheresses, la fonte des glaciers et de la glace de mer, l'élévation du niveau des océans et l'intensification des tempêtes tropicales. Ces changements ont des répercussions sur l'ensemble de la population mondiale et la biodiversité planétaire. Les activités humaines jouent un rôle prépondérant dans les changements climatiques actuels et leurs effets sur l'environnement. En effet, selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), le réchauffement climatique est une réalité, et l'activité humaine est la principale responsable de l'émission des "GES". Au cours du dernier siècle, nous avons observé une augmentation moyenne de la température à la surface de la Terre de 0,74 °C, alors que l'on prévoyait une augmentation de seulement 0,6 °C. Les prévisions pour l'année 2100 sont encore plus inquiétantes, avec une augmentation prévue de la température moyenne de 2 à 4,5 °C (GIEC, 2008).

2. Définition de la variabilité climatique :

En général, la variabilité climatique fait référence à la variation du système climatique, causée en grande partie par les activités humaines, comme en témoigne l'histoire du climat actuel. Elle se caractérise principalement par les phénomènes suivants (Amani, 2004) :

- ✍ Une perturbation marquée des moyennes climatiques, notamment en ce qui concerne les températures et les précipitations.
- ✍ Une variabilité du climat qui se traduit par une instabilité des calendriers, affectant le début et la fin des saisons des pluies, ainsi que par la fréquence accrue d'événements météorologiques paroxystiques tels que les tempêtes, les fortes pluies, les ouragans et les cyclones.
- ✍ L'occurrence répétée d'accidents climatiques qui étaient autrefois rares ou inconnus.
- ✍ Une variabilité spatiale de plus en plus marquée, avec l'apparition de poches de sécheresse et la grande fréquence des années qualifiées d'"anormales" (par exemple, une longue séquence d'années sèches suivie d'une année très arrosée).
- ✍ Un changement dans les calendriers climatiques, qui peut perturber les cycles saisonniers traditionnels.
- ✍ Une augmentation des phénomènes climatiques extrêmes et une plus grande variabilité globale du climat.
- ✍ Un accroissement des températures à certaines périodes de l'année.

Les changements climatiques ou la variabilité climatique constituent donc l'une des principales préoccupations mondiales aujourd'hui. Cela est dû non seulement à leurs impacts potentiels sur l'environnement, mais aussi à leurs effets négatifs sur la production agricole et, par conséquent, sur la sécurité alimentaire.

Il est important de noter que la variabilité climatique se réfère à la variation naturelle intra et interannuelle du climat, tandis que les changements climatiques désignent un changement radical du climat, directement ou indirectement attribuée aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère (UNFCCC, 1992).

Par ailleurs, les variabilités climatiques se manifestent par des modifications à court terme des paramètres climatiques tels que la température, le vent et les précipitations (Villeneuve et al, 2005). Les principaux gaz à effet de serre introduits dans l'atmosphère par les activités humaines comprennent le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et divers gaz à effet de serre industriels (CO, NO, NO₂, SO₂, etc.).

Les variabilités climatiques entraînent également une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes tels que les sécheresses, les inondations et les vagues de chaleur. De plus, elles provoquent une augmentation progressive de la température globale moyenne à la surface de la Terre. Ces variations climatiques sont en grande partie dues à l'accentuation de l'effet de serre résultant de l'émission de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone, par certaines activités humaines (Van Oldenborgh et al. 2009).

L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère perturbe l'équilibre des échanges d'énergie entre la Terre et l'espace, entraînant un stockage accru d'énergie à la surface de la Terre. Cela se traduit par une augmentation de la température globale moyenne à la surface de la Terre, avec des conséquences sur des aspects tels que les régimes des vents, la circulation des courants océaniques et le régime des précipitations, entre autres (Teisserenc, 1983).

II. Aperçu sur l'évolution du climat actuel à l'échelle globale :

Au cours des vingt dernières années, la répétition d'événements météorologiques extrêmes tels que les canicules, les tempêtes et les cyclones, ainsi que leur intensité accrue, ont couramment été attribuées par les médias au réchauffement climatique mondial. En 1988, le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) a été créé dans le but précis d'évaluer les informations scientifiques, techniques et socio-économiques nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique (www.ipcc.ch). Les rapports successifs du GIEC ont rapidement souligné le rôle des activités humaines dans le réchauffement climatique actuel, et le quatrième rapport d'évaluation (2007) a affirmé, avec un degré de confiance élevé à très élevé, que les influences anthropiques, en particulier les émissions de gaz à effet de serre (GES), ont un impact sur le climat bien plus important que les forces naturelles.

Le bilan présenté par le GIEC est accompagné de constatations qui incitent à la réflexion. Les concentrations de GES tels que le CO₂, le CH₄ et le N₂O ont considérablement augmenté (augmentation de 70 % entre 1970 et 2004 ; IPCC, 2007) et sont aujourd'hui bien supérieures aux valeurs historiques relevées grâce aux forages glaciaires (EPICA Community Members, 2004). Cette augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est en grande partie attribuable à l'évolution des activités humaines. En effet, les activités humaines ont conduit à l'émission de gaz qui existaient naturellement (comme le CO₂, le CH₄ et le N₂O) ou qui n'existaient pas auparavant, tels que les composés chlorés et certains hydrocarbures (GIEC). Ces observations ont permis aux experts de conclure que l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est principalement due aux activités humaines (tableau 1).

Tableau 1 : Évolution des différents gaz à effet de serre.

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC-11	HFC-23	CF ₄
Concentration préindustrielle (1750)	280 ppm	700 ppb	270 ppb	0	0	40 ppt
Concentration en 1998	365 ppm	1745 ppb	314 ppb	268 ppt	14 ppt	80 ppt
Changement du taux de concentration	1,5 ppm/an	7 ppb/an	0,8 ppb/an	1,4 ppt/an	0,55 ppt/an	1 ppt/an
Temps de séjour atmosphérique		12 ans	114 ans	45 ans	260 ans	>50 000 ans

Les données représentées dans le tableau sont construites, à partir des données fournies dans le troisième rapport du groupe GIEC sur l'évolution du climat ; Groupe de travail I, « changement climatique 2001 : les bases scientifiques physiques ».

La température moyenne mondiale a augmenté en moyenne de 0,74°C entre 1906 et 2005, avec des variations régionales significatives (par exemple, les régions arctiques de l'Hémisphère Nord connaissent une hausse de température environ deux fois plus rapide que la moyenne mondiale). Le niveau de la mer a augmenté à un rythme de 1,8 mm par an dans le monde entier entre 1961 et 1993, et cette élévation atteint maintenant 3 mm

par an en raison de la dilatation thermique des océans et de la fonte importante des glaces continentales (IPCC, 2007).

Dans ce contexte de réchauffement climatique et de récurrence d'événements météorologiques extrêmes tels que les canicules, les inondations et les tempêtes, la communauté scientifique se penche sur les liens entre l'activité humaine et les conséquences sur le changement climatique futur. Depuis le début de l'ère industrielle, l'activité humaine, marquée par des émissions croissantes de gaz à effet de serre tels que le CO₂, le CH₄ et le N₂O, a perturbé la composition chimique de l'atmosphère. Selon le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), l'activité humaine semble être la principale responsable du réchauffement observé, en provoquant un effet de serre supplémentaire résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre (IPCC, 2007).

Ainsi, conformément aux différents rapports du GIEC, ces changements climatiques, observés à différentes échelles à travers le monde, qu'on réside dans l'hémisphère Nord ou Sud, sont susceptibles de s'accroître au cours des prochaines décennies. On peut s'attendre à une augmentation des températures, des épisodes de sécheresse dans certaines régions, des précipitations intenses et des inondations dans d'autres, une augmentation de la fréquence des phénomènes climatiques majeurs tels que les cyclones, une montée du niveau de la mer accompagnée de la salinisation des eaux douces et une augmentation des phénomènes d'érosion (IPCC, 2013).

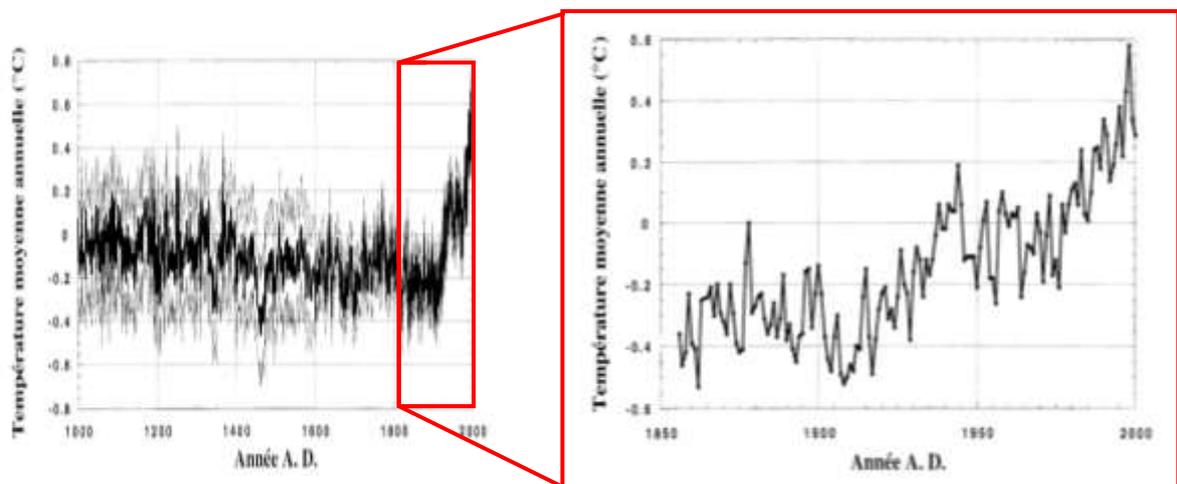


Figure 7 : Évolution de la température moyenne de l'hémisphère Nord depuis l'an mille (Mann et al, 1999).

III. L'évolution des extrêmes climatiques actuels à l'échelle globale :

Il est très probable que la variabilité du climat à l'échelle mondiale ou locale inclue des changements dans la fréquence des événements météorologiques extrêmes (Meehl et al., 2000). Ces événements extrêmes ont le potentiel d'avoir des impacts significatifs et immédiats sur les systèmes naturels, agricoles et sociaux. Les vagues de chaleur et de froid ont des effets notables sur la productivité agricole, le taux de mortalité, la demande en énergie, les transports et les populations de faune sauvage (Davis et al., 2003). En ce qui concerne les précipitations extrêmes, leurs effets sont également souvent considérables, entraînant des inondations ou des sécheresses (Trenberth, 2008). Par conséquent, il est essentiel d'analyser les événements extrêmes associés au réchauffement d'origine humaine ou à la variabilité climatique naturelle afin de détecter

les mécanismes et les processus qui les sous-tendent. De telles analyses ont le potentiel d'informer sur des mesures efficaces de gestion des risques et d'atténuation des effets des catastrophes naturelles. Selon le GIEC, les événements météorologiques rares se produisant dans un lieu et pendant une période donnés sont définis comme des événements extrêmes. Lorsqu'un événement météorologique extrême persiste pendant une certaine durée, il peut être classé comme un événement climatique extrême, en particulier s'il atteint une moyenne ou un total considérés comme extrêmes (IPCC, 2007).

Selon d'autres auteurs, les événements extrêmes peuvent être définis comme des événements qui dépassent un seuil particulier, souvent associé à une signification physique ou biologique spécifique (DeGaetano, 1996). En se basant sur la distribution statistique globale, ces événements peuvent également être des jours qui se situent au-delà d'un niveau préalablement défini de probabilité statistique. Seneviratne et al. (2012) définissent généralement les événements extrêmes comme étant "l'occurrence d'une valeur de temps ou d'une variable climatique au-dessus ou en dessous d'une valeur seuil située près de la queue supérieure (ou inférieure) de la distribution statistique des valeurs observées de la variable". Cela implique que la définition d'un événement extrême dépend du climat local d'une région. Les auteurs notent également que de nombreux événements extrêmes sont le résultat de la variabilité naturelle du système climatique. Les extrêmes se manifestent donc souvent par une combinaison de phénomènes météorologiques ou climatiques qui ne sont pas extrêmes en soi, mais le deviennent du fait de leur conjonction (Seneviratne et al., 2012).

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses études ont été menées sur les changements à long terme des événements climatiques extrêmes. Ces études ont montré des évolutions significatives dans les événements liés aux températures et aux précipitations. Selon le GIEC, il a été observé une diminution significative de la fréquence des nuits froides sur 74 % de la superficie terrestre mondiale étudiée et une augmentation significative de la fréquence des nuits chaudes sur 73 % de cette superficie entre 1951 et 2003 (IPCC, 2007).

L'évolution des statistiques liées aux précipitations, comme rapporté dans le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, a été caractérisée par des variations interannuelles et des tendances variables au cours de la seconde moitié du XXe siècle. Ces résultats ont été présentés en particulier pour l'Europe, où une nette majorité des stations météorologiques a montré des tendances à la hausse du nombre de jours de pluie modérée et de pluie intense, définis comme les jours de pluie dépassant respectivement les 75e et 95e percentiles (IPCC, 2007). En Europe, l'augmentation relative des précipitations extrêmes a été plus marquée que l'augmentation des précipitations moyennes, ce qui suggère que les événements de fortes précipitations représentent une part croissante du total des précipitations.

En se basant sur 27 indices des températures et des précipitations extrêmes définis par l'ETCCDMI (Expert Team of Climate Change Detection Monitoring and Index), des chercheurs ont analysé les variations globales des conditions climatiques extrêmes (Alexander et al., 2006). Les résultats ont montré des changements significatifs dans les températures extrêmes liés au réchauffement entre 1951 et 2003. Les changements liés aux précipitations extrêmes étaient moins prononcés. Klein Tank et Können (2003) ont

également observé une diminution significative du nombre de jours et de nuits froids ainsi qu'une augmentation significative du nombre de jours et de nuits chauds en Europe entre 1946 et 1999. Des conclusions similaires ont été tirées pour d'autres régions du monde, notamment l'Asie, l'Amérique du Sud et l'Australie/Nouvelle-Zélande, avec des augmentations statistiquement significatives des événements de chaleur et des diminutions des événements de froid, en particulier ceux ayant duré trois jours ou plus (Yan et al., 2002 ; Manton et al., 2001 ; Vincent et al., 2005 ; Plummer et al., 1999 ; Collins et al., 2000).

IV. Le point sur l'évolution du climat actuel à l'échelle du Maroc :

Le changement climatique, qui touche la plupart des pays du monde, présente des disparités régionales. La région de l'Afrique du Nord serait particulièrement touchée, car elle devrait subir un réchauffement supérieur à la moyenne mondiale et une diminution plus importante des précipitations.

Ainsi, le Maroc subit l'impact du changement climatique, comme il ressort des études nationales réalisées à ce jour. Celles-ci (DMN, 2007) ont montré que durant les quarante-cinq dernières années, les régions qui étaient classées sous climat humide et subhumide régressent au profit des régions à climat semi-aride et aride ; en témoignant l'augmentation de la température annuelle moyenne estimée à 0,16°C par décennie et la baisse des précipitations printanières de 47% à l'échelle nationale.

Les projections établies par la Direction de la Météorologie nationale prévoient une augmentation des températures moyennes estivales de l'ordre de 2°C à 6°C, ainsi qu'une diminution de 20% en moyenne des précipitations d'ici la fin du siècle.

1. Caractérisation de la variabilité climatique récente au Maroc :

Le climat au Maroc est influencé par une circulation atmosphérique à l'échelle mondiale. En effet, les précipitations sont étroitement liées à l'oscillation nord-atlantique (NAO), qui est formée par une différence de pression entre l'anticyclone subtropical des Açores et la dépression subpolaire d'Islande (Knippertz et al., 2003 ; Ward et al., 1999). En d'autres termes, un indice NAO positif indique de fortes différences de pression entre les Açores et l'Islande. Les hautes pressions sur l'océan Atlantique ont tendance à rendre le climat du Maroc plus sec. En revanche, un indice NAO négatif se produit lorsque le gradient de pression entre les Açores et l'Islande est plus faible, ce qui conduit le Maroc à connaître un climat plus humide (Knippertz et al., 2003).

En ce qui concerne la région du Sud de l'Atlas, le climat est plus complexe en raison de nombreuses influences. L'humidité provient de l'Atlantique, mais son transport vers le Sud de l'Atlas est influencé par des dépressions locales. De plus, les précipitations dans cette zone montagneuse sont associées à des dépressions venant de la partie supérieure de la troposphère. Les pluies sont générées par des mouvements convectifs le long des pentes de l'Atlas, avec de gros nuages très pluvieux, à condition qu'il y ait suffisamment d'humidité disponible à des altitudes plus basses. Par ailleurs, les événements pluvieux survenant pendant les demi-saisons sont liés à des interactions entre les systèmes tropicaux et extratropicaux (Knippertz et al., 2003).

En résumé, le climat au Maroc est soit largement influencé par une prédominance atmosphérique et climatique subtropicale, ce qui limite les précipitations, soit soumis à des influences atmosphériques subpolaires, ce qui apporte des précipitations (Karrouk, 2007).

2. L'évolution des changements climatiques récents observés au Maroc :

L'appartenance du Maroc au bassin méditerranéen signifie qu'à l'exception des régions du Sud et du Sud-Est qui ont un climat plutôt saharien, le pays bénéficie d'un climat de type méditerranéen : doux et relativement humide en hiver, chaud et sec en été. Le bassin méditerranéen est influencé par la branche descendante de la circulation atmosphérique de Hadley en été et les flux d'ouest de l'océan Atlantique en hiver (Bolle, 2002). C'est une zone de transition où les systèmes extratropicaux et tropicaux entrent en compétition, ce qui a une influence sur les événements climatiques, modulés par la proximité de la mer Méditerranée. Selon Xoplaki (2002), les mois d'octobre à mars, avec les plus fortes précipitations, correspondent à la saison humide méditerranéenne. Cependant, étant donné que le climat du Maroc est davantage influencé par l'océan Atlantique à l'ouest, la Méditerranée au nord, et le désert (Sahara) au sud (Zeilhofer et al., 2017), et qu'il est localement influencé par la topographie, la durée de la saison des pluies présente de légères variations spatiales, notamment entre le nord et le sud. Dans la plupart du pays, les mois d'octobre à mars constituent la période la plus humide, avec le maximum de précipitations en hiver (décembre-janvier-février). Les mois d'été ont des précipitations faibles et souvent de nature orageuse. Selon Lamb et Peppier (1987), les cumuls de précipitations varient de moins de 200 mm dans le sud à environ 900 mm dans le nord, mettant en évidence une diminution des précipitations du nord au sud et de l'ouest à l'est en moyenne annuelle sur la période 1971-2000. Seules les régions montagneuses élevées et l'extrême nord-ouest reçoivent des cumuls annuels dépassant les 800 mm. La majeure partie du pays ne dépasse pas 400 mm en moyenne annuelle. Les précipitations méditerranéennes sont également caractérisées par une forte variabilité interannuelle. Le coefficient de variabilité varie au Maroc de 30% à 40% à l'ouest à plus de 70% dans les régions du sud (Knippertz et al., 2003).

Différentes études antérieures ont montré l'influence des modes de circulation extratropicale sur le climat du Maroc et de l'Afrique du Nord.

3. Les principaux indices climatiques affectant le Maroc :

La variabilité climatique observée au cours des dernières décennies peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment la modification de la composition chimique de l'atmosphère due à l'activité humaine, ainsi que les fluctuations naturelles à basse fréquence du climat (Driouech et al., 2009). Dans ce contexte, il est important de présenter les principaux indices climatiques qui ont une influence sur le Maroc : l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO), le phénomène El Niño-Oscillation Australe (ENSO), l'Indice d'Oscillation Australe (SOI), et l'Indice d'Oscillation de l'Ouest de la Méditerranée (WeMOI).

3.1. L'Oscillation Nord Atlantique (NAO) :

L'Oscillation Nord-Atlantique (North Atlantic Oscillation, NAO) est une oscillation climatique naturelle considérée comme un mode intrinsèque de l'atmosphère. La NAO

est reconnue comme le principal mode de variabilité du climat dans l'hémisphère Nord extratropical, expliquant approximativement 60 % de la variation de la pression atmosphérique au niveau de la mer (Gimeno et al., 2003). Ses effets sur les conditions météorologiques en Europe sont très prononcés (Walker et al., 1932) et relativement bien compris (Hurrell, 1995). Cependant, l'une des découvertes les plus significatives concernant la NAO a été faite par Hurrell (1996), qui a établi un lien entre la tendance croissante de l'indice hivernal de la NAO et la température de surface de l'hémisphère Nord en hiver, ce qui peut expliquer, du moins en partie, les variations de température à l'échelle globale. Depuis lors, de nombreux efforts ont été déployés pour clarifier cette relation (Rogers, 1984 ; Tourre et al., 1999). Castro-Diez et al. (2002) ont démontré que les températures dans le Sud de l'Europe sont influencées non seulement par la phase de la NAO, mais aussi par la position exacte du centre d'action de la NAO. Selon les travaux de Gimeno et al. (2003), la relation entre l'Oscillation Nord-Atlantique et la température de surface de l'hémisphère Nord dépend de l'activité solaire. Elle est positive pendant les phases de forte activité solaire et peu significative, voire négative, pendant les phases de faible activité (Gimeno et al., 2003). En effet, lors des phases de maximum solaire, la NAO présente une structure hémisphérique s'étendant jusqu'à la stratosphère, ce qui est similaire à l'Oscillation Arctique (Thompson et al., 1998). Cependant, pendant les phases de minimum solaire, la NAO est principalement confinée à l'Atlantique de l'Est dans la troposphère (Gimeno et al., 2003). Ces résultats sont confirmés par l'étude du comportement de la NAO au cours des cycles solaires de 11 ans (Kodera, 2002).

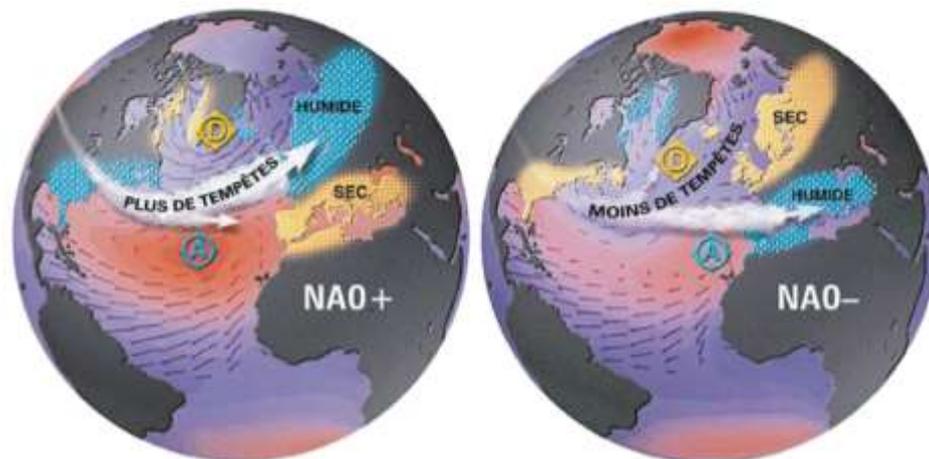


Figure 8 : Schéma récapitulatif des impacts associés aux deux phases de l'Oscillation Nord Atlantique (d'après Cassou, 2004).

En particulier, l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) exerce une grande influence sur le climat marocain. Pendant la phase positive de la NAO (caractérisée par le creusement de la dépression d'Islande et l'intensification de l'anticyclone des Açores), le renforcement du gradient de pression méridional contribue à l'accroissement de la circulation d'ouest sur le Nord-Est de l'Atlantique et le continent européen. En conséquence, les perturbations se forment au-dessus de l'Atlantique, principalement vers le Nord-Ouest du continent européen (Wanner, 2001), qui bénéficie de conditions humides et douces. Cela entraîne une réduction des précipitations au Maroc, ainsi qu'au Sud de l'Europe. En revanche, pendant la phase négative de la NAO, on observe un affaiblissement du gradient de pression méridional dans l'Atlantique Nord, ce qui conduit à une diminution de l'intensité des vents d'ouest. L'axe des dépressions devient

alors plus zonal, permettant aux perturbations atlantiques de se déplacer vers le Sud de l'Europe et le bassin méditerranéen. La phase négative de la NAO favorise ainsi les précipitations au Maroc et dans le Nord-Ouest de l'Afrique (Knippertz et al., 2003).

3.2. L'effet d'El Niño Southern Oscillation (ENSO) sur le climat du Maroc :

La variabilité climatique au Maroc est également influencée par le phénomène El Niño-Oscillation Australe (ENSO) (Ward et al., 1999). Les températures de surface de la mer, en particulier dans la région de l'est du Pacifique, ont un impact sur le climat en Afrique du Nord ainsi qu'en Europe pendant la saison hivernale. L'influence de l'ENSO sur les précipitations est plus marquée en décembre, janvier et février, ainsi que sur les précipitations au printemps, c'est-à-dire en mars, avril et mai (Knippertz et al., 2003). Des corrélations entre l'ENSO, les précipitations dans le nord de l'Afrique et la NAO ont été observées au cours de différentes périodes : de 1900 à 1925, de 1962 à 1987 et de 1931 à 1956. D'autres études ont également montré que les précipitations au printemps ou en automne dans la région méditerranéenne étaient liées à l'ENSO (Huebener et al., 2007).

Le phénomène "El Niño" trouve son origine dans un courant océanique saisonnier local qui se manifeste environ une ou deux fois par décennie le long des côtes sud-américaines. De nos jours, il désigne des anomalies thermiques persistantes de la surface de l'océan dans la région est et centrale du Pacifique équatorial, qui durent généralement de 6 à 18 mois. Il existe deux phases principales : "El Niño", caractérisée par des températures anormalement chaudes, et "La Niña", caractérisée par des températures anormalement froides, avec une périodicité d'environ 2 à 7 ans (Tootle et al., 2005). Ce phénomène océanique est étroitement lié à l'Oscillation Australe (Southern Oscillation ou SO), qui englobe les variations de pression atmosphérique de surface sur l'ensemble du bassin du Pacifique équatorial (Trenberth, 1997).

"ENSO" (El Niño Southern Oscillation) est un phénomène couplé entre l'océan et l'atmosphère, principalement observé dans l'océan Pacifique. Dans les tropiques, l'ENSO est considéré comme le principal mode de variabilité climatique interannuelle en raison de ses impacts globaux et régionaux (Camberlin, 2010). L'ENSO est connu pour exercer une influence significative sur le continent africain (Jury et al., 2002). En termes trimestriels, cela se traduit généralement par des sécheresses en Afrique australe (janvier-mars) et de l'Éthiopie au Sénégal (juillet-septembre) pendant la plupart des épisodes chauds du Pacifique (années "El Niño"), ainsi que par des inondations en Afrique orientale (octobre-décembre) (Nicholson et al., 1997). Il est important de noter que les précipitations en Afrique centrale restent généralement indépendantes de l'ENSO. Nicholson et al. (1997) ont également observé une absence presque totale de signal "ENSO" en Afrique centrale. Une exception relative est la façade occidentale, comprenant le Gabon et le sud du Cameroun, où il peut y avoir une légère tendance à la sécheresse en avril-juin lors d'une année "El Niño". Halpert et al. (1992) ont conclu à l'absence d'une relation significative entre l'ENSO et les anomalies climatiques dans la région méditerranéenne. Cela ne signifie pas qu'il n'y a aucune influence entre la circulation atmosphérique au-dessus du Pacifique et celle de la région méditerranéenne, mais simplement que cette relation est souvent trop faible ou variable pour apparaître clairement dans les statistiques. En revanche, les mêmes chercheurs ont établi une

relation statistique entre les événements de type "La Niña" et les températures en fin d'hiver et au début du printemps au-dessus de la Méditerranée occidentale (Planton, 1999). Chiew et al. (2002) ont étudié la cohérence entre les débits au Maroc et "El Niño" et ont identifié une relation de faible intensité, liée à une diminution des écoulements en mai pendant les événements "El Niño". En termes d'anomalies, un événement "La Niña", l'opposé d'"El Niño", se traduit par des températures de surface océanique plus froides que la normale dans le Pacifique équatorial et central. Cet événement est moins fréquent que "El Niño", avec un intervalle moyen de 0 à 15 ans entre deux événements successifs au cours du dernier siècle. Les analyses statistiques montrent que les températures au-dessus de la Méditerranée sont plus froides que la normale entre les mois de février et de mai suivant un événement "La Niña" (Halpert et al., 1992).

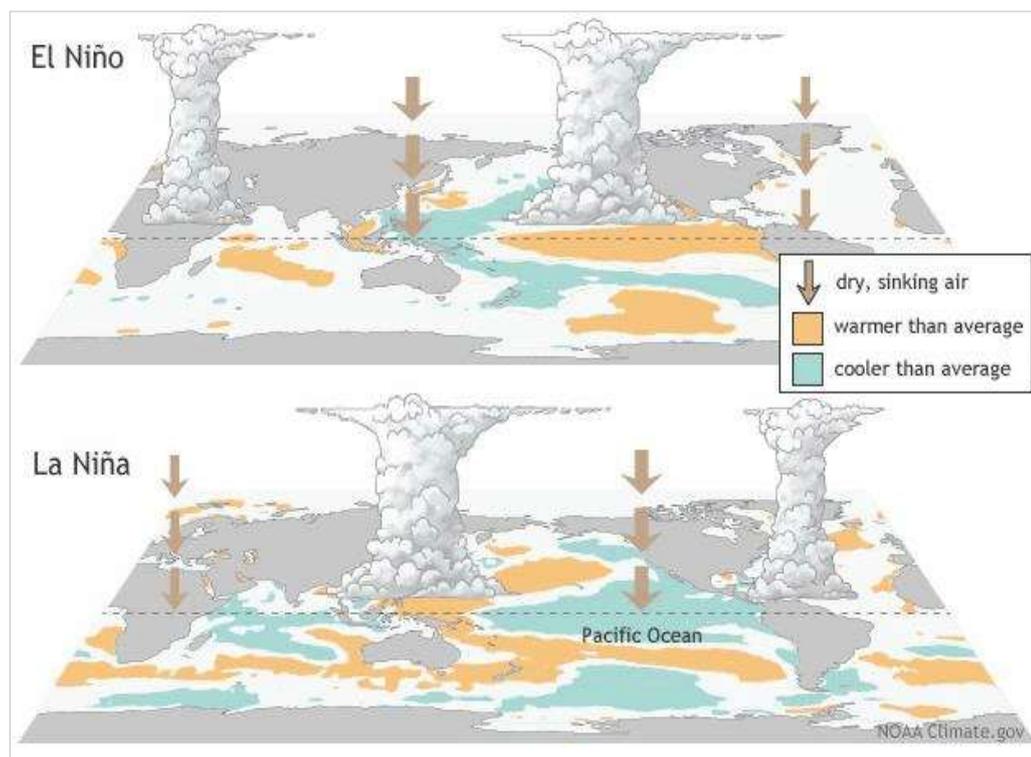


Figure 9 : Phénomènes El Niño et La Niña à l'échelle de la planète (source : NOAA climate.gov).

3.3. Oscillation de la Méditerranée occidentale (WeMOI) :

L'oscillation de la Méditerranée (MO) correspond à un phénomène de variabilité de basse fréquence qui se traduit par des anomalies barométriques, thermiques et pluviométriques opposées entre les sous-bassins Est et Ouest de la Méditerranée (Conte et al., 1989). La MO exerce une influence sur les précipitations dans le bassin méditerranéen (Dunkeloh et al., 2003). Ce phénomène peut être interprété comme une alternance de deux configurations de pression de surface opposées (et de hauteur géopotentielle) : en mode positif, on observe un anticyclone dans la Méditerranée occidentale et sur la péninsule ibérique, tandis qu'en mode négatif, l'anticyclone se situe dans la Méditerranée orientale. La MO affecte principalement la dynamique atmosphérique de l'ensemble du bassin méditerranéen.

Voici le texte corrigé :

L'oscillation de la Méditerranée (MO) correspond à un phénomène de variabilité de basse fréquence qui se traduit par des anomalies barométriques, thermiques et pluviométriques opposées entre les sous-bassins Est et Ouest de la Méditerranée (Conte et al., 1989). La MO exerce une influence sur les précipitations dans le bassin méditerranéen (Dunkeloh et al., 2003). Ce phénomène peut être interprété comme une alternance de deux configurations de pression de surface opposées (et de hauteur géopotentielle) : en mode positif, on observe un anticyclone dans la Méditerranée occidentale et sur la péninsule ibérique, tandis qu'en mode négatif, l'anticyclone se situe dans la Méditerranée orientale. La MO affecte principalement la dynamique atmosphérique de l'ensemble du bassin méditerranéen.

En revanche, l'oscillation de la Méditerranée occidentale (WeMO) est définie spécifiquement dans le cadre du bassin occidental de la Méditerranée et de ses environs (Douguedroit, 1998). Cette définition a été proposée pour la première fois par Martin et Lopez Bustin (2006) et se caractérise par une variabilité de basse fréquence dans la circulation atmosphérique. En phase positive de la WeMO, on observe un anticyclone au niveau des Açores qui englobe le quadrant sud-ouest de la péninsule ibérique, tandis que des basses pressions se forment dans le nord de l'Italie, notamment dans le golfe de Gênes. En phase négative de la WeMO, l'anticyclone se positionne dans la région centrale de l'Europe, au nord de la péninsule italienne, tandis que des zones de basses pressions se développent généralement dans le sud-ouest de la péninsule ibérique, souvent isolées des latitudes nordiques (Maheras et al., 1999). Au cours des phases positives de la WeMO, les vents soufflent du nord-ouest au nord-ouest de la Méditerranée, en particulier le long de la côte catalane, sous l'influence de l'anticyclone des Açores. Pendant les phases négatives, les vents proviennent du secteur oriental, situé en périphérie sud-ouest de l'anticyclone d'Europe centrale.

L'indice de l'oscillation de la Méditerranée occidentale (WeMO_i) est défini comme la différence entre les valeurs normalisées des pressions au niveau de la mer entre Cadix-San Fernando (Espagne) et Padoue (Italie). La WeMO_i annuelle est calculée comme la moyenne des valeurs mensuelles correspondantes de la WeMO_i, tandis que la WeMO_i hivernale est calculée comme la moyenne des valeurs de la WeMO_i de décembre à février (Martin-Vide et al., 2006).

Axe 2 : Enseignements scientifiques sur les changements climatiques passés :

Depuis des milliers d'années, le climat de notre planète a connu des variations à travers différentes époques et régions. Ces changements se sont généralement déroulés sur de longues périodes et ont contribué à façonner la perception de l'homme concernant le climat (Ladurie, 2009).

Par ailleurs, le système climatique évolue au fil du temps sous l'influence d'éléments dynamiques et de forces externes. Parmi ces facteurs, on compte les éruptions volcaniques, les variations solaires, les activités humaines liées à la modification de la composition de l'atmosphère, ainsi que les changements dans l'utilisation des terres. Évoquer le changement climatique revient à reconnaître que l'ensemble de ce système

subit des altérations durables, s'étalant sur une période d'au moins dix ans. Des transformations fondamentales, telles que la réorganisation de la circulation océanique, la déglaciation rapide ou la fonte du pergélisol, sont donc suffisantes pour perturber notre système climatique et entraîner des conséquences importantes (Deblonde, 2011).

I. Aperçu sur les changements climatiques au cours de l'Holocène :

Le Quaternaire est l'ère géologique qui s'étend jusqu'à nos jours. D'une durée estimée à environ deux millions d'années, le début du Quaternaire est marqué par le passage d'un climat tropical du Tertiaire à une période glaciaire, caractérisée par une baisse de plus de 5°C de la température moyenne et une alternance de phases glaciaires et interglaciaires. Ces changements climatiques ont eu des répercussions sur la répartition géographique de la faune et de la flore, tandis que l'humanité commençait à s'organiser en sociétés (Bond et al., 2001).

Les variations de température au cours de l'Holocène, qui couvre les derniers 10 000 ans environ, ont été étudiées dans de nombreuses régions à l'aide d'archives climatiques. Ces archives ont une résolution temporelle d'environ un siècle et sont souvent plus sensibles à certaines saisons. Dans les hautes latitudes de l'Atlantique Nord et des régions voisines de l'Arctique, on a observé des pics de température estivale au début de l'Holocène, entre 10 000 et 8 000 ans avant aujourd'hui. Cela suggère un lien direct entre l'augmentation de l'ensoleillement estival et l'extension des glaces de mer (Kaplan et Wolfe, 2006). Les reconstitutions des températures moyennes dans les latitudes moyennes du Nord montrent un refroidissement progressif des températures de surface de la mer depuis une période chaude au début et au milieu de l'Holocène jusqu'à la fin de l'Holocène (Johnsen et al., 2000). Ce refroidissement pourrait être en réponse aux variations saisonnières et estivales dues aux changements orbitaux à ces latitudes (Renssen et al., 2005). Au milieu de l'Holocène, les reconstitutions basées sur des études polliniques (Prentice et Webb, 1998 ; Prentice et al., 2000) ainsi que sur des macrorestes (MacDonald et al., 2000) montrent une expansion des forêts tempérées vers le nord (Kaplan et al., 2003) et une régression marquée des glaciers.

Des périodes plus chaudes au début et au milieu de l'Holocène ont également été identifiées dans différentes régions du monde, notamment dans le Pacifique Ouest Équatorial (Stott et al., 2004), en Chine (He et al., 2004), en Nouvelle-Zélande (Williams et al., 2004), en Afrique du Sud (Holmgren et al., 2003) et en Antarctique (Masson et al., 2000). Dans les hautes latitudes australes, l'augmentation précoce des températures ne peut pas être expliquée par une simple réponse linéaire à l'ensoleillement estival local, ce qui suggère des réorganisations dans le transport de chaleur latitudinal. En revanche, les reconstitutions des températures dans les régions tropicales, principalement basées sur des archives marines, indiquent un réchauffement progressif de la Méditerranée, de l'Atlantique tropical, de certaines zones de l'océan Pacifique et de l'océan Indien au cours de l'Holocène, peut-être en réponse à l'augmentation de l'ensoleillement annuel moyen dans les tropiques (Stott et al., 2004).

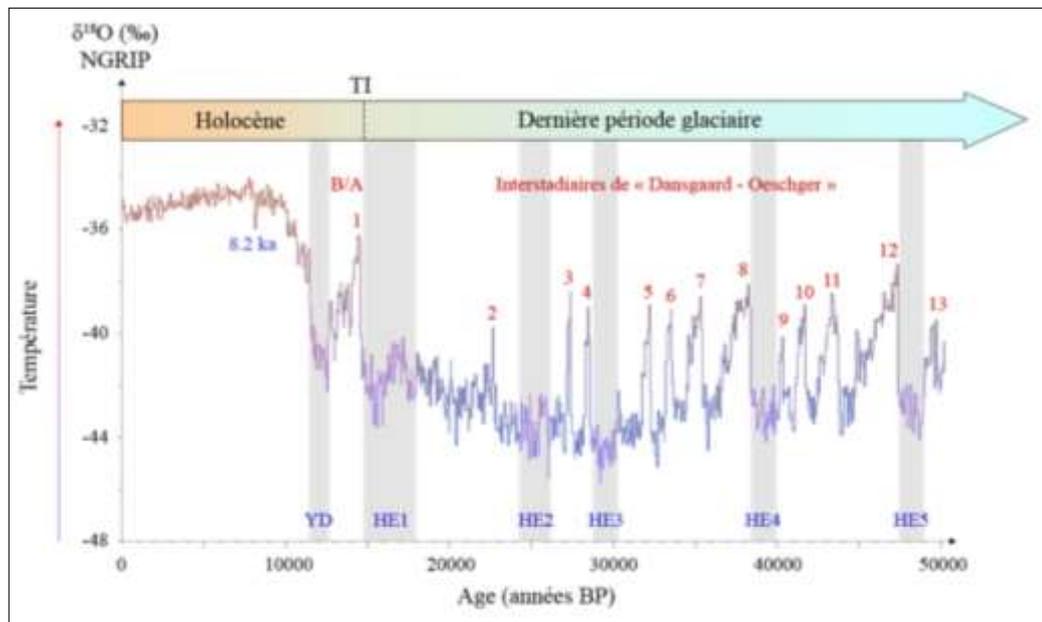


Figure 10 : Le climat des derniers 50 000 ans BP, à partir des données glaciologiques (Groenland). Les événements climatiques abrupts de la dernière période glaciaire sont identifiés par des numéros en rouge, tandis que les bandes bleues représentent les événements d'Heinrich. YD : Younger Dryas (d'après Penaud, 2009).

Les enregistrements provenant des zones extratropicales, avec une résolution temporelle de l'ordre du siècle, montrent en effet l'existence de périodes plus chaudes qui ont perduré pendant plusieurs siècles, parfois avec des écarts de température de plusieurs degrés par rapport aux dernières décennies. Il est très probable que ces périodes chaudes locales n'étaient pas globalement synchrones et qu'elles se sont produites à des moments où certaines zones des océans tropicaux étaient plus fraîches qu'elles ne le sont aujourd'hui (Lorenz et al., 2006). Lorsque les modèles couplés de climat actuels sont forcés avec des paramètres orbitaux correspondant à il y a environ 6 000 ans, ils parviennent à reproduire avec précision les changements de température et de précipitations observés. Cependant, la température moyenne globale simulée reste presque inchangée, avec une variation inférieure à 0,4°C. Ce résultat est en accord avec ce que l'on peut attendre en raison de la saisonnalité du forçage orbital. En raison des réponses régionales différentes entre les tropiques et les hautes latitudes, ainsi qu'entre les hémisphères, les concepts couramment utilisés tels que "Optimum thermique du Moyen Holocène" ou "Altithermal" n'ont pas de signification globale et devraient toujours être utilisés dans un contexte régional spécifique. La couverture spatiale limitée, la résolution temporelle et la datation des enregistrements paléoclimatiques de l'Holocène ne permettent pas actuellement de déterminer s'il y a eu des périodes de réchauffement comparable à celui observé au cours de la seconde moitié du XXe siècle, et ce sur plusieurs décennies (Masson et al., 2005).

1. Le contexte climatique général depuis les derniers 20 000 ans :

Plusieurs grandes phases climatiques se sont succédé depuis environ 20 000 ans BP (avant le présent) jusqu'à nos jours. Le Dernier Maximum Glaciaire (LGM), qui a eu lieu il y a environ 18 000 à 21 000 ans BP, représente la période de refroidissement maximale de la dernière période glaciaire. Il a été suivi d'une période de déglaciation, datée de 15 000 à 10 000 ans BP, correspondant à la phase maximale de fonte des calottes glaciaires et à une période de réchauffement dans l'hémisphère Nord.

Cependant, cette période de réchauffement a été interrompue entre 10 500 et 12 800 ans BP par un brusque refroidissement connu sous le nom de Dryas récent (ou Younger Dryas, abrégé YD) (Foucault, 2009). Son enregistrement à l'échelle de l'Atlantique Nord est présenté dans la figure n°11 ci-dessus, en utilisant les variations de la composition isotopique de l'oxygène mesurées dans les glaces du Groenland comme indicateur des variations de la température atmosphérique. Le "YD" se caractérise par une baisse du $\delta^{18}\text{O}$ des glaces. Il est également documenté par les variations isotopiques de l'oxygène mesurées dans les carbonates de foraminifères planctoniques (Essallami et al., 2007). Les limites des événements mentionnés précédemment sont indiquées en gris et correspondent à une augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ de ces carbonates. L'YD s'est traduit par un refroidissement soudain en Méditerranée occidentale, en ce qui concerne les températures de surface de l'eau, tandis que son impact thermique semble moins marqué dans le bassin oriental (Martrat, 2004).

2. Le changement climatique au cours des derniers 2000 ans :

Certaines études menées depuis la publication du Troisième Rapport de Synthèse (TAR) indiquent une variabilité de la température de l'hémisphère Nord à l'échelle de plusieurs siècles, supérieure à celle qui était présentée dans le TAR. Ces travaux mettent en évidence que les reconstitutions des températures passées sont sensibles aux types d'indicateurs paléoclimatiques utilisés ainsi qu'aux méthodes statistiques employées pour calibrer et combiner les données. La plus grande variabilité détectée dans certaines études récentes concerne principalement des périodes caractérisées par des températures plus fraîches, notamment aux 12^{ème}-14^{ème} siècles et aux 17^{ème}-19^{ème} siècles. Seule l'une des nouvelles reconstitutions suggère des températures légèrement plus élevées (notamment au 11^{ème} siècle), mais ces données demeurent dans la fourchette d'incertitude publiée dans le TAR.

Le Troisième Rapport de Synthèse (TAR) avait mis en évidence le caractère exceptionnel du réchauffement observé à la fin du 20^{ème} siècle par rapport aux températures des derniers millénaires. Les travaux récents viennent renforcer cette conclusion. Il est désormais très probable que la moyenne des températures de l'hémisphère Nord a été plus élevée au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle que pendant n'importe quelle autre période de 50 ans au cours des 500 dernières années (voir figure 11). Il est également vraisemblable que cette période de 50 ans ait été la plus chaude dans l'hémisphère Nord au cours des 1 300 dernières années, et que ce réchauffement ait affecté des zones géographiques plus vastes que tout autre épisode de 50 ans au cours de ces 1 300 dernières années. Ces conclusions sont particulièrement fiables pour les températures estivales dans les régions continentales extratropicales et pour les périodes les plus récentes, en raison de la disponibilité limitée de données de reconstitution pour les périodes plus anciennes.

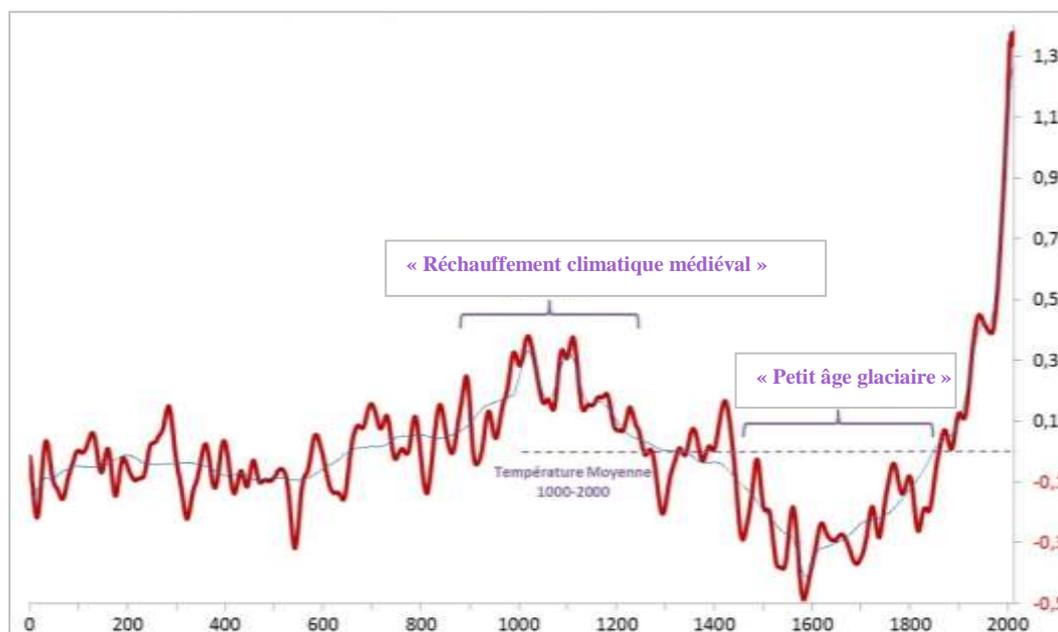


Figure 11 : Évolution de la température de l'hémisphère Nord depuis 2000 ans (Sonechkin et al. Puis NASA).

Les faibles variations des concentrations préindustrielles en CO₂ et en CH₄ au cours du dernier millénaire sont en cohérence avec les reconstitutions des températures de l'hémisphère Nord. En d'autres termes, des fluctuations climatiques plus importantes que celles que nous pouvons reconstituer impliqueraient probablement des variations plus marquées de ces concentrations de gaz à effet de serre. Cette stabilité des gaz à effet de serre avant l'ère industrielle fournit donc une preuve indirecte que les variations de la température globale ont été relativement limitées à l'échelle de la décennie et du siècle.

Les simulations paléoclimatiques sont, dans l'ensemble, cohérentes avec les reconstitutions des températures de l'hémisphère Nord au cours du dernier millénaire. Plusieurs études indiquent que l'augmentation des températures de surface observée depuis 1950 ne peut être expliquée sans prendre en compte les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine comme l'un des principaux facteurs de forçage climatique (ceci est très bien établi). De plus, il est hautement improbable que ce réchauffement ne soit qu'une continuation d'un épisode froid qui aurait précédé le 20^{ème} siècle.

II. Généralités sur les principales causes des changements climatiques de l'Holocène :

L'Holocène est une période géologique caractérisée par plusieurs variations climatiques. Ces oscillations climatiques peuvent être expliquées par divers facteurs de forçage, notamment les variations solaires, les éruptions volcaniques et les interactions naturelles entre les océans et l'atmosphère (Bond et al, 2001).

L'évolution climatique à l'échelle des temps géologiques est influencée par divers facteurs naturels, parmi lesquels trois jouent un rôle majeur :

1. Le forçage orbital :

La théorie astronomique du climat, également connue sous le nom de théorie des cycles de Milanković, est une explication des variations climatiques à long terme sur Terre en fonction de l'évolution du mouvement orbital de la Terre autour du Soleil. Cette

théorie a été proposée par le scientifique yougoslave Milutin Milanković en 1924. Elle repose sur trois paramètres orbitaux de la Terre, connus sous le nom de cycles de Milanković (Hays et al, 1976) :

- ✓ L'excentricité de l'orbite terrestre (100 000 et 400 000 ans) ;
- ✓ L'obliquité ou inclinaison de l'axe de rotation de la Terre (41 000 ans) ;
- ✓ La précession des équinoxes (19 000 et 23 000 ans).

Par ailleurs, le facteur principal affectant le climat de l'Holocène est lié au forçage orbital, et plus particulièrement la précession. Ces changements d'insolation ont un impact significatif dans la redistribution de l'énergie, à l'échelle temporelle (la saison), mais aussi spatiale (latitudinale) (Maxime, 2008). Pendant l'Holocène Récent, les changements induits par la précession placent le solstice d'Été de l'hémisphère Nord au périhélie (Aujourd'hui le périhélie est plus près du solstice d'Hiver). Il en résulte une plus grande insolation d'Été à toutes les latitudes de l'hémisphère Nord (Atteignant $\sim 40^\circ\text{W}/\text{m}^2$ de plus qu'aujourd'hui à 60°N à $\sim 25^\circ\text{O}/\text{m}$ plus élevé qu'à l'équateur). Ainsi, l'insolation de Juillet a atteint un maximum vers 12 000 ans. Les différences pendant les Étés de l'hémisphère Sud sont plus faibles, centrées aux faibles latitudes et de signe opposé. Par exemple, l'insolation de Janvier à 20°S pendant l'Holocène Récent était de $30^\circ\text{O}/\text{m}^2$ sous les valeurs actuelles (Debret, 2008).

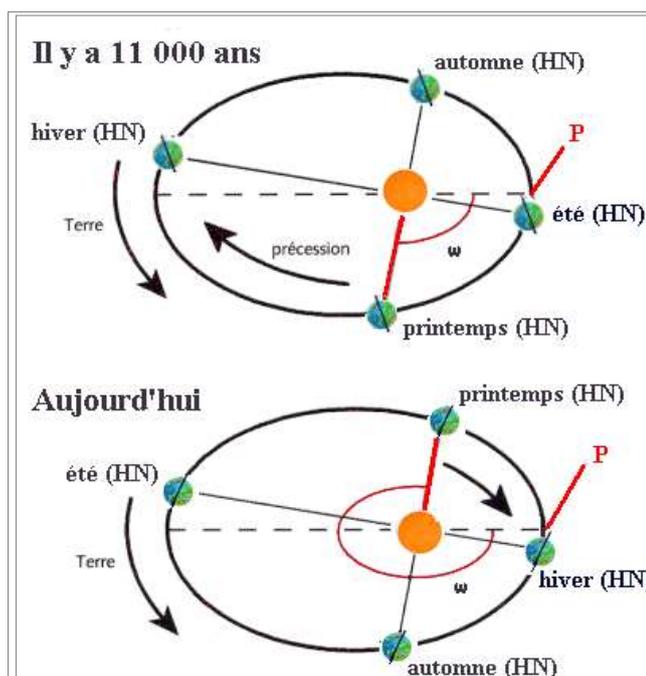


Figure 12 : Configuration orbitale il y a 11 000 ans (en haut) et actuelle (en bas). Source : site-web : <http://acces.inrp.fr/acces/terre/paleo/variations/paleoclimats/syntheses/variations-duclimats/astro/milanko4.htm>.

2. Le forçage solaire :

Le forçage solaire, lié aux variations de l'activité du Soleil, est en effet un facteur important qui peut influencer le climat de la Terre. Ces variations de l'activité solaire sont cycliques, avec des périodes allant de quelques années à plusieurs siècles. Les cycles solaires les plus courts, comme le cycle de Schwabe d'environ 11 ans, sont bien connus et sont associés à des variations dans le nombre de taches solaires et l'émission d'énergie par le Soleil. Les phases de faible activité solaire, donc de diminution de

l'irradiance, sont associées à des dégradations climatiques de courte période (Servonnat et al, 2010).

L'énergie solaire reçue par la planète est modulée, par les variations des paramètres astronomiques qui caractérisent la révolution de la Terre autour du Soleil et l'inclinaison de l'axe des pôles par rapport au plan de l'écliptique. L'impact de ces variations sur l'énergie solaire moyenne totale reçue par la planète est négligeable à l'échelle hémisphérique sur les 1000 dernières années (Lean, 1995). Cependant, cette évolution lente de la configuration orbitale de la Terre a un impact sur la répartition régionale et saisonnière de l'insolation, qu'il faut prendre en compte. L'influence du forçage orbital est essentiellement significative en Été au Nord de 65°N, avec une baisse en 1 000 ans du rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère d'environ 1,5 W/m²e (Hoyt, 1998).

3. Le forçage volcanique :

Plusieurs études ont montré que l'activité volcanique est un autre moteur de la variabilité climatique. Les grandes quantités de particules et de gaz émises dans l'atmosphère suite aux éruptions empêchent le rayonnement solaire de passer. Toute fluctuation de ce rayonnement a une incidence sur le climat, en particulier sur la température (Budyko, 1984).

Le volcanisme entraîne une chute des températures à court terme, mais s'avère être un puissant facteur de réchauffement à long terme. Les éruptions volcaniques sont parfois si violentes que de grandes quantités de poussière et de gaz sont projetées à haute altitude dans l'atmosphère. Les particules qui atteignent la stratosphère peuvent persister pendant plusieurs années. Elles provoquent une baisse des températures en réfléchissant le rayonnement solaire (Touchard, 2002). Celle de l'éruption du Pinatubo en juin 1991 aux Philippines a ainsi atteint une vingtaine de kilomètres d'altitude. Une fois dans la stratosphère, les gaz volcaniques sont transformés par réaction chimique en particules fines d'aérosols sulfatés, qui seront transportées vers les pôles en quelques mois, avant de retomber à la surface (Baroni, 2006). Les dépôts d'acide sulfurique des éruptions tropicales anciennes détectés dans les carottes de glace de l'Antarctique et du Groenland constituent ainsi des indicateurs fiables de l'activité volcanique pour la période pré-instrumentale. Ces dépôts témoignent ainsi d'une activité volcanique particulièrement intense durant le XIIIe siècle et, dans une moindre mesure, au XIXe siècle. Ce sont ces particules fines formées dans la stratosphère qui vont perturber le rayonnement solaire incident.

En effet, en raison de leur composition et de leur taille, ces aérosols réfléchissent le rayonnement solaire (principalement dans l'ultraviolet et le visible), mais absorbent une partie du rayonnement infrarouge solaire et terrestre (Budyko, 1984). Pour la seule éruption bien observée lors de la période instrumentale, cet effet s'est traduit par un réchauffement de la basse stratosphère et un refroidissement net des températures de quelques dixièmes de degré à la surface de la Terre, pendant les deux premières années suivant l'éruption, avec un retour progressif à la normale au bout de trois ans. Cette éruption sert de référence pour reconstruire le forçage radiatif des éruptions qui ont jalonné le dernier millénaire (Zielinski et al, 1996).

Axe 3 : Aperçu sur les méthodes d'observation du climat passé

L'étude du paléoclimat vise à déterminer de manière plus précise les variations climatiques passées, leurs causes, leur échelle temporelle et leur ampleur. Elle consiste en une reconstitution précise du comportement de l'écosystème planétaire lors des transitions entre les principales périodes glaciaires et interglaciaires. Le climat résulte donc des interactions entre les différents compartiments environnementaux présents à la surface de la Terre : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère et la lithosphère (Bolzano, 1994).

La paléoclimatologie est une discipline cruciale qui permet d'analyser les situations climatiques passées, offrant ainsi des informations essentielles pour comprendre les limites de notre système climatique. De plus, elle offre une diversité d'exemples naturels d'évolutions climatiques, sous diverses influences, ce qui contribue à améliorer notre compréhension et notre modélisation des facteurs qui influencent le climat actuel (Bradley, 1999). L'étude des variations climatiques naturelles passées est donc une étape indispensable pour toute projection dans le futur.

Dans cet axe, nous allons introduire les méthodes largement utilisées pour reconstituer l'évolution du climat au cours du dernier millénaire. De plus, cette approche fait partie intégrante du développement analytique de notre travail. Ce volet a débuté par la définition d'un protocole d'analyse basé sur la spectrométrie de fluorescence X (XRF). Par la suite, il a englobé la mise en œuvre d'un protocole de nettoyage chimique des échantillons de foraminifères avant leur mesure, ainsi que la technique instrumentale permettant de mesurer le rapport Mg/Ca de la calcite des tests de foraminifères par spectrométrie d'émission (ICP).

I. Généralité sur les indices des variations climatiques passées : les archives du climat :

Pour comprendre les climats passés, il est essentiel de rechercher des indicateurs qui reflètent les conditions climatiques de l'époque où ils ont été préservés. Ces indicateurs se trouvent sur le terrain, préservés par la nature.

Les informations climatiques enregistrées dans ces archives nous offrent la possibilité de reconstituer l'évolution de certains paramètres climatiques cruciaux. Ces données sont associées à des échelles spatiales et temporelles spécifiques qui leur sont propres.

Tableau 2 : Les paramètres climatiques et leurs échelles spatiales et temporelles (Berger, 1992).

Types d'archives	Résolution temporelle dans l'échantillonnage	Période couverte (ans)	Paramètres climatiques dérivés
Cerne des arbres	an-saison	10 ⁴	T H C B V M L S
Sédiments lacustres	An	10 ⁴ -10 ⁶	T B M
Carottes de glace polaire	An	10 ⁵	T H C B V M S
Carottes de glace des latitudes moyennes	An	10 ³	T H B V M S
Dépôts coralliens	An	10 ⁵	T C T L
Loess	10 ans	10 ⁶	H C B M
Carottes océaniques	100 ans	10 ⁷	T C B M
Pollens	1000 ans	10 ⁵	T H B
Paléosols	100 ans	10 ⁵	T H C V
Roches sédimentaires	2 ans	10 ⁷	H C V M L
Données historiques	jour-heure	10 ³	T H B V M L S

T=température, H=humidité ou précipitation, C=composition chimique de l'air (a), de l'eau (w), ou des sols (s), B=information sur la biomasse, V=éruptions volcaniques, M=champ géomagnétique, L=niveau des mers, S= activité solaire.

La paléoclimatologie est une science en développement rapide qui peut nous fournir des informations sur les conditions climatiques passées à partir de diverses sources de données telles que les sédiments marins et lacustres ainsi que les carottes de glace (Bradley, 1999). Les données paléoclimatiques, obtenues en utilisant des indicateurs climatiques appelés "proxies", sont reconnues par les gestionnaires des ressources naturelles, les autorités gouvernementales et les organisations internationales comme une alternative permettant d'établir une base de données sur le climat sur des millénaires. Ces données, une fois analysées, nous aident à comprendre et évaluer les changements récents du climat. En somme, les informations qui nous permettent de caractériser l'état de l'environnement dans le passé, en particulier l'histoire climatique de la Terre, sont préservées dans des archives naturelles (Chaline, 1995).

Par conséquent, les paléoclimatologues reconstituent généralement le climat en se basant sur diverses archives naturelles qui enregistrent de manière indirecte les changements climatiques. Les séries temporelles obtenues à partir de ces enregistrements sont souvent appelées "proxies climatiques", "proxy-données" ou simplement "proxies".

1. Archives naturelles continentales :

De nombreux outils et méthodes ont été développés pour extraire un signal climatique aussi précis que possible à partir d'analyses biologiques ou physico-chimiques d'archives naturelles, ainsi que pour étudier mécaniquement ou statistiquement leurs relations avec les variables climatiques (Masson et al., 2013). On parle alors de "proxies climatiques", un terme dérivé de l'anglais signifiant "par procuration", car ces estimations du climat sont assez indirectes. Par exemple, certaines caractéristiques des sédiments sont utilisées pour caractériser les crues. L'étude des pollens, des insectes et des micro-organismes des sédiments permet de déterminer les changements passés des températures ou des précipitations (Defer et al., 2003).

La densité, l'épaisseur et la composition en isotopes stables du carbone et de l'oxygène des anneaux de croissance des arbres fournissent des enregistrements qui, selon les régions, seront principalement contrôlés par la température de la saison de croissance des arbres ou le stress hydrique. La mesure la plus simple, l'épaisseur des cernes annuels, exige l'analyse d'un grand nombre d'individus et la correction des effets de changements de croissance liés à l'âge des arbres. Les glaciers et les calottes polaires offrent également des enregistrements des variations passées du climat, via l'accumulation annuelle de neige (issue de l'épaisseur des couches annuelles, corrigée des changements de densité et de la déformation) ou la composition isotopique de la neige. La composition isotopique de la vapeur d'eau dans l'atmosphère dépend de l'histoire de la condensation, qui provoque une distillation. Ainsi, dans les régions tempérées ou polaires, la composition isotopique est principalement gouvernée par les changements de température de condensation. Dans les régions tropicales ou en Méditerranée, elle est également fortement affectée par les phénomènes de convection atmosphérique, qui contrôlent également la quantité de précipitations.

Les estimations des changements de température à l'échelle hémisphérique sont généralement plus nombreuses dans l'hémisphère Nord, pour lequel la couverture offerte par les enregistrements terrestres est plus représentative. Un ensemble de méthodes statistiques a été développé pour produire des estimations de la température moyenne à la surface de l'hémisphère Nord (parfois restreinte à une saison, l'été, et aux latitudes extratropicales), à partir des enregistrements paléoclimatiques disponibles, en tirant parfois parti de la cohérence spatiale des variations de température dues aux modes de variabilité de grande échelle.

2. Archives naturelles marines :

Un travail de synthèse similaire à celui mentionné précédemment pour les continents est en cours pour reconstituer les températures marines au cours des derniers millénaires. En effet, le prélèvement et l'analyse de sédiments marins dans des zones à fort taux de sédimentation, ainsi que l'examen des stries de croissance des coraux et des bivalves, permettent de caractériser les variations passées de l'état de l'océan (Anand et al, 2003). Leur analyse biogéochimique permet de reconstruire des variables telles que la température (parfois la salinité), avec une résolution temporelle généralement de l'ordre de la décennie (dans le cas des régions côtières) à plusieurs décennies dans les régions à plus faible taux de sédimentation (sédiments plus profonds et éloignés de la côte) (Deer et al, 1992). Les analyses géochimiques les plus couramment utilisées reposent sur le rapport entre certains éléments traces (en particulier le rapport magnésium sur calcium, Mg/Ca) dans la coquille (calcite). Il y a aussi l'abondance relative des alcénones à 37 atomes de carbone, des molécules organiques produites par certaines espèces du phytoplancton marin (Hays et al. 1976).

Les alcénones fournissent des estimations de température correspondant à la saison de production des algues. Ainsi, dans les régions tropicales et subtropicales, les températures de surface reconstruites sont celles de la fin de l'hiver. Aux hautes latitudes, c'est en saison chaude que les flux organiques exportés sont les plus importants, ce qui signifie que les températures reconstruites dans les eaux polaires correspondent aux températures estivales (Anand et al, 2003). En revanche, la

production d'alcénones aux moyennes latitudes se caractérise par deux pics de production : un premier au printemps et un second en automne. De ce fait, les températures enregistrées dans ces régions sont plus proches de la moyenne annuelle. Les études basées sur l'analyse du rapport Mg/Ca dans les coquilles de foraminifères planctoniques montrent que sa valeur augmente de manière exponentielle avec les températures de surface océaniques (Anand et al, 2003).

Il convient de noter que ce rapport dépend également de la salinité, de la concentration en ions carbonates et du pH des eaux dans lesquelles les foraminifères se développent et donc calcifient. La dissolution post-dépôt des coquilles de foraminifères peut altérer le rapport Mg/Ca. En effet, la calcite riche en Mg est plus sensible à la dissolution, ce qui se traduit par une sous-estimation des températures de surface océaniques. Les mesures géochimiques et isotopiques réalisées sur les coraux tropicaux ou profonds complètent celles effectuées sur les sédiments (Elderfield et al, 2000).

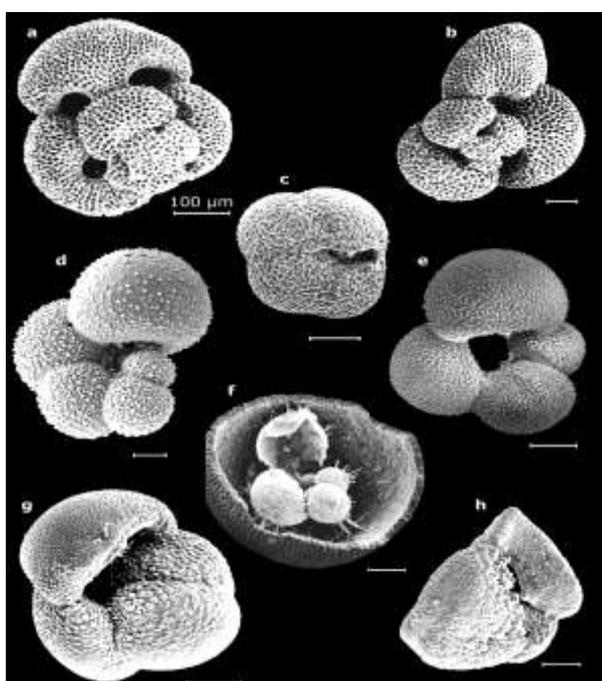


Figure 13 : Aperçu sur quelques types de Foraminifères

(Source : <https://foramsetal.wordpress.com/research/mgca-paleothermometry>)

Les stries de croissance des coraux permettent effectivement d'accéder à la variabilité saisonnière, mais sur des intervalles de temps relativement courts. Les coraux profonds, dont l'étude connaît un essor important, sont des archives prometteuses, tant pour les reconstructions de températures que pour décrire la dynamique de l'océan profond (Stéphan et al, 2015).

L'une des principales incertitudes concernant ces enregistrements paléoclimatiques marins réside dans leur datation. Celle-ci peut reposer sur l'identification de variations saisonnières du dépôt sédimentaire se manifestant par des strates facilement repérables, ainsi que sur la datation au carbone 14 (^{14}C) des tests de foraminifères ou des coraux (Jorissen et al, 2007). Cependant, il existe une différence de teneur en ^{14}C entre l'atmosphère, l'océan de surface et l'océan profond. En effet, la teneur en carbone (^{14}C) des eaux de surface dépend du mélange entre l'océan de surface et l'océan profond, dont les teneurs en ^{14}C sont plus faibles (eaux plus anciennes). De ce fait, la calcite des coquilles d'organismes marins vivant dans les eaux de surface semblera avoir un âge en

apparence plus ancien que celui d'un organisme terrestre se développant au même moment et utilisant le carbone atmosphérique contemporain (Hays et al, 1976).

Enfin, le dernier siècle est souvent manquant dans les séries temporelles marines du dernier millénaire en raison de la perte du sédiment superficiel lors des carottages longs. Des carottages courts complémentaires permettent cependant de pallier ce problème. Malgré des différences en termes d'amplitudes, principalement liées aux niveaux de précision des différents indicateurs, les enregistrements paléoclimatiques marins révèlent de grandes tendances cohérentes avec celles issues des enregistrements continentaux précédemment décrits.

3. Archives glaciaires :

La glace est un excellent support pour l'enregistrement paléoclimatique. Elle peut être échantillonnée dans les glaciers de montagne et dans les calottes polaires. Cependant, les premiers ne permettent de remonter que sur quelques dizaines de siècles en arrière, tandis que les seconds, auxquels nous nous attacherons plus particulièrement, offrent la possibilité de remonter sur plusieurs centaines de millénaires (Frédéric, 2009).

Pour reconstituer les signaux paléoclimatiques contenus dans la glace, il est nécessaire de la dater. Cependant, au-delà des quelques derniers siècles ou millénaires, où l'on peut encore reconnaître des strates saisonnières, il n'existe pas de moyen d'effectuer une datation directe. En première approximation, on peut procéder en modélisant le tassement de cette glace sous son propre poids, qui suit une fonction exponentielle de la profondeur. Toutefois, un simple tassement peut être observé uniquement lorsque l'écoulement latéral de la glace est négligeable, ce qui ne se produit qu'au sommet d'une calotte polaire, à condition que ce sommet n'ait pas changé de position au fil du temps (Robert, 2005).

L'écoulement de la glace doit donc être pris en compte, de même que les variations dans le temps de l'intensité des précipitations. Pour établir cette chronologie de manière plus précise, on utilise également des marqueurs téphrochronologiques, car les poussières volcaniques sont souvent présentes dans les glaces, ainsi que des comparaisons avec l'évolution d'indicateurs paléoclimatiques bien établis provenant de carottes de sédiments marins datées.

De manière générale, la collecte des échantillons de glace se fait par carottage, soit de manière mécanique, soit par chauffage. Il est important de noter que les échantillons de glace ainsi recueillis ne se sont pas formés à l'endroit où on les trouve, à l'exception du sommet de la carotte. En effet, depuis leur dépôt initial, leurs altitudes et leurs positions géographiques ont pu changer en raison de l'accumulation de glace, du tassement, de l'écoulement ou de l'enfoncement du socle par isostasie. De plus, en raison de l'écoulement de la glace, des plissements ou des écaillages peuvent survenir, ce qui peut entraîner des erreurs d'interprétation (Raynaud et al, 2002).

Au cours des cinquante dernières années, de très nombreux carottages de grande profondeur ont été réalisés dans la glace des calottes polaires. Les plus longs ont traversé plus de 3 kilomètres de glace, permettant de remonter dans le temps sur plus de 800 000 ans. L'étude physique, chimique et géochimique de cette glace a fourni de nombreuses informations sur l'évolution des climats (Oerlemans, 2005).



Photo 6 : Photo exemplaire d'une carotte de glace (source : site web Heidi Roof).

4. Les enregistrements marins : en tant qu'archives palé-océanographiques et paléo-climatiques :

En océanographie, les paramètres de température (T) et de salinité (S) revêtent une importance particulière. Ils servent de cartes d'identité permettant d'identifier les différentes masses d'eau profondes. La reconstitution de ces deux paramètres au fil du temps permet d'étudier l'évolution des masses d'eau en relation avec les changements climatiques (Duplessy et al, 1988). La paléocéanographie offre ainsi la possibilité de reconstituer l'évolution des paramètres océaniques dans le passé et de mieux comprendre le rôle de l'océan dans les changements climatiques.

Pour accéder et étudier les dépôts de sédiments les plus anciens, les océanographes ont développé dès la fin du XIXe siècle des carottiers, encore utilisés aujourd'hui. Un carottier est constitué d'un tube permettant de remonter à la surface des carottes de sédiments. Une carotte est un prélèvement d'un volume cylindrique de sédiment, obtenu par gravité ou par forage, à l'aide d'un tube en acier de longueur variable en fonction du substrat échantillonné (de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres de long). La carotte conserve la disposition des différentes strates qui la composent, de sorte que le sédiment le plus ancien se trouve en profondeur, tandis que le plus récent se situe à la surface de la carotte, à l'interface entre l'eau et le sédiment (Marshak, 2010).



Photo 7 : Section exemplaire d'une carotte marine (source : site web Heidi Roof).

Le sédiment marin a deux origines : l'une détritique et l'autre biogénique. Le sédiment d'origine détritique correspond aux matériaux qui ont été arrachés aux continents. La nature des roches détritiques terrigènes dépend de la nature des roches soumises à

l'érosion, du régime climatique de la région d'alimentation, des conditions hydro-aérodynamiques de transport et de dépôt, ainsi que des transformations post-dépôt, telles que la diagenèse. Le sédiment biogène, quant à lui, est constitué de l'ensemble des micro-organismes fossilisés qui ont vécu à la surface (planctonique) ou en profondeur (benthique) des océans. Une grande proportion des micro-organismes planctoniques et benthiques possède un squelette minéralisé, soit en carbonate de calcium (CaCO_3 , calcite ou aragonite), comme par exemple les foraminifères ou certaines micro-algues du nanoplancton, soit en silice (SiO_2), comme les diatomées et les radiolaires (Fairbanks et al, 1980). Après la mort d'un individu, son squelette devient une particule sédimentaire. Il s'ensuit que la surface des océans produit une pluie continue de très fines particules. Cette pluie, composée de matières organiques non encore oxydées, de calcaire et de silice, produit une couche sédimentaire sur le plancher océanique. Notons que les foraminifères benthiques vivant à la surface du sédiment existent même à de très grandes profondeurs (plus de 5000 mètres) (Fairbanks et al, 1980).

Les alternances de climats chauds et froids que la Terre a connues au cours de son histoire récente sont enregistrées dans les sédiments marins, car la nature même de ce sédiment fournit certaines informations globales. Au cours des périodes interglaciaires, la sédimentation est dominée par des apports carbonatés (foraminifères, coccolithophoridés, etc.), alors que durant les périodes glaciaires, la sédimentation devient essentiellement terrigène, déposant des couches de matériel détritique, produits de l'érosion continentale, au fond de l'océan (Ganssen et al, 2000).

1. La géochimie marine : les assemblages des foraminifères :

Les foraminifères sont des organismes planctoniques ou benthiques, dont certains forment un test en calcite. Ils sont utilisés depuis de nombreuses années, pour des études paléocéanographiques, car leurs tests sont retrouvés en abondance dans les carottes sédimentaires marines. Parmi les espèces planctoniques, les plus utilisées (telles que *Globigerinoides ruber* pour les régions chaudes et *Globigerina bulloides* pour les régions tempérées ou froides) vivent à la surface des océans. Il existe une autre catégorie de foraminifères planctoniques : des espèces dites planctoniques profondes. Plusieurs études avaient déjà montré que les foraminifères planctoniques profonds pouvaient enregistrer les conditions de la thermocline (Fairbanks et al, 1980 ; Mülitz et al, 1997 ; Ganssen et al, 2000). Cependant, les profondeurs de croissance des foraminifères planctoniques profonds déduites de ces différentes études semblaient contradictoires les unes par rapport aux autres.

1.4. Les analyses isotopiques :

La composition isotopique de l'oxygène des foraminifères est l'un des outils les plus couramment utilisés en paléoclimatologie, comme cela a été démontré dans les travaux d'Emiliani (1955). Cette méthode permet de reconstituer l'évolution du $\delta^{18}\text{O}$ (delta 18O) de l'eau de mer, lequel est lié à des facteurs tels que la température, les volumes de glace et donc la salinité. C'est un outil essentiel pour comprendre les paramètres hydrologiques des masses d'eau du passé.

Dans les années 50 et 60, des études ont révélé une relation entre la composition isotopique de l'eau de mer, celle de la calcite des foraminifères, et la température de l'eau de mer. En effet, le $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite est directement corrélé à celui de l'eau de mer, par un

fractionnement isotopique qui dépend de la température. Environ 0,25 par mille (‰) d'augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite sont observés pour chaque baisse de 1°C de la température de l'eau de mer (Emiliani, 1955).

Ainsi, un refroidissement local des eaux se traduit par une augmentation du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans la coquille des foraminifères, de la même manière qu'une augmentation du volume des glaces continentales (Emiliani, 1955). L'analyse de la composition isotopique des foraminifères offre donc un moyen très sensible de suivre l'évolution globale du climat de la planète. Cependant, il peut être complexe de distinguer clairement la part du signal global due aux changements de volume des calottes glaciaires de celle résultant des variations locales de la température de l'eau de l'océan (Lea, 1993).

1.4.1. La signature $\delta^{18}\text{O}$

Chaque changement de phase de l'eau de mer s'accompagne d'un fractionnement isotopique, qui dépend de la masse des isotopes et est généralement exprimé en notation "delta." Cette notation reflète le rapport de la quantité de l'isotope lourd sur celle de l'isotope léger, en comparaison avec un étalon standard appelé PDB, qui signifie "Pee Dee Belemnite" (Urey, 1947) :

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\left\{ \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard PDB}}} \right\} - 1 \right] \times 1000$$

En ce qui concerne les variations eustatiques à l'échelle orbitale, il est largement accepté que lorsque l'évaporation augmente pendant la formation des grandes calottes glaciaires, l'isotope ^{16}O est préférentiellement emporté dans la phase gazeuse, ce qui enrichit l'océan en ^{18}O et alourdit la signature en $\delta^{18}\text{O}$ dans les tests des foraminifères. Les mesures effectuées sur les foraminifères benthiques des bassins océaniques profonds ont ainsi permis d'évaluer les grandes variations du niveau marin au cours des derniers cycles climatiques et à l'échelle du Plio-Pléistocène (Waelbroeck et al, 2002 ; Lisiecki et al, 2005).

À l'échelle de l'Holocène, le signal en $\delta^{18}\text{O}$ analysé à partir de foraminifères dans des environnements peu profonds est davantage utilisé comme indicateur des conditions de température (SST) et de salinité (SSS) des eaux environnantes. Sous l'influence des conditions environnementales locales telles que la variation des SST, l'intensification des apports fluviaux, l'augmentation de la pluviosité ou de l'évaporation, le signal enregistré peut ainsi s'alléger ou au contraire s'alourdir (Jousseume, 1999). En effet, étant donné que l'évaporation augmente la SSS et la $\delta^{18}\text{O}$ de l'océan, tandis que les précipitations ont une $\delta^{18}\text{O}$ plus légère que l'eau de mer (d'après le standard SMOW, pour "Standard Mean Ocean Water"), la valeur du rapport isotopique mesurée dans les carbonates est fortement corrélée à la salinité. De plus, il a été empiriquement démontré que l'enrichissement en oxygène des carbonates de calcium lors de la formation des tests carbonatés de foraminifères dépend de la température de l'eau de mer environnante (Epstein et al, 1953).

1.4.2. La signature $\delta^{13}\text{C}$

Les deux isotopes stables du carbone, le ^{13}C et le ^{12}C , sont répartis de manière inégale à la surface de la Terre. Les eaux océaniques de surface sont enrichies en ^{13}C en raison de la

production primaire, qui préfère utiliser le ^{12}C du carbone inorganique présent dans son environnement immédiat lors de la photosynthèse, réduisant ainsi la concentration en ^{13}C de la matière organique produite (Boyle, 1988). La mesure du $\delta^{13}\text{C}$ dans les carbonates de calcium des tests de foraminifères planctoniques ou benthiques permet de reconstituer la composition isotopique passée du carbone inorganique dissous dans l'océan, reflétant ainsi indirectement, entre autres, l'intensité de l'activité photosynthétique et la productivité en surface (Marchitto et al, 2000). De plus, dans les profondeurs océaniques, les sédiments s'enrichissent en ^{12}C résultant de la reminéralisation de la matière organique, ce qui diminue la valeur de $\delta^{13}\text{C}$ des organismes benthiques. La notation "delta", tout comme pour la signature $\delta^{18}\text{O}$, exprime le rapport de quantité de l'isotope lourd sur l'isotope léger, par rapport à un étalon standard PDB ("Pee Dee Belemnite") (Urey, 1947) :

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\left(\frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right) \text{échantillon}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right) \text{standard PDB}} \right) - 1 \right] \times 1000$$

1.5. La palynologie :

La palynologie est une discipline qui se concentre sur l'étude des grains de pollen ainsi que sur tous les microrestes organiques préservés dans les dépôts sédimentaires ou tourbeux. Ces éléments sont identifiés sur des lames après avoir subi des traitements palynologiques. En raison des techniques d'extraction palynologiques des sédiments qui utilisent de l'acide fluorhydrique (HF) et chlorhydrique (HCl), les lames palynologiques sont dépourvues de fossiles siliceux et/ou calcaires (Havinga, 1964 ; Lebreton, 2010).

1.2.1. Le pollen :

Les grains de pollen, également appelés gamétophytes mâles, sont produits par les étamines, qui sont les organes mâles des plantes à graines nues (Gymnospermes) ou à graines couvertes (Angiospermes), dans le cadre de leur processus de reproduction sexuée. Les grains de pollen ont pour fonction de protéger les gamètes mâles. Après leur formation, ils sont disséminés selon différents mécanismes : par le vent, dans le cas des plantes anémophiles (qui dépendent du vent pour la pollinisation), par l'eau, dans le cas des plantes hydrophiles (qui dépendent de l'eau pour la pollinisation), ou par les insectes, dans le cas des plantes entomophiles (qui dépendent des insectes pour la pollinisation) (Reille et al, 1990).

La structure du grain de pollen comprend une série de parois organiques appelée sporoderme, constituée principalement de sporopollénine. La sporopollénine est une substance chimique composée de longues chaînes hydrocarbonées qui confèrent au pollen sa résistance à l'oxydation et à diverses altérations qui peuvent survenir lors de l'enfouissement sédimentaire. Le sporoderme est composé de plusieurs couches, allant de l'intine (vers l'intérieur) à l'exine (vers l'extérieur) (Reille et al, 1990 ; Marouf, 2000).

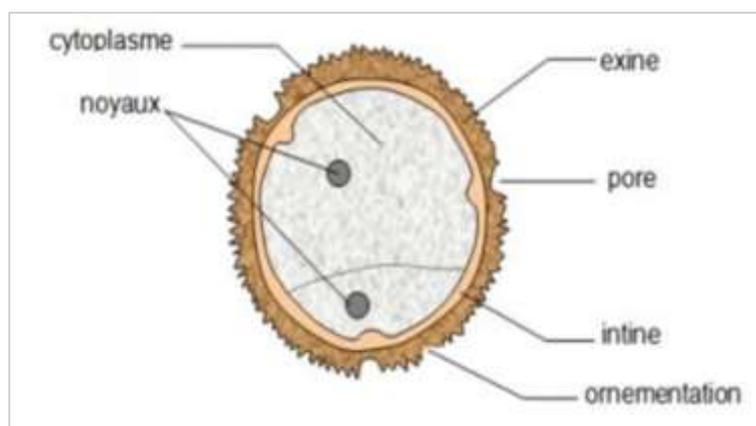


Figure 14 : Schéma de la structure d'un grain de pollen (accés.ens-lyon.fr).

Les grains de pollen constituent l'un des outils les plus couramment utilisés, et parmi les plus anciens, dans le cadre des études paléo-environnementales et paléoclimatiques. L'analyse du contenu pollinique des sédiments offre en effet une image, plus ou moins fidèle, de la végétation environnante ayant émis les grains de pollen retrouvés sur le lieu de prélèvement (Defer et al, 2003).

L'analyse pollinique repose sur plusieurs hypothèses de travail, notamment que le dépôt des grains de pollen dans les sédiments est représentatif de la pluie pollinique régionale, que l'extraction palynologique en laboratoire et le comptage au microscope n'altèrent pas les données de végétation enregistrées dans les sédiments analysés (Reille et Pons, 1990). De plus, la conservation des grains de pollen dépend du milieu de dépôt, avec une conservation optimale dans les sédiments fins (argiles, silts) des sites caractérisés par de forts taux de sédimentation, et une conservation médiocre dans les sédiments grossiers (sables) qui sont souvent stériles en grains de pollen. Il existe également des différences de résistance à l'oxydation en fonction des taxons polliniques (Lebreton, 2010).

1.5.2. Les spores :

Les spores sont émises par les Bryophytes, les Ptéridophytes ou les champignons. On distingue les macrospores (spores femelles) et les microspores (spores mâles), beaucoup plus facilement transportables et donc plus fréquentes dans les sédiments anciens (Head, 1996). La membrane des spores (sporoderme) est de même nature chimique que celle des grains de pollen (sporopollénine) et leur confère une bonne résistance post-dépôt face aux agents chimiques et biogéochimiques (processus taphonomiques). Elle est constituée de deux couches distinctes : l'exospore (parfois ornementée) qui permet l'identification taxonomique, et l'endospore (Taylor, 1987). Le sporoderme est souvent incisé par une ouverture de différentes formes, permettant la germination. En raison du faible nombre de caractères discriminants, l'identification des spores dans les sédiments fossiles reste souvent partielle et succincte (Anderson, 1980).

1.6. Les dinokystes

Les dinoflagellés sont des algues unicellulaires eucaryotes vivant dans la partie supérieure de la colonne d'eau, dans la zone photique. Ils représentent une composante importante du phytoplancton marin et jouent, à ce titre, un rôle primordial dans le réseau trophique. La moitié d'entre eux sont autotrophes et jouent un rôle important dans la productivité primaire océanique (Dale, 1996). L'autre moitié est hétérotrophe et se nourrit d'autres dinoflagellés,

d'autres algues, de diatomées et de multiples débris organiques présents dans la colonne d'eau (Evitt, 1985).

Les dinoflagellés ont une très vaste répartition géographique et sont présents dans tous les milieux océaniques et sous toutes les latitudes, leur permettant de tracer précisément les paramètres physico-chimiques des eaux de surface. Leurs plus fortes concentrations sont observées dans les zones néritiques et côtières en raison de l'abondance des nutriments dans les zones de décharges fluviales ou de remontées d'eaux profondes riches en sels nutritifs (cellules d'upwelling) (Dandonneau, 1973 ; Taylor, 1987). Dans les zones particulièrement impactées par les changements environnementaux liés aux activités humaines et à l'eutrophisation croissante, les dinoflagellés peuvent être responsables d'efflorescences algales de grande ampleur. Depuis la fin du XXe siècle, la multiplication de marées rouges ou vertes est à relier avec l'augmentation saisonnière croissante des efflorescences de certains dinoflagellés (Gentien, 1998). Les blooms de dinoflagellés toxiques sont ainsi responsables d'interdictions de consommation des mollusques filtreurs, avec des conséquences sociétales et économiques importantes pour le secteur de la conchyliculture.

Différents facteurs contrôlent la prolifération des espèces de dinoflagellés, tels que la salinité des eaux de surface, la température, la pénétration de la lumière et la concentration en nutriments. De manière générale, la concentration en nutriments inorganiques (nitrates et phosphates) est un facteur limitant et dépend principalement des apports fluviaux continentaux (Taylor, 1987).

Les micro-paléontologues se sont attachés à décrire précisément les affinités écologiques spécifiques des kystes et leur distribution actuelle à partir des sédiments de surface. Les premières études de thanatocénoses actuelles (Turon, 1984) ont mis en lien la distribution des dinokystes dans l'Atlantique Nord avec les paramètres hydrologiques de surface. De nombreuses études compilées dans des atlas ont ensuite mis en lumière des schémas spécifiques de distribution spatiale le long de gradients de température, de salinité et de couverture de glace (Zonneveld et al., 2013). Ces études, en enrichissant les bases de données modernes, constituent la première étape indispensable pour les approches quantitatives de reconstructions des paramètres hydrologiques de surface (Guiot et al., 2007).

La mise au point d'autres paléothermomètres, indépendants, a donc été l'enjeu de nombreux travaux de recherche, et au cours des dernières années, un autre proxy, le rapport entre la concentration en magnésium et en calcium (Mg/Ca) mesuré dans les tests de foraminifères, a émergé comme traceur potentiel. Ainsi, l'analyse de la composition en éléments traces peut apporter autant de renseignements en partie grâce à l'essor de nouvelles technologies d'analyse par spectrométrie et aux développements de protocoles analytiques liés à la géochimie des éléments majeurs et mineurs et des éléments traces.

Nous reviendrons en détail sur ces dernières deux méthodes qui sont au cœur de cette thèse.

Axe 4 : Matériels et méthodes adoptés dans cette thèse

I. Matériels et méthodes adoptés pour l'étude du climat récent (variabilité climatique) :

Ils sont présentée par l'analyse des données pluviométriques, thermométriques, pour déterminer les tendances climatiques récentes, d'extraire les variabilités, d'identifier les extrêmes pluviométriques et thermométriques, c'est-à-dire pour comprendre les conditions actuelles de la zone d'étude (Tensift et Souss-Massa). Les données climatiques s'opèrent à l'aide d'outils informatiques (logiciels de traitement de données). Le traitement statistique des données de températures et de précipitations, sera effectué sur Excel.

1. Les données climatiques :

Les données pluviométriques et de températures collectées proviennent essentiellement de l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) et de Souss-Massa (ABHSM). Ces données climatiques de la zone que nous allons exploiter s'étalent sur une période dépassant les 40 ans. Elles couvrent les trois parties du bassin, à savoir l'amont, la médiane et l'aval.

1.1. Les stations pluviométriques :

Un total de 6 stations pluviométriques a été sélectionné, fournissant des séries de données recueillies sur une période de plus de 40 ans et assurant une couverture adéquate de la zone étudiée (Tableau 3).

L'ensemble des données pluviométriques de base nous est mis à disposition par l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) et de Souss-Massa (ABHSM). Les fichiers de données contiennent les valeurs mesurées des précipitations mensuelles moyennes provenant des différentes stations pluviométriques de la région d'étude sur de longues périodes d'enregistrement. Ces données sont disponibles pour 3 stations pluviométriques dans le bassin versant de Tensift et 3 dans le bassin versant de Souss-Massa, soit un total de 6 stations pluviométriques.

Tableau 3 : Identification de stations pluviométriques.

Bassins	Stations	Coordonnées			Chroniques	Localisation
		Longitude Deg. Déc.	Latitude Deg. Déc.	Altitude (m)		
Tensift	Aghbalou	-7,75	31,32	1070	1970 à 2015	Amont du BV
	Chichaoua	-8,78	31,59	340	1972 à 2015	Centre du BV
	Adamna	-9,68	31,46	70	1978 à 2015	Aval du BV
Souss-Massa	Aoulouz	-8,15	30,70	680	1969 à 2015	Amont du BV
	Taroudant	-8,90	30,50	209	1969 à 2015	Centre du BV
	Agadir	-9,57	30,38	23	1914 à 2015	Aval du BV

1.2. Les stations thermométriques :

Les données de températures collectées proviennent de l'Agence du Bassin Hydraulique Tensift et Souss-Massa. Le tableau ci-dessous présente les coordonnées des stations sélectionnées.

Tableau 4 : Identification de stations thermométriques.

Bassins	Stations	Coordonnées			Chronique
		Longitude Deg. Déc.	Latitude Deg. Déc.	Altitude (m)	
Tensift	Oukaimdan	-7,9	31,2	3200	1990-2009
	Marrakech	-8,03	31,62	460	1961-2010
	Takerkoust	-8,13	31,36	630	1983-2010
Souss-Massa	Aoulouz	-8,15	30,70	680	1981-2018
	Taroudant	-8,90	30,50	209	1981-2018
	Agadir	-9,57	30,38	23	1981-2018

2. Les tests statistiques

Les tests statistiques de Pettitt (1979), de Lee Heghinian (1977) et U de Buishand (1984), ainsi que la procédure de segmentation de Hubert, permettent de détecter d'éventuels changements dans le régime pluviométrique et d'analyser les discontinuités dans l'ensemble des données étudiées. Toutes ces méthodes (test de Buishand, test de Pettitt, méthode bayésienne de Lee et Heghinian) sont regroupées dans le logiciel Khronostat, développé par l'Institut de Recherche pour le Développement (Boyer, 1998). Nous présenterons brièvement les méthodes utilisées.

2.1. Test statistique U de Buishand (1984) :

Le test de Buishand (Buishand, 1984) est dérivé d'une formulation originale donnée par Gardner (1969) pour établir un test bilatéral de rupture en moyenne à un moment inconnu. Le test de Buishand est paramétrique, supposant la normalité de la série, l'absence d'autocorrélation et la constance de la variance de part et d'autre du point de rupture éventuel. Ce test est performant pour détecter une rupture en milieu de série, mais il ne fournit pas d'estimation du moment de la rupture.

2.2. Test de Pettitt (1979) :

Le test de Pettitt (Pettitt, 1979) examine l'existence d'une rupture à un moment inconnu de la série, en utilisant une formulation dérivée de celle du test de Mann-Whitney (Dagnélie, 1970). Ce test est particulièrement sensible à un changement de moyenne et, en cas de rejet de l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série, il fournit une estimation de la date de la rupture.

2.3. Méthode Bayésienne de Lee et Heghinian (1977) :

La méthode bayésienne de Lee et Heghinian (1977) est une approche paramétrique qui suppose une distribution normale des variables étudiées. Elle postule l'existence d'une rupture en moyenne à un moment inconnu. La distribution a priori de l'instant de la rupture est uniforme, et en tenant compte de cette information ainsi que des données, la méthode génère la distribution de probabilité a posteriori de l'instant de la rupture.

2.4. Procédure de segmentation d'Hubert (1989) :

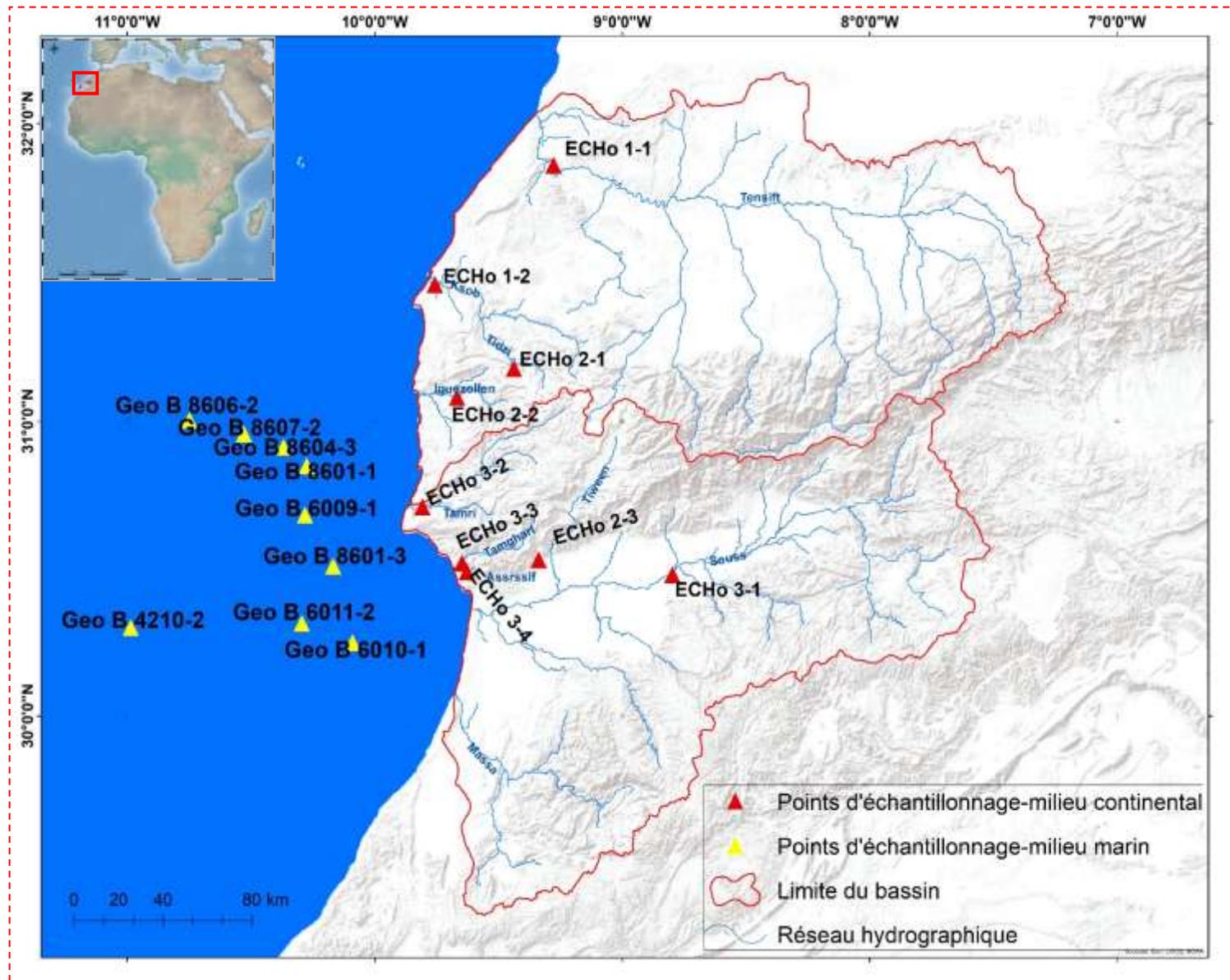
La procédure de segmentation repose sur le principe de découper une série en 'm' segments de telle manière que la moyenne calculée sur chaque segment soit nettement différente de la moyenne du ou des segments voisins.

II. Matériels et méthodes adoptés pour l'étude paléoclimatique :

Notre étude repose sur une approche multidisciplinaire et a été menée en utilisant deux techniques d'investigation distinctes permettant l'analyse des archives sédimentaires marines et continentales dans le Sud-Ouest du Maroc. Dans cette section, nous présenterons successivement les techniques que nous avons employées, en spécifiant les laboratoires mis à notre disposition par l'Institut MARUM-Centre for Marine Environmental Science de l'Université de Brême, ainsi que la description de chaque méthode et les procédures techniques adoptées.

L'étude s'est concentrée sur l'analyse de neuf échantillons de sédiments de surface continentaux prélevés au Sud-Ouest du Maroc, dans les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa en 2017. Nous avons également examiné des échantillons de sédiments de surface issus de sédiments continentaux. De plus, les échantillons étudiés dans cette recherche comprennent des sédiments de surface marins provenant de divers sites. Les neuf échantillons de sédiments de surface marins ont été prélevés à partir des trois premiers centimètres de plusieurs multicœurs collectés lors de plusieurs croisières METEOR : M37/1, M45/5 et M58/2 (Bleil et al., 2004). Une carotte GeoB 8601-3 (30°50.90'N, 10°16.1'O, 797 cm de long, profondeur d'eau 921 m) a été récupérée lors de la croisière M58/2 METEOR (Bleil et al., 2004).

Nous avons réalisé des analyses multi-proxy (indicateurs climatiques) pour caractériser la variabilité paléoclimatique et paléocéanographique au Sud-Ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années.



Carte 18 : Localisation des sites d'échantillonnages mentionnés dans cette étude.

Les analyses réalisées dans les laboratoires de l'Institut MARUM-Centre for Marine Environmental Sciences de l'Université de Brême en Allemagne (2017) comprennent :

- a) L'analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) : Cette technique permet de caractériser la nature et les concentrations des éléments chimiques majeurs et traces.
- b) Les analyses chimiques par la technique ICP (Inductively Coupled Plasma) : Ces analyses ont été effectuées sur l'espèce marine, en se concentrant sur le type *Globigerina Bulloides*.

1. Présentation du matériel d'étude :

1.1. L'échantillonnage continental :

L'échantillonnage continental a été réalisé lors de la campagne d'échantillonnage « ECHo » en mai 2017, dans le cadre du Programme Maroc-Allemand pour la Recherche Scientifique « PMARS III ». Les échantillons ont été prélevés à partir de dix sites différents, situés dans les différents tributaires et cours d'eau du bassin de Souss-Massa et de Tensift. La position géographique des points d'échantillonnage a été déterminée à l'aide d'un GPS (Tableau 5).

Tableau 5 : Informations détails concernant les prélèvements continentaux étudiés.

Station	Oued	Bassin versant	Type de prélèvement	long. (W)	lat. (N)	Altitude (m)	Date
ECHo 1-1	Tensift	Tensift	Sédiment de surface	-9,27	31,86	20m	08/04/2017
ECHo 1-2	Ksob	Tensift	Sédiment de surface	-9,75	31,46	1m	08/04/2017
ECHo 2-1	Tidzi	Tensift	Sédiment de surface	-9,43	31,177	110m	09/04/2017
ECHo 2-2	Igouzoulen	Tensift	Sédiment de surface	-9,66	31,08	160m	09/04/2017
ECHo 2-3	Tiween	Souss-Massa	Sédiment de surface	-9,33	30,53	420m	09/04/2017
ECHo 2-4	Tamri	Souss-Massa	Sédiment de surface	-9,80	30,71	31m	09/04/2017
ECHo 3-1	Souss	Souss-Massa	Sédiment de surface	-8,79	30,48	222m	10/04/2017
ECHo 3-3	Tamraght	Souss-Massa	Sédiment de surface	-9,64	30,52	4m	10/04/2017
ECHo 3-4	Assrssif	Souss - Massa	Sédiment de surface	-9,62	30,49	97m	10/04/2017

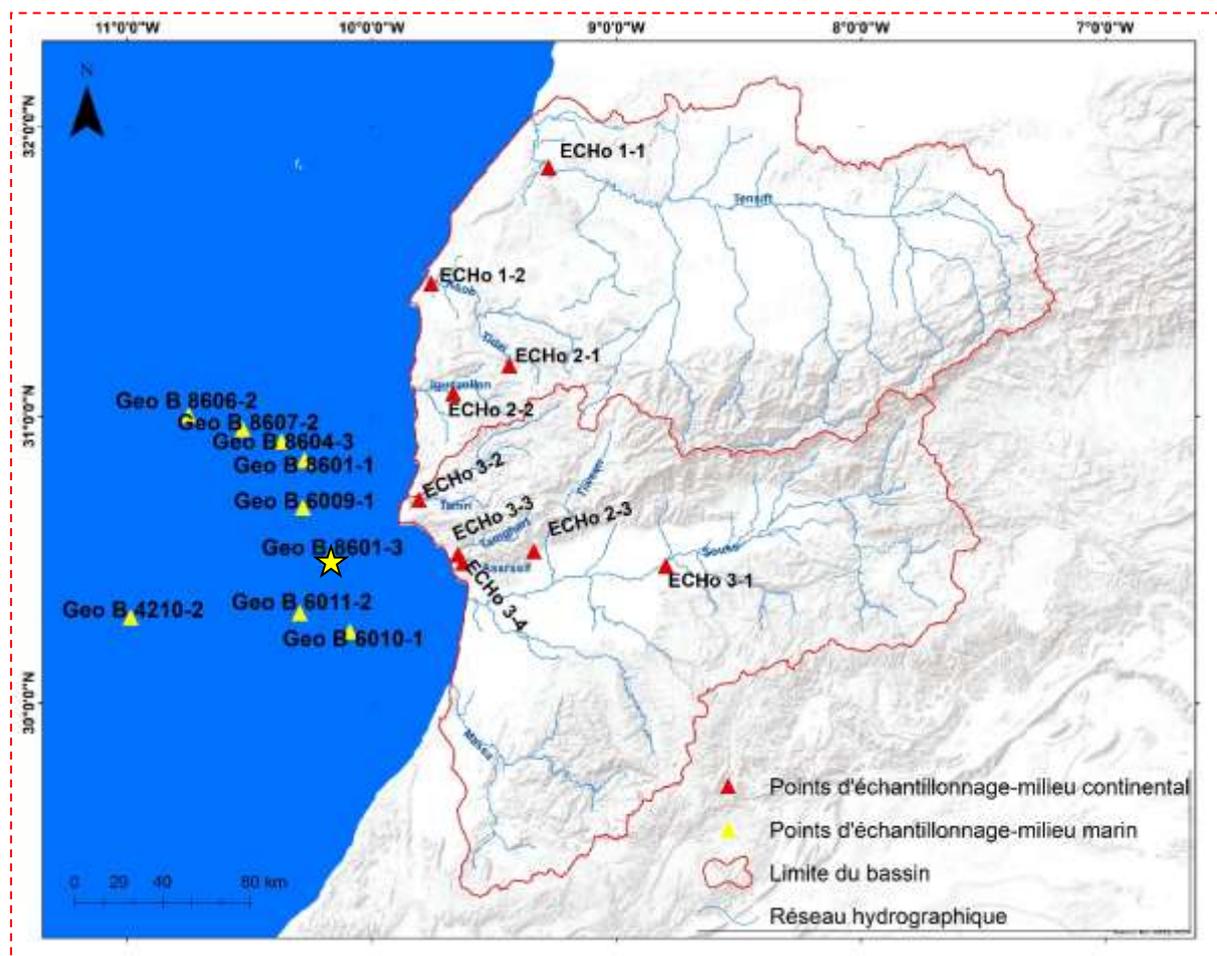
1.2. L'échantillonnage marin :

Les sédiments marins sont composés de trois phases : minérale, organique et liquide. Dans le domaine de la géologie, les sédiments sont définis comme un ensemble formé par l'agrégation de particules de taille variable, ou de matières précipitées qui ont, individuellement, subi un certain transport. Ces particules proviennent de l'érosion des roches et des sols, de l'activité organique (accumulation de coquilles, etc.), ainsi que des rejets locaux résultant de l'activité humaine. Les sédiments peuvent être des particules fines telles que les argiles et les limons, ou des particules grossières comme le sable. Ils sont déplacés et

transportés grâce, en particulier, aux forces climatiques (vent, marées, etc.) ainsi qu'à l'intervention de l'activité humaine (Foucault et al., 1980).

1.2.1. Sites de prélèvement des sédiments :

L'échantillonnage marin a été réalisé lors de la campagne océanographique « METEOR » lors des croisières M45/5, M37/1 et M58/2. Les sites marins étudiés au cours de cette thèse sont situés sur la façade atlantique du Sud-Ouest du Maroc (voir carte 19). Neuf enregistrements sédimentaires marins ont été collectés, dont deux ont été retenus pour discuter l'évolution paléo-environnementale de l'Holocène et permettre une analyse des 2000 dernières années dans le Sud du Maroc.



Carte 19 : Situation géographique de la carotte 8601-3 (L'étoile jaune).

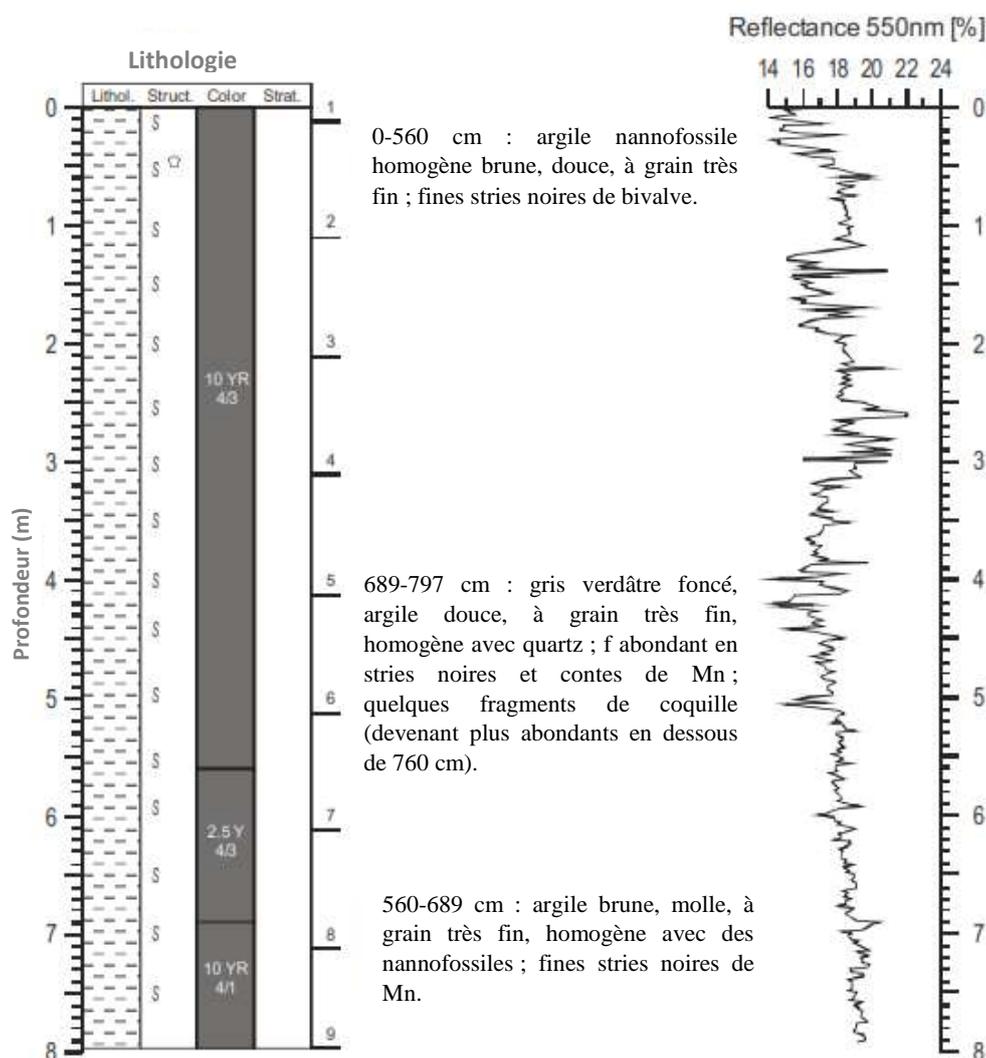
1.2.2. Caractérisation du prélèvement marin :

Pour remonter dans le temps, nous nous sommes concentrés sur l'analyse de la carotte GeoB8601-3 ($30^{\circ}50.9'N$, $10^{\circ}16.1'O$), récupérée au Sud-Ouest du cap Ghir, au large du Sud du Maroc lors de la croisière « METEOR » M 58/2 (Bleil et al., 2004). Cette carotte a été prélevée sur le versant continental supérieur Nord-Ouest de l'Afrique, au Sud du Maroc, dans le but de récupérer des séquences de sédiments à haute résolution couvrant les 2000 dernières années. Le site a été choisi en bordure du canyon d'Agadir et d'un deuxième canyon à l'ouest du Cap Ghir.

Tableau 6 : Informations détails concernant les prélèvements marins étudiés.

Sites	Nom carotte	Lat. (N)	Long. (W)	Profondeur (m)	Type
M58/2	8606-2	31,003	-10,742	1227	MUC
M58/2	8604-3	30,95	-10,522	885	MUC
M58/2	8607-2	30,91	-10,362	1068	MUC
M58/2	8601-1	30,84	-10,268	921	SL15
M45/5	6009-1	30,68	-10,275	579	MUC
M58/2	8601-3	30,50	-10,161	921	SL15
M45/5	6011-2	30,31	-10,288	993	MUC
M45/5	6010-1	30,25	-10,083	406	MUC
M37/1	4210-2	30,30	-10,98	1959	MUC

Les sédiments de la carotte « GeoB8601-3 » se composent principalement de nannofossiles, présentant une couleur brun olive à gris verdâtre foncé, avec une granulométrie fine, ainsi qu'une petite quantité de coquilles de foraminifères et de grains de quartz. La présence de fragments basaltiques de taille sableuse et de verre volcanique limoneux est attribuée à l'activité des volcans voisins des îles Canaries. De petites couches de turbidité n'ont que peu d'incidence sur les séquences presque homogènes de ces noyaux (Bleil et al., 2004) (voir figure 15).

**Figure 15** : Description de la carotte GeoB8601-3 (d'après Bleil et al, 2004).

L'ensemble des sédiments de surface continentaux et marins, ainsi que la carotte GeoB8601-3, ont été analysés à l'aide de scanners « XRF » à l'Université de Brême en Allemagne. Des analyses « multi-proxy » ont été effectuées afin de caractériser la variabilité paléo-climatique et paléo-océanographique au Sud du Maroc au cours des 2000 dernières années. Ces données fournissent des informations nouvelles et précieuses sur l'interaction entre la terre et l'océan au Sud du Maroc pendant la période étudiée.

2. Techniques et méthodes d'analyses utilisées (méthode XRF et Mg/Ca) :

2.1. Technique et méthode d'analyse par Fluorescence aux Rayons X (XRF) :

À partir des années 1930, l'utilisation de faisceaux de neutrons a donné naissance aux techniques nucléaires d'analyse multi-élémentaire, avec la première publication annonçant l'analyse par activation neutronique (NAA). Cette technique d'analyse repose sur la mesure des raies provenant des radio-isotopes formés par bombardement neutronique de la cible (Röhl et al., 2000).

Le phénomène de la production de rayons X sous l'impact d'un faisceau de particules a été observé dès 1912. Cependant, il a fallu attendre les années 60 pour l'employer à des fins analytiques (Hutton et al., 1980). Depuis, la spectrométrie par fluorescence X a connu un essor important, grâce à l'introduction de goniomètres, au développement de détecteurs de rayons X à semi-conducteurs, à la disponibilité de petits accélérateurs et à l'avènement des ordinateurs (Mohtadi et al., 2010). L'amélioration constante des spectromètres, ainsi que le développement de la théorie de l'émission par fluorescence X, ont permis à cette technique de s'imposer dans le domaine de l'analyse industrielle. En 1970, Johansson a développé une technique appelée PIXE (Particle Induced X-ray Émission) : Émission de Rayons X Induite par des Particules chargées. Le principe de base de cette technique consiste à capter les rayons X caractéristiques émis par un objet lorsqu'il est exposé au faisceau d'un accélérateur de particules (Brouwer, 2003).

La spectrométrie par fluorescence X se divise en deux techniques principales :

- ✓ Fluorescence X à dispersion de longueur d'onde WD-XRF (Wave-length Dispersive X-Ray Fluorescence) ;
- ✓ Fluorescence X à dispersion d'énergie ED-XRF (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence).

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF). La fluorescence des rayons X (XRF) est une technique non destructive permettant de quantifier la composition élémentaire des échantillons solides et liquides. Les rayons X sont utilisés pour exciter les atomes présents dans l'échantillon, les amenant à émettre des rayons X d'énergie caractéristique de chaque élément. L'intensité et l'énergie de ces rayons X sont ensuite mesurées (Jansen et al., 1998). L'analyse par fluorescence X à dispersion d'énergie (XRF) consiste à exciter un échantillon à l'aide d'un faisceau de photons et à analyser le spectre d'énergie des raies X caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon. Le traitement de ce spectre permet à la fois une analyse qualitative (identification des éléments) et des mesures quantitatives (Richter et al., 2006).

2.2. Aspect instrumental de la technique XRF :

L'analyse par ED-XRF se déroule en trois phases : la préparation de l'échantillon, son excitation, et la détection des rayons X caractéristiques de ses éléments (Jansen et al., 1998).

Dans une installation de spectrométrie de rayons X à dispersion d'énergie, on distingue généralement les éléments suivants :

- ❖ Un système de production du rayonnement primaire.
- ❖ Un système de détection.
- ❖ Un système de comptage associé à un ordinateur.

La spectroscopie X est étroitement liée à l'étude de la production de rayons X, qui peut être réalisée de plusieurs manières, les plus courantes étant les suivantes :

- ✍ Par un flux d'électrons : les électrons accélérés par une haute tension provoquent une émission primaire de l'échantillon.
- ✍ Par une source radioactive : les rayonnements de la source provoquent l'émission du rayonnement secondaire, appelé fluorescence X.
- ✍ Par un tube à rayons X : deux formes d'excitations sont possibles :
 - Excitation par les raies caractéristiques de l'élément de l'anticathode.
 - Excitation par le fond continu dû au rayonnement de freinage des électrons dans la cible.



Figure 16 : Spectromètre de fluorescence X dispersif X de compteur Panalytical Epsilon 3 (l'Université de Brême, 2017).

2.3. Protocole d'analyse par la spectrométrie de fluorescence X :

La spectrométrie de fluorescence X peut être appliquée à l'analyse de tout matériau, qu'il soit conducteur ou non. Cependant, ces matériaux nécessitent une préparation préalable avant d'être analysés. La préparation des échantillons revêt une importance cruciale lors de l'analyse par fluorescence X. Dans le cas des échantillons utilisés dans cette étude, un traitement impliquant des opérations de broyage est nécessaire pour garantir l'homogénéité et la planéité, des critères essentiels lors de l'analyse quantitative (Brouwer, 2003).

La préparation des échantillons se déroule en plusieurs étapes, comme décrit ci-dessous :

- ✍ Avant de commencer le travail en laboratoire, il est impératif de sécher les échantillons par lyophilisation ou cryodessiccation. Cette méthode de dessiccation

sous vide à basse température est utilisée pour éliminer progressivement l'eau des produits liquides préalablement congelés sans passer par la phase liquide.

- ✍ Les échantillons sont ensuite broyés manuellement à l'aide d'un mortier en agate et d'un pilon jusqu'à l'obtention d'une poudre très fine, avec une taille de grain d'environ une dizaine de micromètres.
- ✍ Une quantité d'environ 4 g est prélevée de chaque échantillon et placée dans un flacon spécifique pour l'analyse par XRF. Cette quantité est ensuite compactée de manière reproductible dans le godet d'échantillon sous une pression de 5 kg/cm² (25 kg sur un piston de 5 cm²).
- ✍ Enfin, les échantillons sont mesurés par spectroscopie de fluorescence X à dispersion d'énergie (ED-XRF) à l'aide d'un spectromètre ED-XRF de paillasse Panalytical Epsilon 3-XL au groupe de géochimie des sédiments du « MARUM ». Ce spectromètre permet de déterminer la concentration d'éléments allant du sodium à l'américium dans une large gamme d'échantillons. Il est utilisé pour des analyses non destructrices avec des limites de détection de l'ordre de parties par million. Le plateau rotatif peut contenir jusqu'à 10 échantillons d'un diamètre de 25 à 52 mm.

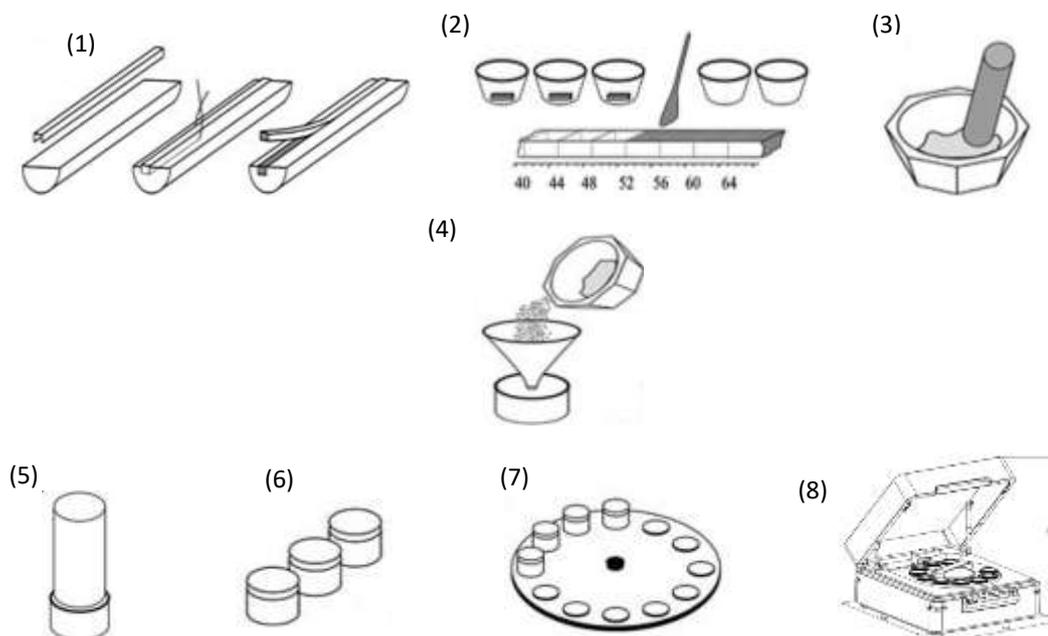


Figure 17 : Les étapes de préparation et d'analyse des échantillons par fluorescence X.

3. Contexte technique et analytique de la méthode Mg/Ca :

Cette section a impliqué, en premier lieu, la définition et la mise en œuvre du protocole de nettoyage chimique des échantillons de foraminifères avant leur mesure. Ensuite, elle retrace le travail significatif d'optimisation et de validation de la technique instrumentale qui a permis la mesure du rapport Mg/Ca de la calcite des tests de foraminifères par spectrométrie d'émission optique à torche plasma (ICP-OES).

3.1. Généralités sur le type de foraminifères utilisé dans ce travail :

Les foraminifères sont des organismes planctoniques ou benthiques, certains d'entre eux formant un test en calcite. Ils sont utilisés depuis de nombreuses années dans le cadre d'études paléocéanographiques, car leurs tests sont abondamment retrouvés dans les carottes

sédimentaires marines (Fairbanks et al., 1980). Parmi les espèces planctoniques les plus couramment utilisées figurent *Globigerinoides ruber*, pour les régions chaudes, et *Globigerina Bulloides*, pour les régions tempérées ou froides, qui vivent à la surface des océans. Il existe également une catégorie de foraminifères planctoniques dits profonds. Plusieurs études antérieures ont montré que les foraminifères planctoniques profonds peuvent enregistrer les conditions au niveau de la thermocline. Les profondeurs de croissance des foraminifères planctoniques profonds déduites de ces différentes études semblaient présenter des contradictions les unes par rapport aux autres (Ganssen et al., 2000).

Dans le cadre de notre thèse, nous nous sommes intéressés aux espèces de foraminifères benthiques du type *Globigerina Bulloides* (voir figure 18).

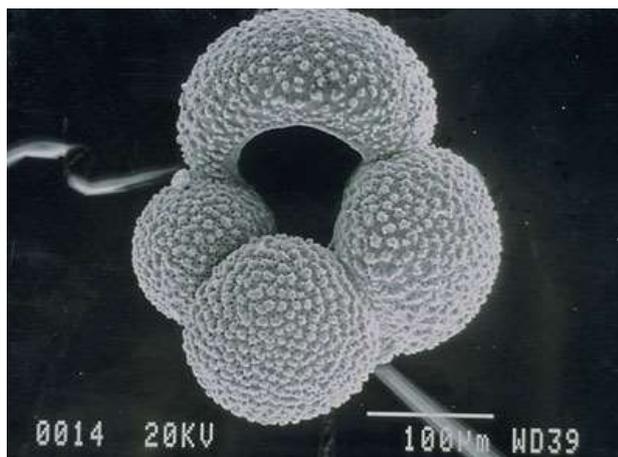


Figure 18 : Tests de foraminifères de type *Globigerina Bulloides* 100µm (<http://www.foraminifera.eu>).

4. La détermination de paléotempératures de l'eau de mer :

4.1. La méthode Mg/Ca :

La mise au point d'outils permettant de déterminer la température passée des eaux océaniques, tant en surface qu'en profondeur, constitue l'une des principales priorités de la paléocéanographie dans le cadre de la compréhension des changements climatiques. Ces dernières années, un outil particulièrement prometteur s'est développé, reposant sur l'analyse du rapport Mg/Ca dans les tests des foraminifères.

4.2. Le paléo-thermomètre Mg/Ca :

Lors de la calcification du test des foraminifères, certains éléments chimiques de l'eau de mer, ayant un rayon ionique proche de celui du calcium, tels que le magnésium, peuvent se substituer au calcium dans la structure cristalline du test. Les tests de foraminifères contiennent divers éléments traces, dont le magnésium, qui peut remplacer l'ion calcium prédominant en s'intégrant dans la structure cristalline. Cette réaction est endothermique, ce qui signifie qu'elle dépend de la température. L'augmentation de la concentration en magnésium (et donc du rapport Mg/Ca) avec la température a été démontrée dans de nombreuses études réalisées sur des cultures de foraminifères, des spécimens collectés lors de pêches au filet ou dans des pièges à particules, ainsi que des échantillons extraits des sommets de carottes sédimentaires (Nürnberg et al., 1996 ; Lea et al., 1999 ; Elderfield et al., 2000 ; Deckens et al., 2002 ; Anand et al., 2003).

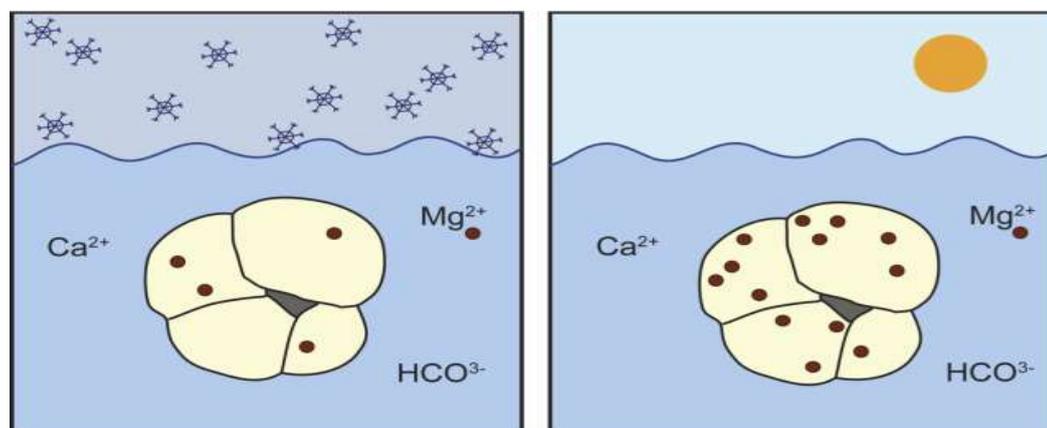


Figure 19 : Certains foraminifères planctoniques incorporent plus de Mg dans leurs tests, lorsqu'ils poussent dans des eaux plus chaudes (<https://foramsetal.wordpress.com/research/mgca-paleothermometry>).

La mesure du rapport Mg/Ca des tests de foraminifères enfouis dans le sédiment permet d'estimer les paléotempératures en utilisant l'équation : $Mg/Ca \text{ (mmol/mol)} = B * \exp(A * T)$, où A et B sont des constantes exponentielles et pré-exponentielles, et T représente la température en °C. Cependant, ce proxy est sujet à l'influence de la dissolution partielle des tests de foraminifères à de grandes profondeurs (Lohmann, 1995 ; Rosenthal, 2000), ce qui peut entraîner une sous-estimation significative du Mg/Ca dans les reconstructions des paléotempératures. De plus, Mathien-Bard et Bassinot (2009) ont démontré que la salinité avait également un impact sur ce proxy, avec une variation de 1 % de la salinité entraînant une variation d'environ 1,6 °C dans la température reconstruite. Ces facteurs complexifient donc les reconstructions paléoclimatiques des températures, mais il est essentiel de les prendre en compte.

4.3. Les limites de la méthode Mg/Ca :

L'utilisation du rapport Mg/Ca en tant que thermomètre est relativement récente par rapport aux outils isotopiques. L'incorporation du Mg/Ca dans les tests de foraminifères comporte de nombreux biais, dont les principaux ne sont pas encore bien compris. Les principaux biais comprennent :

4.3.1. L'effet de taille :

Comme c'est le cas pour la composition isotopique de l'oxygène, le rapport Mg/Ca dépend également de la taille du test des foraminifères (Elderfield et Ganssen, 2000). La variation du fractionnement biologique au cours du cycle de vie ou les changements dans l'environnement de calcification pourraient être à l'origine de la relation entre la taille du test et le rapport Mg/Ca. Par exemple, selon Elderfield et Ganssen (2000), les rapports Mg/Ca des foraminifères *G. bulloides* augmenteraient d'environ 0,8 et 0,3 mmol/mol respectivement entre 250 µm et 500 µm. Ainsi, lors de l'échantillonnage, il est possible de limiter l'impact de la taille du test en se limitant à une certaine plage de tailles de tests, comme la gamme couramment utilisée de 150 à 250 µm pour les études isotopiques et les analyses d'éléments traces sur les foraminifères.

4.3.2. La calcite gamétogénique :

Lors de leur développement, les foraminifères créent une couche de calcite sur l'ensemble de leur test tous les quelques jours, en l'espace de quelques heures. À chaque étape, on

discerne deux types de calcite : la calcite primaire, qui délimite le contour de la coquille et devient la lamelle intérieure de la nouvelle loge, et la calcite secondaire, qui recouvre cette membrane ainsi que l'ensemble de la coquille préexistante (Bentov et al, 2006).

De nombreuses espèces, en particulier les foraminifères planctoniques profonds, déposent une dernière croûte additionnelle de calcite sur leur test avant de se reproduire. Cette croûte de calcite est appelée calcite gamétogénique car son dépôt est associé au processus de formation des gamètes pendant la phase de reproduction. Des expériences montrent que la calcite gamétogénique est appauvrie en Mg/Ca, ce qui contribue à abaisser le rapport Mg/Ca moyen du test. Deux hypothèses peuvent expliquer cette différence de composition Mg/Ca entre les fractions du test : soit des changements de la profondeur d'habitat (et donc de la température de calcification) au cours du cycle de vie, soit des mécanismes de calcification différents (Erez, 2003). Pour éliminer cette couche de calcite lors de la phase de nettoyage de l'échantillon, une légère attaque chimique des tests à l'acide faible sera employée. Le plus souvent, cette étape sera suffisante pour dissoudre cette couche de surface.

4.3.3. Les ions carbonatés :

Le rapport Mg/Ca des foraminifères benthiques peut également être significativement influencé par des variables autres que la température. Plusieurs études récentes ont montré qu'il peut exister une corrélation entre la teneur en ions carbonate (CO_3^{2-}) de l'eau du milieu de vie du foraminifère et la composition en éléments traces du test calcaire des foraminifères (Bijma et al, 1999 ; Elderfield et al, 2006). Ces études concluent que le rapport Mg/Ca est réduit lorsque le taux de saturation en ions carbonates est faible. L'influence de la concentration en $[\text{CO}_3^{2-}]$ a été mesurée expérimentalement en laboratoire sur les foraminifères. Cependant, ce phénomène serait limité aux eaux sous-saturées dont le degré de saturation en ions carbonates, défini par $[\text{CO}_3^{2-}] = [\text{CO}_3^{2-}] - [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{sat}}$, est négatif.

4.3.4. La dissolution :

La calcite, une fois déposée dans le sédiment, peut se dissoudre en raison de l'agressivité de l'eau de fond et de l'eau interstitielle qui sont sous-saturées en carbonates (Brown et al., 1996 ; Rosenthal et al., 2000). Cependant, nous avons choisi des carottes sédimentaires prélevées au-dessus de la lysocline, c'est-à-dire la profondeur dans l'océan à partir de laquelle la solubilité de la calcite augmente fortement.

La mesure du rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques est aujourd'hui couramment utilisée pour déterminer les changements de température de surface de l'océan (Lea et al., 1999 ; Elderfield et Ganssen, 2000 ; Rosenthal et al., 2000) et commence à être de plus en plus employée pour les eaux profondes. Cependant, les variations de température estimées dans l'océan profond entre la dernière période glaciaire et l'Holocène sont proches des incertitudes de mesure (2 à 3°C). De plus, le matériel benthique est souvent peu abondant dans les carottes. L'amélioration de la précision des analyses du Mg/Ca permet aujourd'hui de déterminer des concentrations d'éléments proches de quelques dizaines de « ppb », avec seulement quelques milligrammes de test carbonaté par échantillon, pour une détermination par ICP-AES (Lear et al., 2002 ; Martin et al., 2002 ; Skinner et al., 2003).

III. Procédures de préparation et nettoyage des échantillons de foraminifères :

1. Contexte analytique de la méthode Mg/Ca :

Ce paragraphe retrace la partie du développement analytique de notre travail. Dans un premier temps, il a consisté à définir et mettre en œuvre un protocole de nettoyage chimique des échantillons de foraminifères avant leurs mesures. Dans un second temps, cette partie retrace l'important travail d'optimisation et de validation de la technique instrumentale permettant la mesure du rapport Mg/Ca de la calcite des tests de foraminifères par spectrométrie d'émission optique à torche plasma (ICP-AES).

La spectrométrie d'émission optique par plasma à couplage inductif (ICP-AES) est une méthode d'analyse idéale pour la détermination du rapport Mg/Ca dans les carbonates biogéniques. Le magnésium est présent comme élément mineur dans la calcite des foraminifères, de l'ordre de 400 à 1000 fois moins abondant que le calcium. L'abondance relative de Mg par rapport au Ca donne des concentrations en solution qui se situent dans la gamme de travail de l'ICP-AES. Environ 0,1 à 0,3 mg de foraminifères (15-20 individus) produisent typiquement des concentrations en solution de l'ordre de 50 à 100 ppm de Ca et 0,05 à 0,15 ppm de Mg.

Avant l'analyse par ICP-AES, une étape importante et cruciale de nettoyage des échantillons est réalisée, dont dépendra toute la fiabilité des mesures. Cette phase de préparation est en effet capitale pour obtenir des résultats justes et de grande précision, car elle garantit l'absence de contamination des tests de foraminifères par du magnésium provenant de sources extérieures à la calcite primaire, telles que des sédiments argileux, des nodules de Fe-Mn ou encore la croûte de calcification gamétogénique.

1.1. Les techniques de nettoyage :

Les techniques de préparation d'échantillons pour la détermination des rapports Mg/Ca de la calcite de foraminifères ont évolué depuis la méthode initialement développée pour la détermination du rapport Cd/Ca par Boyle (1981), ensuite modifiée par Rosenthal et al. (1997). Actuellement, deux "écoles" de nettoyage spécifique pour l'étude du rapport Mg/Ca des foraminifères sont reconnues. La première méthode, dite "américaine" ou "nettoyage Cd" (Boyle et Keigwin, 1985), est plutôt agressive pour les carbonates car elle utilise une étape supplémentaire d'attaque à l'hydrazine. La seconde méthode, dite "européenne" ou "nettoyage Mg", est douce et progressive (Elderfield et Ganssen, 2000 ; Barker et al., 2003), et c'est celle que j'ai utilisée dans ce travail. Il a été démontré que la première méthode de nettoyage entraînait une diminution d'environ 15 % des rapports Mg/Ca des foraminifères par rapport à la seconde, en favorisant la dissolution des tests et donc la perte de Mg (Barker et al., 2003 ; Rosenthal et al., 2004).

Barker (2002) a montré que, parmi toutes les étapes du protocole, l'extraction des argiles (séries de rinçage "eau + éthanol") avait de loin l'effet le plus marqué sur la concentration finale en Mg. En effet, les argiles (particules < 2 µm), sous la forme d'illite, de kaolinite, de montmorillonite et de chlorite, contiennent de 1 à 10 % de Mg en masse et sont présentes en proportions significatives dans le sédiment marin (Deer et al., 1992). Les fortes teneurs en Mg dans les argiles en font des contaminants sérieux dans la détermination finale du rapport

Mg/Ca des foraminifères. Ainsi, un résidu après nettoyage de 1 µg d'argile contenant 1 % de Mg ajouterait 10 ng de Mg à la solution à analyser, ce qui suffirait à causer une contamination significative, en particulier pour des échantillons de petite taille ou à faibles rapports Mg/Ca. Le potentiel de contamination par des argiles résiduelles dépend également du type de morphologie du test de l'espèce de foraminifère (Deer et al., 1992).

1.2. Protocole de nettoyage utilisé :

Le protocole de nettoyage chimique utilisé pour cette étude est inspiré de celui de Barker et al. (2003), qui a été mis en place au Département des Sciences de la Terre de l'Université de Cambridge (Royaume-Uni). Des modifications et améliorations ont été apportées par Monsieur J. Groeneveld à l'Université de Brême. Les principales étapes de ce protocole sont les suivantes :

1.3. Crushing :

Cette étape vise à ouvrir les loges des foraminifères pour faciliter le nettoyage ultérieur. Voici les étapes détaillées pour réaliser cette opération :

- a) Déposer une goutte d'eau sur les foraminifères préalablement disposés sur une plaque de verre.
- b) Placer une seconde plaque de verre sur la première et exercer une légère pression pour permettre l'ouverture des loges des foraminifères.
- c) Soulever délicatement la plaque de verre supérieure tout en rassemblant tous les fragments de foraminifères sur la plaque inférieure.
- d) Utiliser un pinceau humidifié pour transférer les fragments de foraminifères dans un microtube de 0,5 mL.

Pour cette étape, Il est recommandé de traiter les échantillons un par un lors de cette étape pour optimiser l'efficacité du nettoyage. Assurez-vous également de taper doucement les microtubes sur la paillasse pour que les fragments de foraminifères descendent au fond du tube. Cette préparation minutieuse est essentielle pour garantir des résultats de mesure fiables lors de l'analyse ultérieure du rapport Mg/Ca.

1. Extraction des argiles :

- a) Introduire 250 µL d'eau ultra pure (UHQ H₂O) dans chaque microtube pour mettre en suspension la matière organique. Si des bulles d'air sont présentes au fond du tube, vous pouvez les retirer en tapotant doucement la base du tube avec un ongle.
- b) Attendre quelques secondes pour permettre aux carbonates de se déposer au fond du tube.
- c) À l'aide d'une pipette de 250 µL, aspirer l'eau située au-dessus de l'échantillon. Après cette étape, chaque tube devrait contenir environ 10 à 20 µL d'eau.
- d) Passer les échantillons aux ultrasons pendant 1 à 2 minutes. Cela permettra de séparer les argiles qui peuvent être présentes à la surface des tests de foraminifères.

Ces étapes sont destinées à éliminer les argiles en suspension et à préparer les échantillons de foraminifères pour la suite du nettoyage. Voici comment les effectuer :

- a) Utilisez une pipette de 500 μL pour ajouter de l'eau ultra pure dans chaque tube, afin d'agiter l'échantillon et de mettre en suspension les argiles qui pourraient encore être fixées.
- b) Attendez que l'échantillon se soit redéposé au fond du tube. Cette étape ne prendra que quelques secondes, le temps nécessaire aux carbonates de se redéposer au fond. Après cette étape, la partie restante de l'échantillon sera principalement contaminée par des particules silicatées.
- c) Aspirez l'eau située au-dessus de l'échantillon contenant les argiles.
- d) Répétez les étapes de (4) à (8) quatre fois. Si des argiles en suspension sont toujours visibles après le passage aux ultrasons, répétez ces étapes jusqu'à ce que les échantillons paraissent propres.

Après ces étapes de nettoyage à l'eau, on utilisera l'éthanol qui permet de mettre en suspension les argiles les plus récalcitrantes. La faible viscosité de l'éthanol permet de détacher le matériel toujours attaché aux tests de carbonates.

- a) Introduisez 250 μL de méthanol dans chaque échantillon.
- b) Passez chaque tube aux ultrasons pendant 1 à 2 minutes.
- c) Traitez chaque tube individuellement. Aspirez l'éthanol avec une pipette de 250 μL et remettez-le rapidement dans le μ tube pour mettre les argiles en suspension.
- d) Attendez quelques secondes que l'échantillon repose au fond du tube, puis retirez l'éthanol.
- e) Répétez les étapes de 9 à 12 une fois.
- f) Répétez les étapes de 5 à 7 deux fois pour éliminer l'éthanol.

Ces étapes de nettoyage à l'éthanol visent à éliminer les particules d'argile tenaces des échantillons de foraminifères.

3. Extraction de la matière organique :

- a) Ajoutez 250 μL d' H_2O_2 à 1% à chaque tube. Fermez hermétiquement les capsules des tubes et placez-les entre le rack en plexiglas et son couvercle pour éviter qu'ils ne s'ouvrent sous la pression.
- b) Placez la porte de l'échantillon dans un bain d'eau bouillante à environ 98°C pendant 10 minutes (utilisez un chronomètre). À 2,5 et 7,5 minutes, retirez la porte de l'eau bouillante et secouez-la ou tapotez-la sur la paillasse pour éliminer les bulles de condensation. À 5 minutes, passez les échantillons quelques secondes aux ultrasons, puis replacez-les dans le bain d'eau bouillante après avoir éliminé les bulles d'air formées. Retirer les bulles assure un bon contact entre le réactif et l'échantillon.
- c) À la fin des 10 minutes, centrifugez les échantillons pendant 1 minute à 5000 tr/min pour éliminer les bulles et faire déposer les foraminifères au fond du μ tube. Assurez-vous que l'échantillon s'est bien déposé au fond du tube avant de retirer l'eau oxygénée à l'aide d'une pipette.
- d) Répétez les étapes 1 à 3.
- e) Rincez les échantillons à l'eau ultra pure deux fois, en veillant à rincer également le

bouchon avec une pipette de 500 μL .

- f) Rincer les échantillons à l'eau ultra pure 2 fois en veillant à rincer le bouchon (avec une pipette de 500 μL).

4. Attaque à l'acide faible :

L'acide dilué est utilisé pour éliminer les contaminants des fragments de test. Voici comment procéder :

- Ajoutez 250 μL d' HNO_3 0,001 M à chaque échantillon.
- Passez les échantillons aux ultrasons pendant 30 secondes.
- Retirez rapidement l'acide.
- Ajoutez rapidement 500 μL d'eau UHQ à l'aide d'une pipette pour éviter une dissolution excessive des carbonates.
- Retirez l'excès d'eau.
- Répétez les étapes 4 et 5.
- À l'aide d'une pipette de 10 μL , retirez avec précaution le reste de la solution de chaque échantillon, en veillant à ne pas laisser plus de 10 μL .

À la fin de cette étape, les échantillons peuvent être stockés en attendant l'analyse. Ils seront dissous et dilués le même jour que leur analyse. Cette dernière étape garantit que les échantillons sont propres et prêts pour l'analyse sans contamination.

5. Dissolution :

Pour assurer des dilutions précises, suivez ces étapes avec précision :

- Ajoutez 250 μL de HNO_3 0,075 M (acide nitrique) de qualité ultrapure (QD).
- Passez les échantillons aux ultrasons pendant quelques instants en fonction des échantillons. Vérifiez si les échantillons sont bien dissous. Pendant cette étape, tapotez les échantillons contre la paillasse pour libérer les bulles de CO_2 et permettre une dissolution correcte.
- Dès que la production de CO_2 cesse, secouez l'échantillon pour bien mélanger.
- Centrifugez les échantillons à 5000 tours/minute pendant 10 minutes pour faire précipiter les petites particules de silice qui pourraient être présentes.
- Transférez 500 μL de la solution dans un tube propre.

Assurez-vous de pipeter avec précision pour maintenir la précision des dilutions. Ces étapes permettent de préparer les échantillons pour l'analyse ultérieure.

5.1. Dilution :

Il est important de noter que la concentration en calcium (Ca) dans les échantillons de foraminifères benthiques après nettoyage et dissolution peut varier en fonction de l'espèce de foraminifères, de la fraction d'échantillon perdue lors du nettoyage et de divers autres facteurs. Pour mesurer précisément les rapports Mg/Ca et Sr/Ca en utilisant l'ICP-AES Iris, vous devez

disposer de solutions de référence contenant une concentration connue de calcium dans la plage de 10-80 ppm. Cela permettra d'ajuster les paramètres de l'ICP-AES Iris pour obtenir les résultats les plus précis.

Lors de l'analyse ICP-AES Iris, deux runs (cycles) sont nécessaires pour chaque échantillon. Le premier run est destiné à déterminer la concentration en calcium de l'échantillon, tandis que le deuxième run est effectué à une concentration optimale en calcium pour la détermination des rapports Mg/Ca et Sr/Ca. Ces étapes sont cruciales pour garantir la précision et l'exactitude des résultats de vos analyses de rapports Mg/Ca et Sr/Ca dans les foraminifères benthiques.

- a) Préparez une série de tubes propres pour la dilution.
- b) Ajoutez 280 μL d' HNO_3 à 0,075 M à chaque tube (ou 250 μL pour une dilution de facteur 3 si vous avez ajouté 500 μL au départ).
- c) Ajoutez 70 μL d'échantillon pour obtenir une dilution de facteur 5 (ou ajoutez 125 μL d'échantillon pour une dilution de facteur 3).

Si vous effectuez une dilution par 5, il restera 230 μL d'échantillon pour le 2nd run. Si vous effectuez une dilution par 3, il restera 325 μL d'échantillon pour le 2nd run. Assurez-vous de pipeter avec précision pour garantir une estimation correcte de la concentration en Ca et des dilutions effectuées avant le 2nd run. Ces étapes sont cruciales pour obtenir des résultats précis lors de l'analyse ICP-AES Iris.



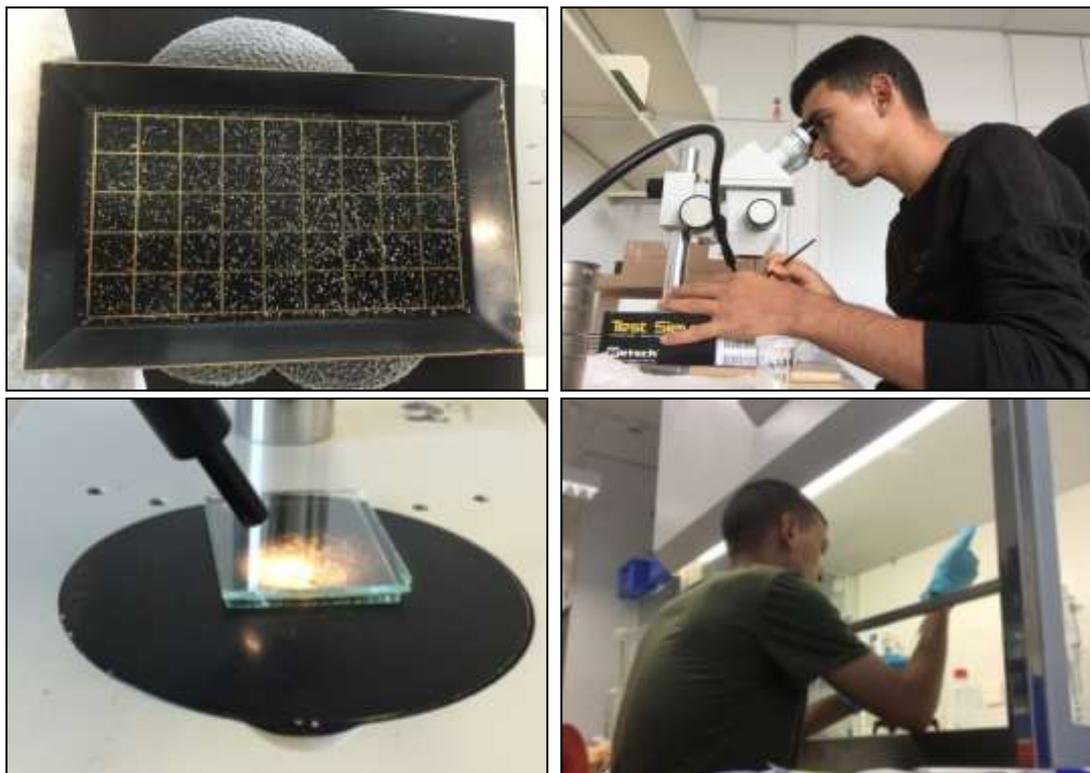


Photo 8 : Photographies prises à l'Université de Brême (2017), afin d'illustrer quelques-unes des étapes du protocole de nettoyage des foraminifères (*G. Bulloides*).

6. Détermination du Mg/Ca de la calcite des foraminifères par la technique ICP-AES :

Les méthodes couramment utilisées pour déterminer le rapport Mg/Ca dans les carbonates biogéniques comprennent la spectrométrie d'absorption atomique (AAS) (Boyle, 1981 ; Brown et Elderfield, 1996), la spectrométrie d'absorption atomique par four graphite (GF-AAS) (Brown et Elderfield, 1996), ainsi que la spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif (ICP-AES) (Lea et Martin, 1996 ; Rosenthal et al, 1999). La spectrométrie d'émission n'a été utilisée que plus récemment, à partir du début des années 2000, pour mesurer le rapport Mg/Ca.

La spectrométrie d'émission repose sur la mesure de la quantité de photons émis lors de la désexcitation d'atomes ou de molécules après vaporisation de leur solution dans un plasma. Le nombre de photons émis est proportionnel à la concentration des ions en solution. La source est constituée d'un plasma d'argon produit par couplage inductif.

L'avantage principal de l'ICP-AES par rapport aux autres techniques réside dans sa capacité à mesurer simultanément tous les éléments. Outre sa rapidité d'analyse, la détection simultanée réduit les problèmes liés au temps, en particulier ceux causés par les fluctuations dans le plasma, ce qui garantit une excellente précision à court terme pour les déterminations des rapports d'éléments (Schrag, 1999). Les ICP-AES peuvent être configurés pour visualiser le plasma radialement ou axialement. La détection axiale offre une meilleure sensibilité, tandis que la vue radiale est moins sujette aux effets de matrice à l'intérieur du plasma (Brenner et al, 2000).

Cependant, des effets de matrice et le choix de la sensibilité des raies d'émission en fonction des gammes de concentrations utilisées peuvent compliquer la mesure simultanée d'éléments.

IV. Méthode de datation : modèle d'âge de la carotte « Geo8601-3 » adopté :

La datation au carbone 14 (^{14}C) est en effet une méthode couramment utilisée pour établir les modèles d'âge des séquences sédimentaires. Elle repose sur la décroissance radioactive exponentielle du ^{14}C dans les restes organiques, tels que les coquilles de mollusques ou les tests de foraminifères, après la mort de l'organisme. Le carbone contenu dans les organismes vivants est en équilibre avec le CO_2 atmosphérique ambiant, et lorsque l'organisme meurt, il cesse d'absorber du ^{14}C , ce qui permet de dater la période à laquelle il est mort.

Dans le cas du modèle d'âge de la carotte sédimentaire "GeoB8601-3", les datations au ^{14}C ont été effectuées sur des foraminifères planctoniques prélevés à différentes profondeurs de la carotte. Ces datations ont ensuite été utilisées pour établir le modèle d'âge de la carotte en utilisant une approche de modélisation bayésienne avec le logiciel "Bacon" (Blaauw et al, 2011).

Le modèle d'âge final de la carotte "GeoB8601-3" est basé sur sept dates AMS ^{14}C et utilise une hypothèse d'accumulation linéaire entre 47 sections verticales de 5 cm. Le temps de sédimentation préalable a été fixé à 10 ans par centimètre, avec une distribution normale de forme 1.5. Les taux de sédimentation linéaires ont été calculés en utilisant les âges moyens calibrés pondérés. Ce modèle permet de reconstituer la chronologie des dépôts sédimentaires dans la carotte et d'estimer les âges des différents niveaux de la séquence (Zhao et al, 2019).

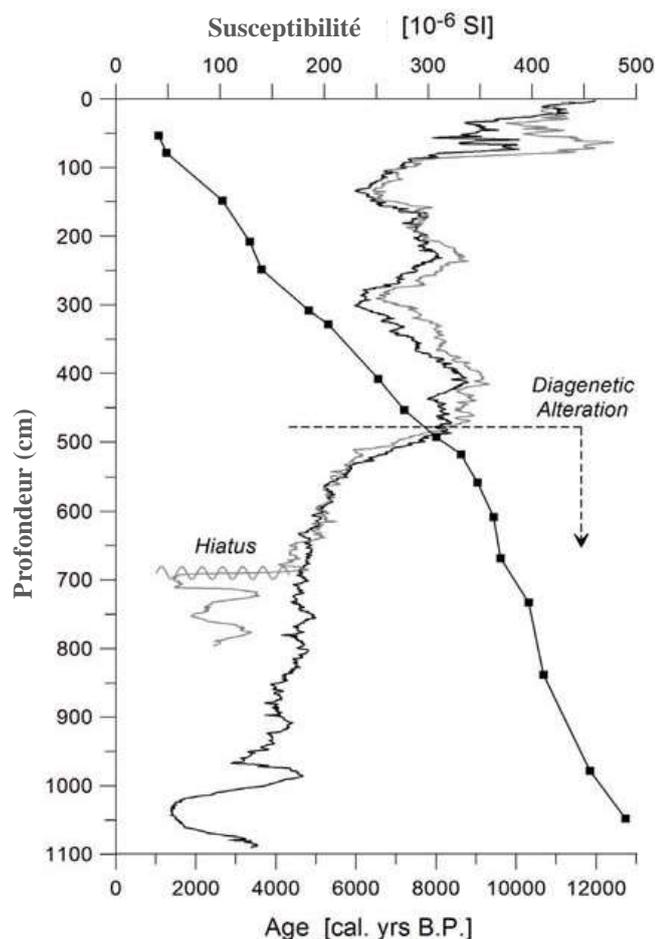


Figure 20 : Susceptibilité magnétique à haute résolution de la carotte GeoB6007 (noir) et GeoB8601 (gris), ainsi que la succession d'âge (années avant présent ; 0 se référant à AD 1950) de la carotte GeoB6007-2 (carrés pleins) basée sur des données de radiocarbone AMS (d'après Kuhlmann et al, 2004).

Le tableau ci-dessous, montre l'âge radiocarbone des foraminifères planctoniques de la carotte GeoB8601-3 utilisée dans cette étude. L'âge du radiocarbone de la carotte GeoB8601-

3 a été calibré à l'aide du logiciel OXCAL (Bronk, 2001) et du modèle d'étalonnage du radiocarbone marin 13 (Reimer et al, 2013). L'âge standard du réservoir marin sans modification locale ($\Delta R=0$) a été appliqué, en raison de la correction incertaine du réservoir au Nord-Ouest de l'Afrique (Kim et al, 2007).

Tableau 7 : Caractéristiques du modèle d'âge adopté pour la carotte GeoB8601-3.

Carotte	Prof. (m)	Profondeur de la carotte 8601-3 (cm)	Matériel et poids (ug)	Radiocarbone e Âge (yr BP)	Médiane d'âge calibrée (yr Ce)	2 σ gamme (yr Ce)
GeoB 8601-3	20.5	.....	90% G.bulloides, 82	1026 \pm 78	1350	1225 à 1460
GeoB 8601-3	60.5	.....	90% G.bulloides, 94	1456 \pm 79	939	760 à 1121
GeoB 8601-3	85.5	.....	90% G.bulloides, 76	1811 \pm 77	587	416 à 727
GeoB 6007-2	53	49.5	G.bulloides	1525 \pm 35	869	776 à 978
GeoB 6007-2	78	80.1	Mixed species	1695 \pm 25	695	649 à 768
GeoB 6007-2	148	145.7	G.bulloides	2840 \pm 30	-663	-757 à -536
GeoB 6007-2	208	210.1	G.bulloides	3470 \pm 25	-1404	-1482 à -1315
GeoB 6007-2	248	252.4	Mixed species	3720 \pm 40	-1692	-1846 à 1587

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs aspects essentiels liés aux changements climatiques. D'une part, nous avons examiné l'évolution des changements climatiques à l'échelle mondiale et nationale, en retraçant leur trajectoire du passé à nos jours. Nous avons également identifié les principaux facteurs et forçages qui exercent une influence sur le climat mondial, tout en mettant en évidence les tendances observées dans les changements climatiques au Maroc. Pour ce faire, nous avons analysé diverses causes du changement climatique qui touchent cette région.

D'autre part, nous avons exploré les méthodes couramment utilisées pour reconstituer l'évolution du climat au cours du dernier millénaire. Nous avons notamment décrit en détail l'analyse par spectrométrie de la fluorescence des rayons X (XRF), qui permet de caractériser la nature des éléments chimiques majeurs et traces présents dans les sédiments marins et continentaux. De plus, nous avons détaillé les analyses de la géochimie des échantillons de foraminifères, réalisées grâce à la mesure du rapport Mg/Ca de la calcite des tests de ces organismes, en utilisant la spectrométrie d'émission par plasma à couplage inductif (ICP).

L'ensemble de ces analyses constitue la base méthodologique de notre travail, qui vise à mieux comprendre les variations climatiques passées dans la région marocaine. Les données ainsi obtenues joueront un rôle fondamental dans notre compréhension des changements climatiques passés de cette zone, et auront des implications importantes pour la gestion et l'adaptation aux défis climatiques futurs.

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

La première partie de cette thèse s'est concentrée sur le "Sud-Ouest du Maroc", englobant à la fois une composante continentale (le bassin versant de Tensift et de Souss-Massa) et une composante marine (la côte atlantique marocaine entre 30°-31°N et 10°-11°O). Cette partie a permis de jeter les bases de notre compréhension des variations climatiques passées de cette région. Voici les principales conclusions qui en découlent :

- ✍ Analyse des paramètres physiques et géomorphologiques : L'analyse des caractéristiques lithologiques et des paramètres physiques des deux bassins versants a permis de mieux comprendre les causes des variations des régimes hydrologiques de chaque bassin versant. Elle a également mis en lumière leur contribution à la genèse des crues et la variabilité des phénomènes hydrologiques dans le temps et dans l'espace.
- ✍ Interaction océan/terre : L'analyse de divers paramètres de la façade Atlantique Marocaine a fourni une compréhension globale de l'interaction entre l'océan et la terre, ainsi que de son influence sur le climat de la zone d'étude. Elle a mis en évidence le rôle de l'océan dans la variabilité climatique à différentes échelles de temps.
- ✍ Importance de l'étude du paléoclimat : La détermination des variations climatiques dans le passé revêt une grande importance, car elle offre une connaissance approfondie du climat passé. Cette compréhension est essentielle pour contextualiser les changements climatiques actuels et anticiper les défis futurs.
- ✍ Méthodologie d'analyse : Deux approches analytiques ont été adoptées dans cette première partie, à savoir l'analyse par spectrométrie de la fluorescence des rayons X (XRF) pour caractériser la composition chimique des sédiments, et l'analyse géochimique des échantillons de foraminifères par spectrométrie d'émission (ICP) pour mesurer le rapport Mg/Ca de la calcite des tests de foraminifères.

L'ensemble de ces analyses constitue une base solide pour la suite de notre étude sur les changements climatiques dans cette région du Sud-Ouest du Maroc. Les informations recueillies grâce à ces méthodes analytiques contribueront à approfondir notre compréhension des variations climatiques passées et à éclairer les défis liés au climat dans cette région et au-delà.

DEUXIÈME PARTIE :

LE FONCTIONNEMENT CLIMATIQUE ACTUEL DES BASSINS VERSANTS DE TENSIFT ET DE SOUSS-MASSA (1968- 2015) : COMPRÉHENSION ET ANALYSE

INTRODUCTION

Le débat sur l'évolution climatique récente nécessite une analyse détaillée des données pluviométriques et thermométriques sur de longues séries chronologiques, avec une haute résolution temporelle et une grande qualité (Vincent et al., 2002).

L'objectif général de cette étude est de mettre en évidence l'importance des données de qualité pour suivre la variabilité du climat récent dans le Sud-Ouest du Maroc. Cette partie de l'étude se compose de trois chapitres visant non seulement à comprendre l'évolution récente du climat et à acquérir une connaissance approfondie de sa variabilité spatio-temporelle sous l'effet du changement climatique, mais aussi à identifier le phénomène de la sécheresse dans cette région et ses impacts.

Les objectifs principaux de cette partie sont les suivants :

- ✍ Caractérisation climatique : Le premier objectif consiste à déterminer les caractéristiques climatiques de la zone d'étude et, d'autre part, à expliquer les processus qui contribuent à cette variabilité climatique.
- ✍ Analyse des données climatiques : Le deuxième objectif vise à analyser en détail les données climatiques, en mettant l'accent sur les précipitations et les températures.
- ✍ Caractérisation de la sécheresse : Le troisième objectif s'intéresse à la caractérisation de la sécheresse climatique dans le bassin de Tensift et de Souss-Massa en extrayant différentes tendances climatiques dans la zone étudiée à l'aide de plusieurs indices.
- ✍ Effets des indices climatiques : Le quatrième objectif consiste à déterminer comment des indices climatiques tels que la NAO, l'ENSO et WeMOI influencent la modulation des conditions climatiques dans la zone étudiée.

Pour atteindre ces objectifs, des données climatiques couvrant une période de 46 ans (1968-2015) provenant des trois parties du bassin (amont, centre et aval) seront analysées en détail.

CHAPITRE N° 1 :

LES DONNÉES CLIMATIQUES : PRÉSENTATION DES STATIONS ET CRITIQUE DES DONNÉES

INTRODUCTION

Les données instrumentales enregistrées par les stations de mesure sont considérées comme la source la plus fiable pour la détection de l'évolution climatique récente. Elles sont généralement disponibles à une haute résolution temporelle et servent souvent d'étalonnage et de paramètres d'entrée pour les reconstitutions climatiques et les scénarios climatiques futurs.

Le but principal de ce chapitre est double : premièrement, analyser les données climatiques relatives aux précipitations et aux températures, et deuxièmement, déterminer les caractéristiques climatiques récentes dans la zone d'étude.

Axe 1 : Présentation des stations retenues :

Les données pluviométriques et les températures collectées, proviennent essentiellement de l'Agence du bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) et de Souss-Massa (ABHSM). Les données climatiques qu'on va exploiter, s'étalent sur une période de 46 ans (1968-2015). Elles représentent les trois parties du bassin (l'amont, centre et l'aval). La variabilité de la qualité et des durées des chroniques a nécessité un choix des stations, basé sur trois critères : la durée de la chronique (couvrir la plus grande période de temps possible), l'importance des lacunes (le moins possible de données manquantes dans celle-ci), ainsi que leur position géographique par rapport au bassin.

I. Présentation des stations pluviométriques retenues :

Pour une analyse complète de la variabilité climatique récente dans le domaine d'étude, il est nécessaire d'avoir un aperçu général et précis, sur le réseau pluviométrique, et s'assurer de la qualité et la fiabilité des données relatives aux stations retenues dans le présent travail.

L'ensemble des données pluviométriques à été mis à notre disposition, par l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) et de Souss-Massa (ABHSM). Les fichiers de ces données donnent les valeurs mesurées des pluies moyennes mensuelles, des stations pluviométriques de la région d'étude, sur une longue période. Ces données sont disponibles pour 6 stations pluviométriques dans le bassin versant de Tensift et 4 dans le bassin versant de Souss-Massa, avec un total de 10 postes pluviométriques.

La liste des stations pluviométriques étudiées est représentée au tableau ci-dessous. Ce dernier montre les caractéristiques principales des différentes stations. Ces stations présentent une longue période d'enregistrement de données, qui diffère d'une station à une autre.

Tableau 8 : Identification de stations pluviométriques retenues.

Bassins	Stations	Coordonnées			Chroniques	Localisation
		Longitude Deg. Déc.	Latitude Deg. Déc.	Altitude (m)		
Tensift	Aghbalou	-7,75	31,32	1070	1970 à 2015	Amont du BV
	Tahanaout	-7,95	31,36	995	1968 à 2015	
	Marrakech	-8,03	31,62	460	1968 à 2015	Centre du BV
	Chichaoua	-8,78	31,59	340	1972 à 2015	
	Talmest	-10,60	30,62	53	1986 à 2014	Aval du BV
	Adamna	-9,68	31,46	70	1978 à 2015	
Souss-Massa	Aoulouz	-8,15	30,70	680	1968 à 2015	Amont du BV
	Amsoul	-9,63	30,81	860	1979 à 2015	
	Taroudant	-8,90	30,50	209	1968 à 2015	Centre du BV
	Agadir	-9,57	30,38	23	1914 à 2015	Aval du BV

II. Présentation des stations thermométriques retenues :

Les données des températures collectées, proviennent du l'agence de bassin hydraulique de Tensift et de Souss-Massa. Le tableau ci-dessous, montre les coordonnées des stations retenues.

Tableau 9 : Identification de stations thermométriques retenues.

Bassins	Stations	Coordonnées			Chronique
		Longitude Deg. Déc.	Latitude Deg. Déc.	Altitude (m)	
Tensift	Oukaimidene	-7,9	31,2	3200	1990-2009
	Marrakech	-8,03	31,62	460	1961-2010
	Takerkoust	-8,13	31,36	630	1983-2010
Souss-Massa	Aoulouz	-8,15	30,70	680	1981-2018
	Taroudant	-8,90	30,50	209	1981-2018
	Agadir	-9,57	30,38	23	1981-2018

III. Le choix des stations étudiées :

Dans un premier temps, nous avons tenté d'intégrer le plus grand nombre de stations les mieux réparties spatialement sur le territoire d'étude, et qui offrent de longues séries d'observations. Le choix a été guidé par trois éléments primordiaux :

- ✓ La situation de la station par rapport au bassin étudié : les stations climatiques étant réparties d'une manière différente, et donc, la station la plus proche de la zone d'étude, sera appropriée et parfaite, pour être considérée comme la station représentative.
- ✓ La longueur de la chronique des données (couvrir la plus grande période de temps possible).
- ✓ La qualité des données (le moins possible de données manquantes).

Puisqu'il est difficile d'analyser toutes les stations existantes dans notre zone d'étude, nous avons décidé de choisir une station représentative, parmi les stations situées en aval, de Tensift (Adamna) et une station pour Souss (Agadir), une station représentative, parmi les stations situées au centre de Tensift (Chichaoua) et de Souss (Taroudant), et une station représentative, parmi les stations situées en amont de Tensift (Aghbalou) et de Souss (Aoulouz).

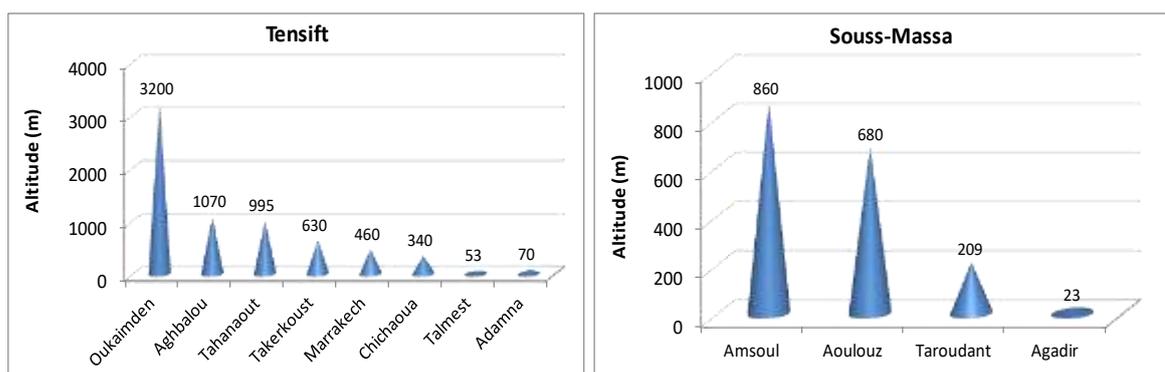
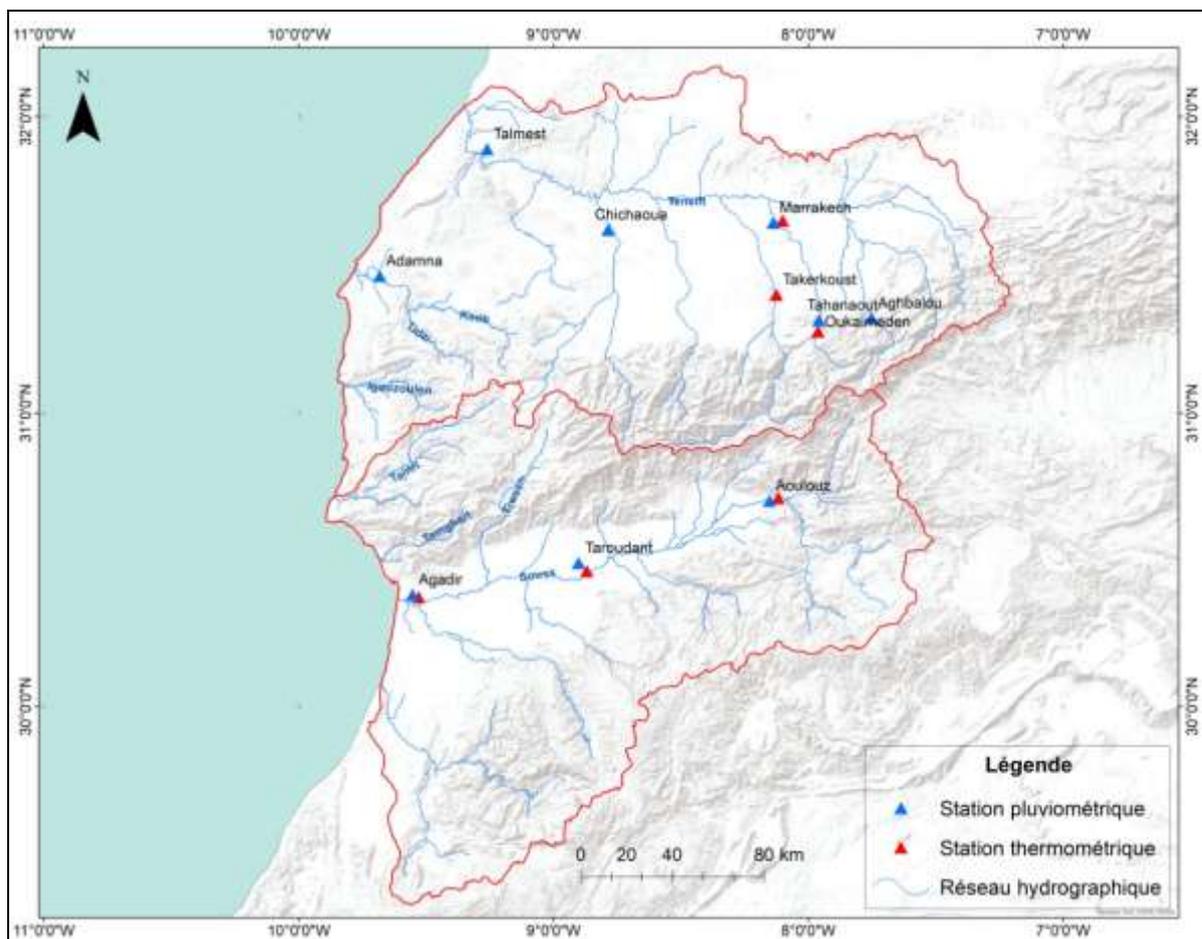


Figure 21 : Répartition altitudinale des stations étudiées dans les deux bassins versants.

La figure ci-dessus représente la répartition altitudinale des stations étudiées, avec une altitude maximale (3200m station Oukaimidene) et une altitude minimale (53m station Talmest) au niveau de Tensift. Une altitude maximale (860m station Amsoul), et une altitude minimale (23m station Agadir) au niveau de Souss-Massa.



Carte 20 : Localisation des stations pluviométriques et thermométriques dans les deux bassins versants.

IV. Le choix de la chronique étudiée :

Le choix d'une chronique est une étape importante, pour mener une étude climatologique. Les stations sélectionnées sont au nombre de 16 (10 stations pluviométriques, et 06 thermométriques).

La chronique des stations présentées est totalement différente. Chaque station a une série de données déterminées. Il n'est pas évident de trouver, une longue chronique de données commune aux 15 stations retenues. De plus, la plupart des observations sont affectées de lacunes.

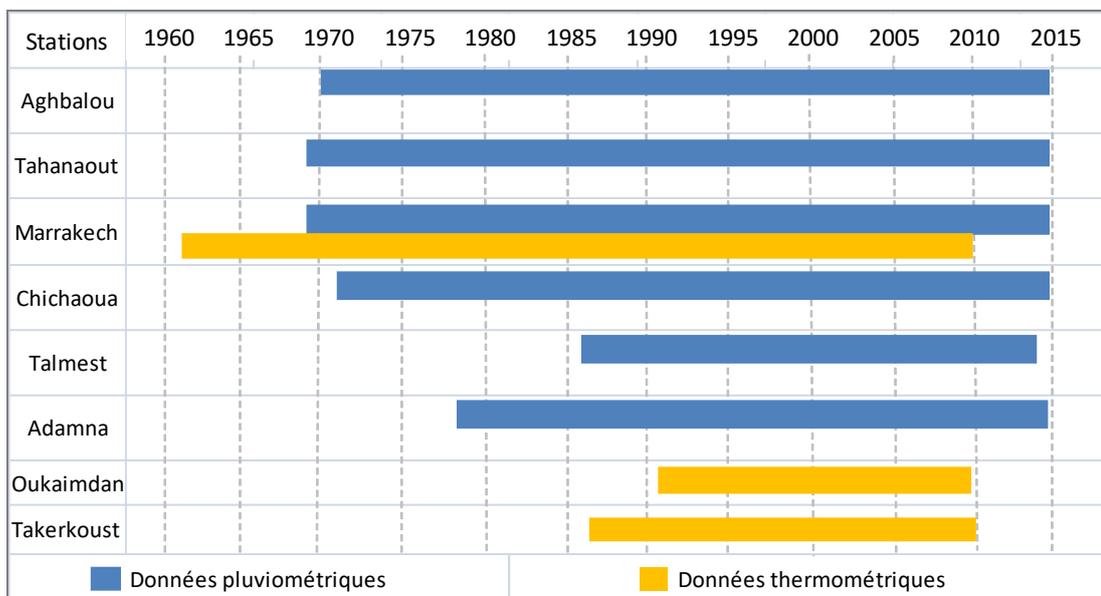


Figure 22 : Chronogramme des stations pluviométriques utilisées dans le bassin de Tensift.

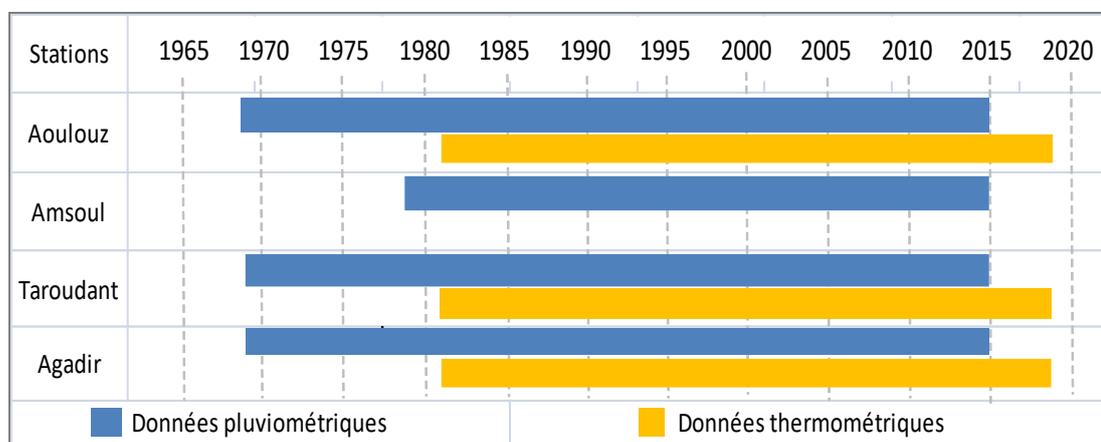


Figure 23 : Chronogramme des stations pluviométriques utilisées dans le bassin de Souss-Massa.

Afin d'avoir un moyen fiable de comparaison, et dans le but d'intégrer un ensemble de stations qui offrent des données de bonne qualité, il est nécessaire de se baser sur quelques critères, pour éliminer les stations défectueuses. Les critères qui ont été adoptés sont :

- Continuité des séries des stations retenues, sur une période suffisamment longue ;
- Homogénéité des séries à étudier ;
- Synchronisation des séries ;
- Représentativité des stations pour toutes les grandes zones géographiques du domaine d'étude.

Avant l'exploitation de ces données, une étude statistique de validation et d'homogénéisation est primordiale, pour vérifier la fiabilité des séries observées et étendues.

Axe 2 : critiques et homogénéisations des données climatiques :

Pour une étude fiable, il est primordial de faire une critique et un traitement primaire des données brutes captées par un observateur, ou un instrument de mesure, pour éviter l'utilisation des séries non homogènes (Castellani, 1986). Le contrôle des séries retenues et la critique sévère des données brutes est donc nécessaire.

I. Le comblement des lacunes :

Un des principaux problèmes que l'on rencontre le plus souvent, concerne les données manquantes. Les séries de données disponibles, comportent un certain nombre de lacunes, dépassant parfois le cadre du mois, ce qui entrave leur exploitation directe. Dans le but de rendre ces données compatibles avec notre objectif, il est important de combler les séries incomplètes.

À cet égard, la méthode du simple et du double cumul a été utilisée, afin de combler les lacunes, de tester l'homogénéité des séries de données et de critiquer les données brutes du réseau pluviométrique (Escourou, 1978). Cette comparaison utilise, au pas du temps choisi, non pas les valeurs observées, mais leur cumul (Meylan et al, 1998). Des corrections prudentes peuvent être administrées aux séries, lorsque la nature systématique des erreurs le permet. Si des valeurs sont trop aberrantes, l'élimination s'impose (Anctil, 2005). Enfin, lorsque certaines valeurs paraissent anormales, tout en demeurant plausibles, leur caractère douteux est signalé.

Dans un premier temps, le test graphique des simples et doubles cumuls des totaux pluviométriques annuels a été appliqué, afin de détecter d'éventuelles anomalies dans une série de données (El Ghachi, 2007).

La méthode du simple et double-cumuls, montre une bonne corrélation avec des coefficients (R^2) supérieurs à 0.99 (fig.24 et 25). Ceci indique que la quasi-totalité des postes, ont enregistré des données annuelles homogènes et de bonne qualité.

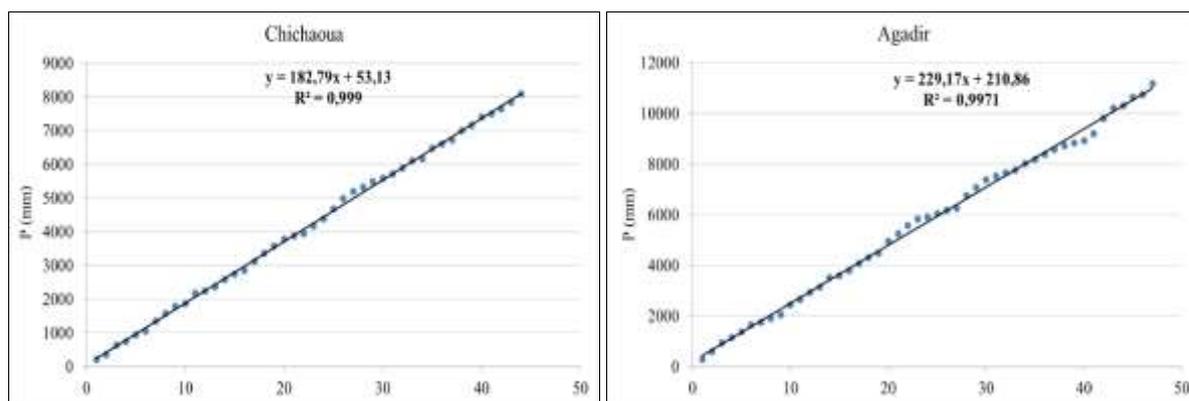


Figure 24 : Exemple de Méthode du simple cumul.

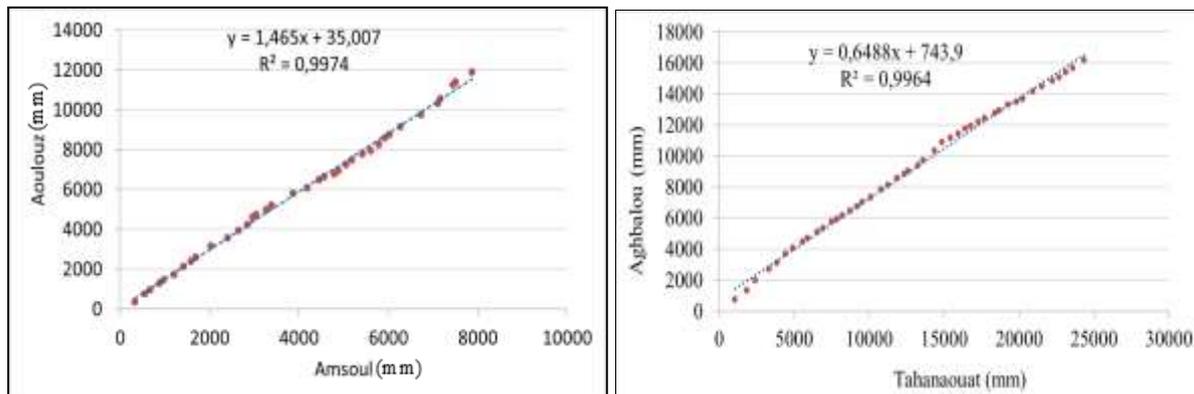


Figure 25 : Exemple de Méthode du double cumul.

Par ailleurs, il est souvent nécessaire d'estimer celles-ci, pour compléter la série (Anctil et al, 2005). Les données manquantes dans les séries, ont été complétées par la méthode des corrélations (Dubreuil, 1974). Elle consiste à vérifier des chroniques de précipitations classiques par corrélations poste par poste et mois par mois. Le coefficient de détermination (R^2) juge de sa qualité et l'équation de la droite de corrélation est utilisée pour combler les lacunes (El Ghachi, 2007). Tant que R^2 est supérieur à 70 %, la corrélation peut être considérée comme satisfaisante, à plus de 80%, la corrélation est bonne.

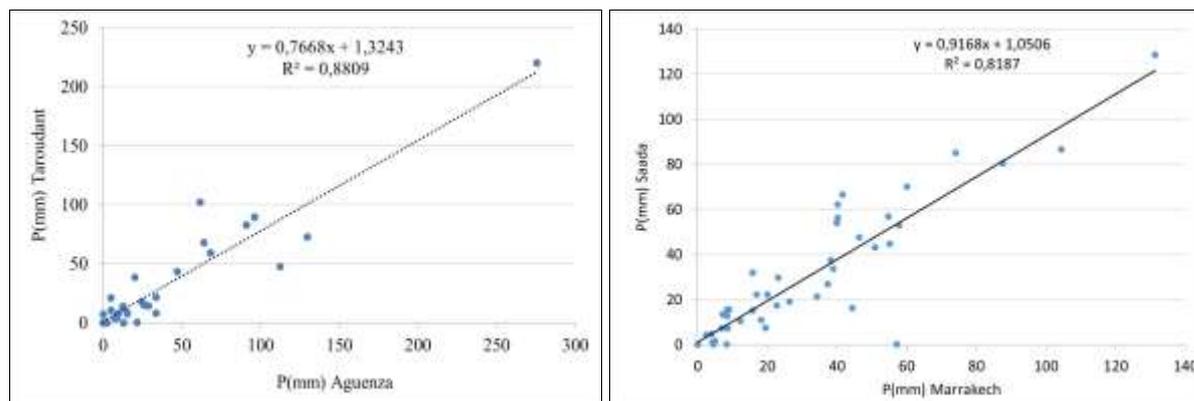


Figure 26 : Exemple de la corrélation mensuelle.

Compte tenu de l'exposition du versant de chaque zone, et du climat dominant, l'interpolation a été faite, d'une part, à partir de la pluviométrie et en fonction de l'altitude, (cas de la zone d'étude), d'autre part, entre stations principales (références) et stations secondaires, appartenant au même domaine climatique. De la même manière, nous avons procédé à des corrélations au pas de temps annuel, puis mensuel, entre toutes les stations pluviométriques mises à notre disposition, deux à deux. Étant donné que chaque groupe de séries pluviométriques représente une zone homogène réduite géographiquement, les corrélations ont donné des coefficients statistiquement significatifs ($0.76 \leq R^2 \leq 0.90$). Au terme de cette étude critique de la base de données, on peut dire que la majorité des stations retenues sont homogènes et fiables, et sont toutes issues d'un réseau professionnel.

II. Analyse statistique d'homogénéité pluviométrique :

La caractérisation des fluctuations du régime pluviométrique repose sur l'analyse statistique des séries chronologiques des pluies, dans des sites différents et sur des périodes les plus longues possibles. Dans cette étude, nous allons adopter la méthode de « CUSUM », pour

déterminer l'hétérogénéité interne de la série étudiée. D'autre part, les tests statistiques de Pettitt (1979), de Lee Heghinian (1977) et U de Buishand (1984) et la procédure de segmentation d'Hubert, permettent de déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique et d'analyser les discontinuités, dans l'ensemble des données étudiées. Toutes ces méthodes (test de Buishand, test de Pettit, la méthode bayésienne de Lee et Heghinian) sont regroupées dans le logiciel « Khronostat », réalisé par l'Institut de Recherche pour le Développement (Boyer, 1998). On présentera brièvement, les méthodes utilisées et les résultats obtenus.

1. Méthode de « CUSUM » :

Tout d'abord, pour une bonne étude et une analyse des variations temporaires des précipitations, il est important d'introduire la notion du « CUSUM », qui désigne le cumul des écarts à la moyenne de la pluie enregistrée et qui permet de révéler les tendances générales de la série étudiée.

La méthode de « CUSUM » (François, Gille et Zumstein 1993) est une méthode statistique, qui a pour objectif, de déterminer l'hétérogénéité interne de la série étudiée, en se fondant sur la définition d'un intervalle de confiance (bande passante C_{jx}).

La méthode de CUSUM repose sur le calcul de :

$$C_j = \sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})$$

En effet, le calcul de la bande passante se fait à partir de :

$$C_{jx} = \pm S \left(\frac{u\sqrt{N}}{4} + \frac{u^2}{2\sqrt{2}} + \frac{u^3}{8\sqrt{N}} \right)$$

S : Ecart- type

N : Nombre de valeurs dans la série

u : Variable de Gauss (pour une probabilité choisie de 95 %, soit « u » fixé à 1.96).

1.1. Dans le bassin versant du Tensift :

La méthode de « CUSUM » nous a permis, de conclure que les précipitations dans la zone d'étude sont soumises à des fluctuations irrégulières. Le calcul des paramètres statistiques du « CUSUM », notamment le coefficient de variation C_j , met aussi en lumière, une irrégularité interannuelle des précipitations dans le bassin versant de Tensift

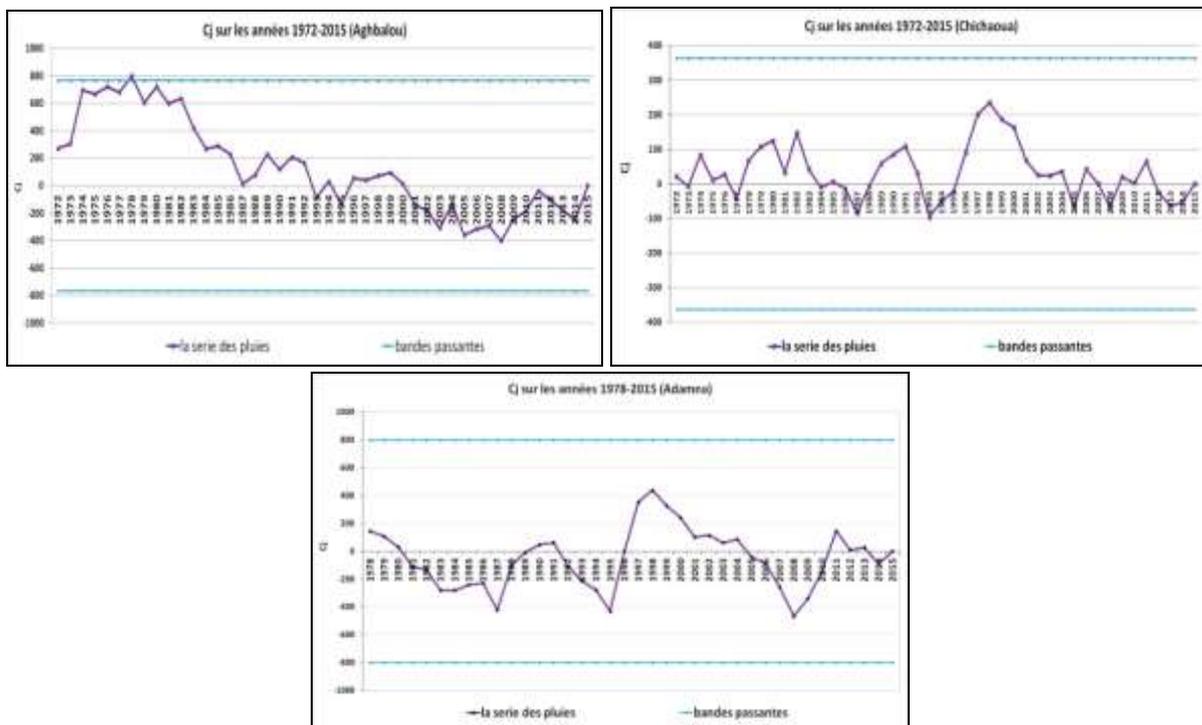


Figure 27 : « CUSUM » des précipitations à la station d’Aghbalou, Chichaoua et d’Adamna.

Les résultats obtenus par la méthode de « CUSUM » montrent que la longue série 1968-2015 est homogène, avec des années humides, moyennes et sèches. Les périodes sèches apparaissent, sous forme de « séquences de valeurs ». En effet, la station d’Aghbalou a enregistré quatre périodes remarquable (1972-1980, 1981-1987, 1988-1999 et 2000-2015), la station de Chichaoua avec sept périodes (1972-1982, 1983-1987, 1988-1990, 1991-1993, 1994-1998, 1999-2005 et 2006-2015), alors que la station d’Adamna est enregistré six périodes (1978-1987, 1988-1991, 1992-1995, 1996-1998, 1999-2008, 2009-2015).

Tableau 10 : Découpage de la chronique des pluies des trois stations en périodes homogènes.

Station	Période	Moyenne (mm)	Nombre d’années	Diagnostic
Aghbalou	1972-1980	610	09	Série homogène humide
	1981-1987	429	07	Série homogène sèche
	1988-1999	537	12	Série homogène moyenne
	2000-2015	524	16	Série homogène sèche
Chichaoua	1972-1982	197	11	Série homogène humide
	1983-1987	137	05	Série homogène sèche
	1988-1990	240	03	Série homogène humide
	1991-1993	123	03	Série homogène sèche
	1994-1998	250	05	Série homogène humide
	1999-2005	140	07	Série homogène sèche
	2006-2015	190	10	Série homogène moyenne
Adamna	1978-1987	284	10	Série homogène sèche
	1988-1991	448	04	Série homogène humide
	1992-1995	204	04	Série homogène sèche
	1996-1998	617	03	Série homogène humide
	1999-2008	236	10	Série homogène sèche
	2009-2015	394	07	Série homogène moyenne

1.2. Dans le bassin versant de Souss-Massa :

Cet aspect de la variabilité peut être abordé notamment, par la méthode du « CUSUM », dont l'objectif, comme dit auparavant, est de déterminer l'hétérogénéité interne de la série étudiée, en se fondant sur la définition d'un intervalle de confiance (bande passante C_{jx}) (François et al, 1993). Méthode statistique issue de la méthode du simple cumul, elle nous a permis de caractériser la période étudiée en définissant le nombre d'années sèches, d'années humide et en détectant les sauts de moyenne.

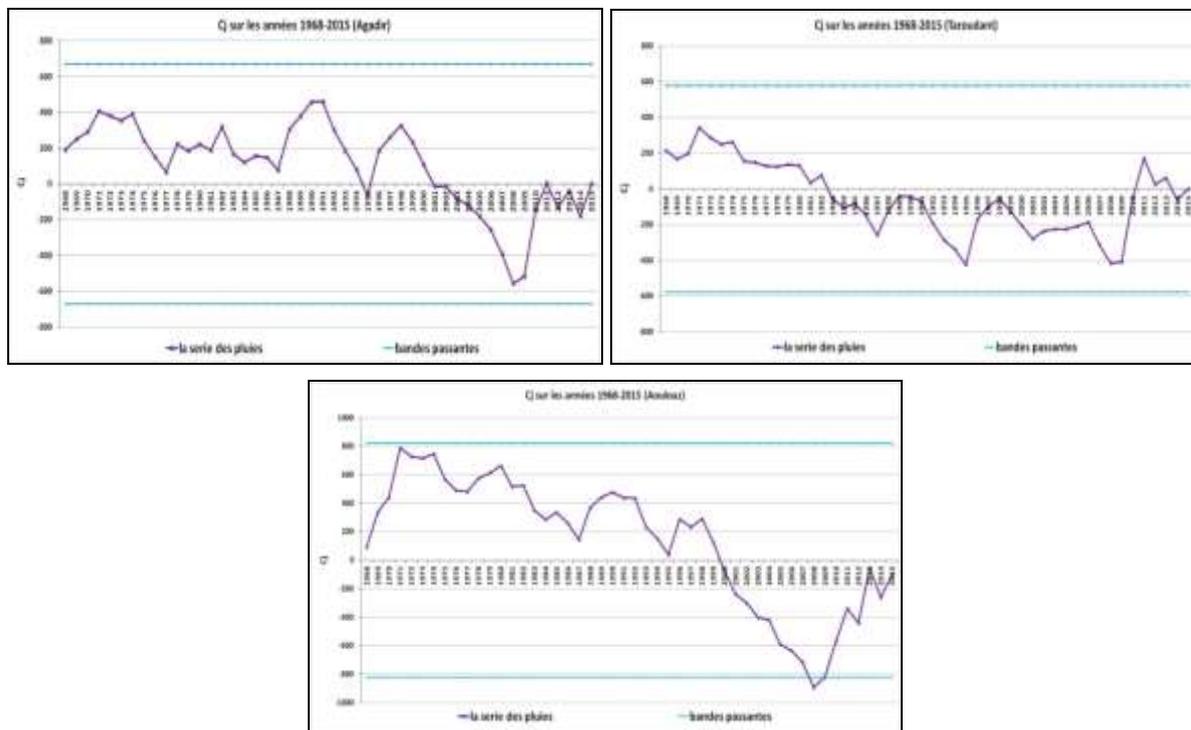


Figure 28 : « CUSUM » des précipitations à la station d'Agadir, Taroudant et d'Aoulouz.

La méthode du CUSUM, par la variable C_j , illustre très clairement les tendances sèches et humides du climat durant 48 années étudiées, pour les données des trois stations de Souss-Massa (fig.28). La station d'Agadir a enregistré cinq périodes (1968-1980, 1981-1987, 1988-1998, 1999-2008 et 2009-2015), la station de Taroudant avec trois période (1968-1987, 1988-2009 et 2010-2015), tandis que la station d'Aoulouz a enregistré sept périodes variant entre périodes humides, moyennes ou sèches (1968-1974, 1975-1986, 1987-1991, 1992-1995, 1996-1998, 1999-2008 et 2009-2015).

Tableau 11 : Découpage de la chronique des pluies des trois stations en périodes homogènes.

Station	Période	Moyenne (mm)	Nombre d'année	Diagnostic
Aoulouz	1968-1980	397	13	Série homogène moyenne
	1981-1987	264	07	Série homogène sèche
	1988-1998	351	11	Série homogène moyenne
	1999-2008	220	10	Série homogène sèche
	2009-2015	451	07	Série homogène humide
Taroudant	1968-1987	193	20	Série homogène sèche
	1988-2009	294	22	Série homogène moyenne
	2010-2015	458	06	Série homogène humide
Agadir	1968-1974	297	07	Série homogène humide
	1975-1986	221	12	Série homogène moyenne
	1987-1991	304	05	Série homogène humide
	1992-1995	111	04	Série homogène sèche
	1996-1998	371	03	Série homogène humide
	1999-2008	153	10	Série homogène sèche
	2009-2015	321	07	Série homogène humide

2. Méthodes statistiques utilisées :

2.1. Test statistique U de Buishand (1984) :

Le test de Buishand (Buishand, 1984) est dérivé d'une formulation originale donnée par Gardner (1969), pour établir un test bilatéral de rupture en moyenne à un instant inconnu. Le test de Buishand est paramétrique, supposant normalité de la série, non auto corrélation et constance de la variance de part et d'autre du point de rupture éventuel. Ce test est performant pour détecter une rupture en milieu de série, mais il ne fournit pas d'estimation du point de rupture.

La statistique U de Buishand est de nature bayésienne et fait référence au modèle simple. En supposant une distribution *a priori* uniforme pour la position du point de rupture m , on définit la statistique U par :

$$U = [N(N+1)]^{-1} \cdot \sum_{k=1}^{N-1} (S_k^* / D_X)^2$$

Elle s'avère performante pour tout changement de moyenne survenant au milieu de la série, cependant, le test de Buishand est un test paramétrique faisant l'hypothèse d'une distribution normale des variables de la série. Le logiciel « Khronostats » nous permet de vérifier la normalité de la série étudiée, et dans le cas où celle-ci serait refusé la série est alors modifiée (Racine Carrée, Logarithme, Box et Cox), pour que les données changées suivent une distribution normale.

2.2. Test de Pettitt (1979) :

Le test de Pettitt (Pettitt, 1979), examine l'existence d'une rupture à un instant inconnu de la série, à partir d'une formulation dérivée de celle du test de Mann-Whitney (Dagnélie, 1970). Ce test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne et, si l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série est rejetée, il propose une estimation de la date de rupture.

Le test de Pettitt est une approche non-paramétrique dérivée du test de Mann &, permettant d'identifier un point de rupture, dans une séquence de variables aléatoires indépendantes X_i , $i = 1, N$.

Le test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne. Pour cela, on définit la variable :

$$U_{i,N} = \sum_{r=1}^i \sum_{j=r+1}^N D_{ij} \quad \text{où } D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) \quad \text{tel que} \quad \begin{cases} \text{sgn}(X) = 1 & \text{pour } X > 0 \\ \text{sgn}(X) = 0 & \text{pour } X = 0 \\ \text{sgn}(X) = -1 & \text{pour } X < 0 \end{cases}$$

La faiblesse du test a pu être mise en évidence (Lubes-Niel et al, 1998) sur les ruptures dans une série chronologique portant sur l'écart-type.

2.3. Méthode Bayésienne de Lee et Heghinian (1977) :

La méthode Bayésienne de Lee et Heghinian, (1977) est une approche paramétrique, qui requiert une distribution normale des variables étudiées. Elle fait l'hypothèse d'une rupture en moyenne à un instant inconnu. La distribution a priori de l'instant de la rupture est uniforme, et compte tenu de cette information et des données, la méthode produit la distribution de probabilité a posteriori de l'instant de la rupture.

Cette méthode propose une approche paramétrique. Elle nécessite une distribution normale des valeurs de la série. L'absence de rupture dans la série, constitue l'hypothèse nulle. Le modèle de base est le suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \epsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \epsilon_i & i = \tau + 1, \dots, N \end{cases}$$

Les ϵ_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 ; τ et δ représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne. La méthode établit la distribution de probabilité a posteriori de la position dans le temps d'un changement. Lorsque la distribution est unimodale, la date de la rupture est estimée par le mode, avec d'autant plus de précision, que la dispersion de la distribution est faible.

2.4. Procédure de segmentation d'Hubert (1989) :

La procédure de segmentation a pour principe, le découpage d'une série en « m » segments de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment, soit nettement différente de la moyenne du (des) segment (s) voisin (s).

Cette méthode consiste à découper la série en « m » segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment, soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s) (Hubert et al, 1989), au regard du Test de Scheffé (Dagnelie, 1970). Une telle méthode est appropriée, à la recherche de multiples changements de moyenne. D'après les auteurs (Hubert *et al*, 1989), cette procédure de segmentation peut être regardée comme un test de stationnarité. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, alors l'hypothèse nulle de stationnarité est acceptée.

3. Interprétation des résultats des tests de rupture des stations du bassin versant de Tensift :

3.1. Interprétation des résultats du Test de Lee et Heghinian :

D'après la figure ci-dessous, dans le cas des stations de Tensift, le mode de la fonction densité de probabilité à posteriori de la position du point de rupture 0,3744 en 1974 à la station d'Aghbalou et 0,0684 en 2014 à la stations de Chichaoua, alors que pour la station d'Adamna, le mode de la fonction de densité de probabilité à posteriori de la position du point de rupture 0,0845 en 1978.

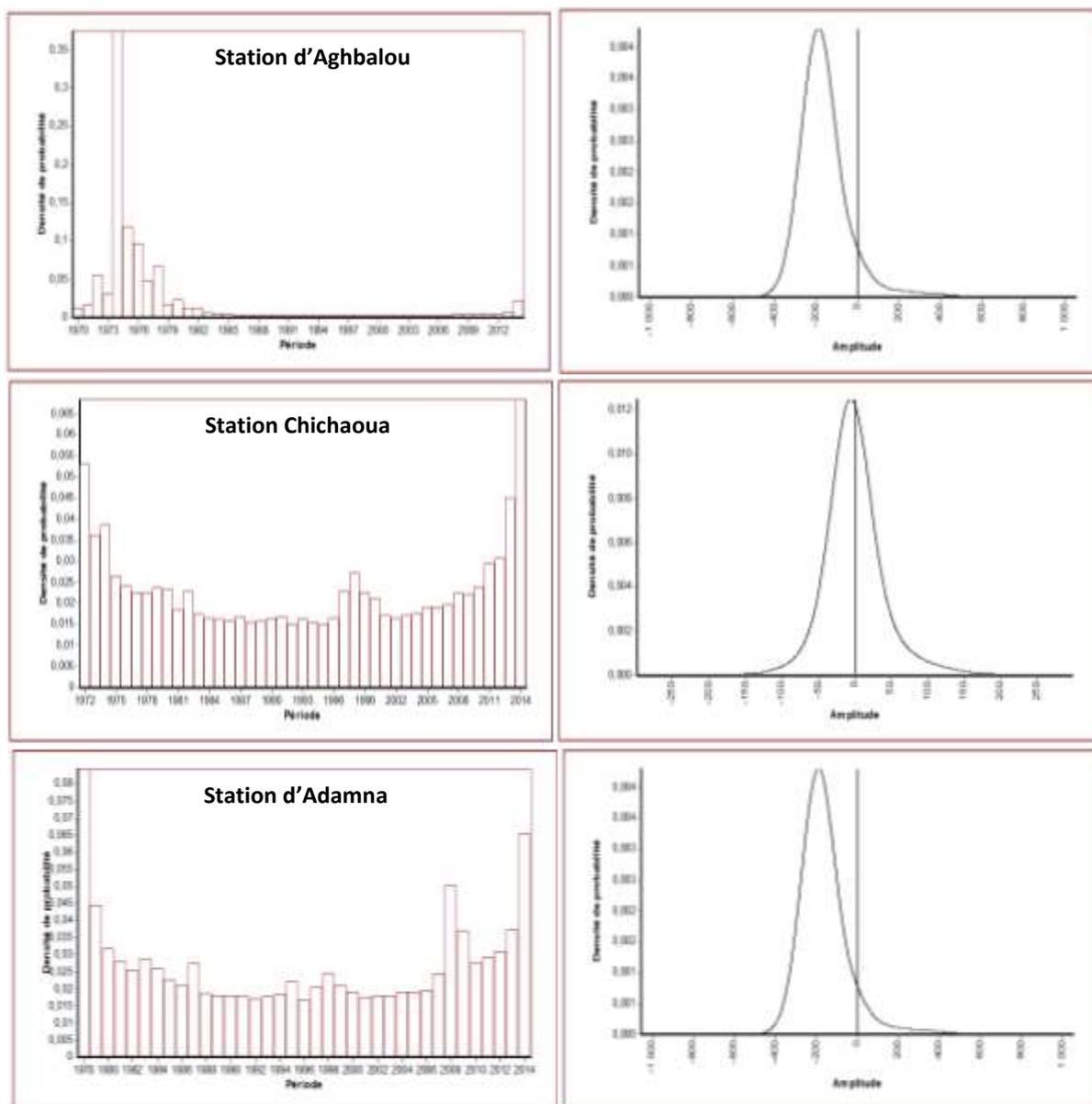


Figure 29 : Résultat d'application de test de Lee et Heghinian sur la série pluviométrique des trois stations.

3.2. Interprétation des résultats du Test de Buishand :

La figure ci-dessous, montre trois ellipses du Test de Buishand et leurs intervalles de confiance pour les stations d'Aghbalou, de Chichaoua et d'Adamna. Pour la première station, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée pour les intervalles de confiance de 90 %,

95 % et de 99 % , la rupture est indiquée par l'ellipse de Buishand en 1972, tandis que, pour la deuxième station, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée au seuil de confiance de 90 %, 95% et de 99 %. Pour la troisième station, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée au seuil de confiance de 90 %, 95 % et de 99 %, ce qui indique l'absence d'une rupture.

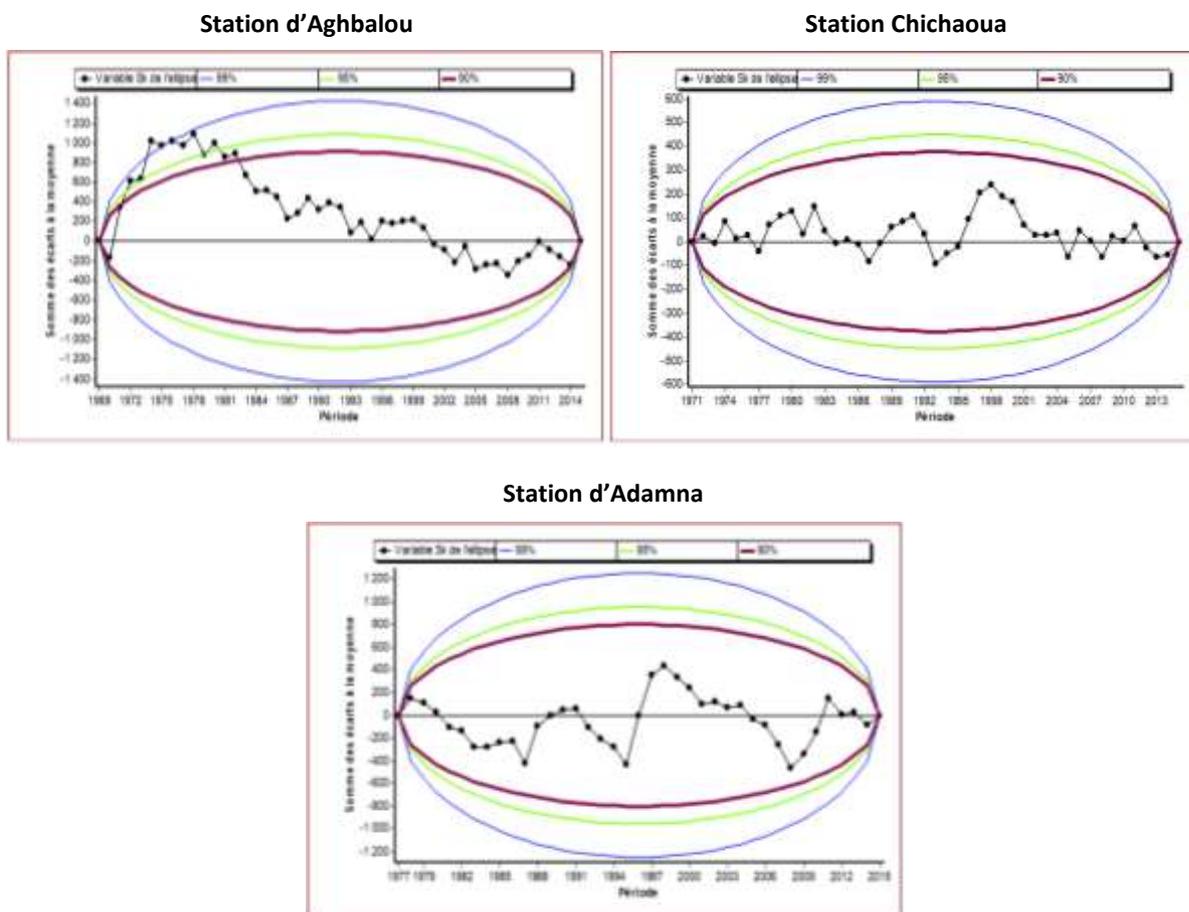


Figure 30 : Résultat d'application du Test de Buishand à la série pluviométrique des trois stations.

3.3. Interprétation des résultats du Test de Pettitt :

La figure ci-dessous illustre la fonction du test de Pettitt et son intervalle de confiance, pour les stations d'Aghbalou, de Chichaoua et d'Adamna. D'une part, pour la série pluviométrique de la station d'Aghbalou, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée pour les trois intervalles de confiance (90 %, 95 % et 99 %), c'est ainsi que la série pluviométrique présente une rupture qui est localisée en 2008. D'autre part, l'application de ce test sur la série pluviométrique de la station de Chichaoua, nous indique que l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée aussi, au seuil de confiance 90 %, 95 % et de 99 %, avec une rupture en 1998, de même, pour la série pluviométrique de la station d'Adamna l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée pour les trois intervalles de confiance (90 %, 95 % et 99 %), la rupture est détectée en 2008.

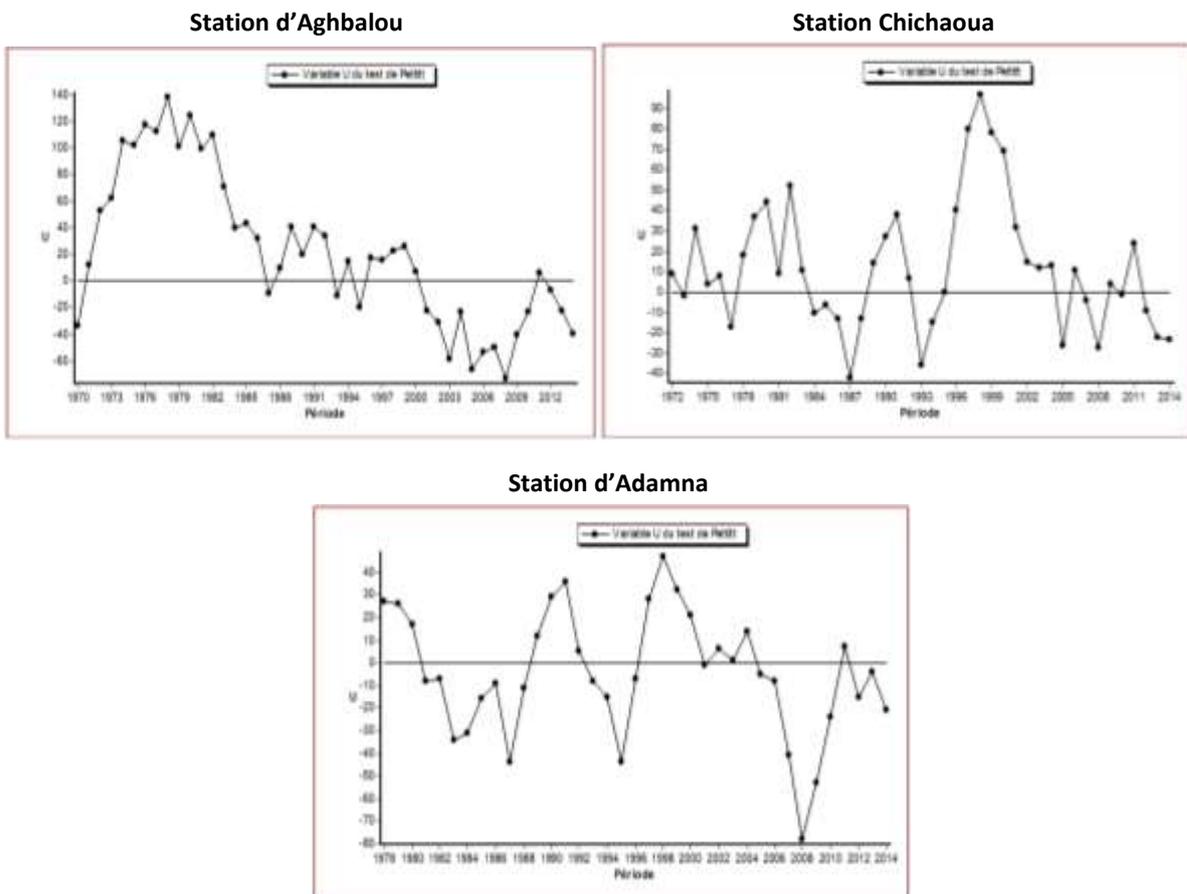


Figure 31 : Résultat d'application de test de Pettitt à la série pluviométrique des trois stations.

4. Interprétation des résultats des tests de rupture des stations du bassin versant de Souss-Massa :

4.1. Interprétation des résultats du test de Lee et Heghinian :

D'après la figure ci-dessous, dans le cas des stations de Souss-Massa, le mode de la fonction densité de probabilité à posteriori de la position du point de rupture 0,4286 en 1971 à la station d'Aoulouz et 0,1466 en 1968 à la station de Taroudant, tandis que pour la station d'Agadir, le mode de la fonction de densité de probabilité à posteriori de la position de point de rupture 0,0783 en 1971.

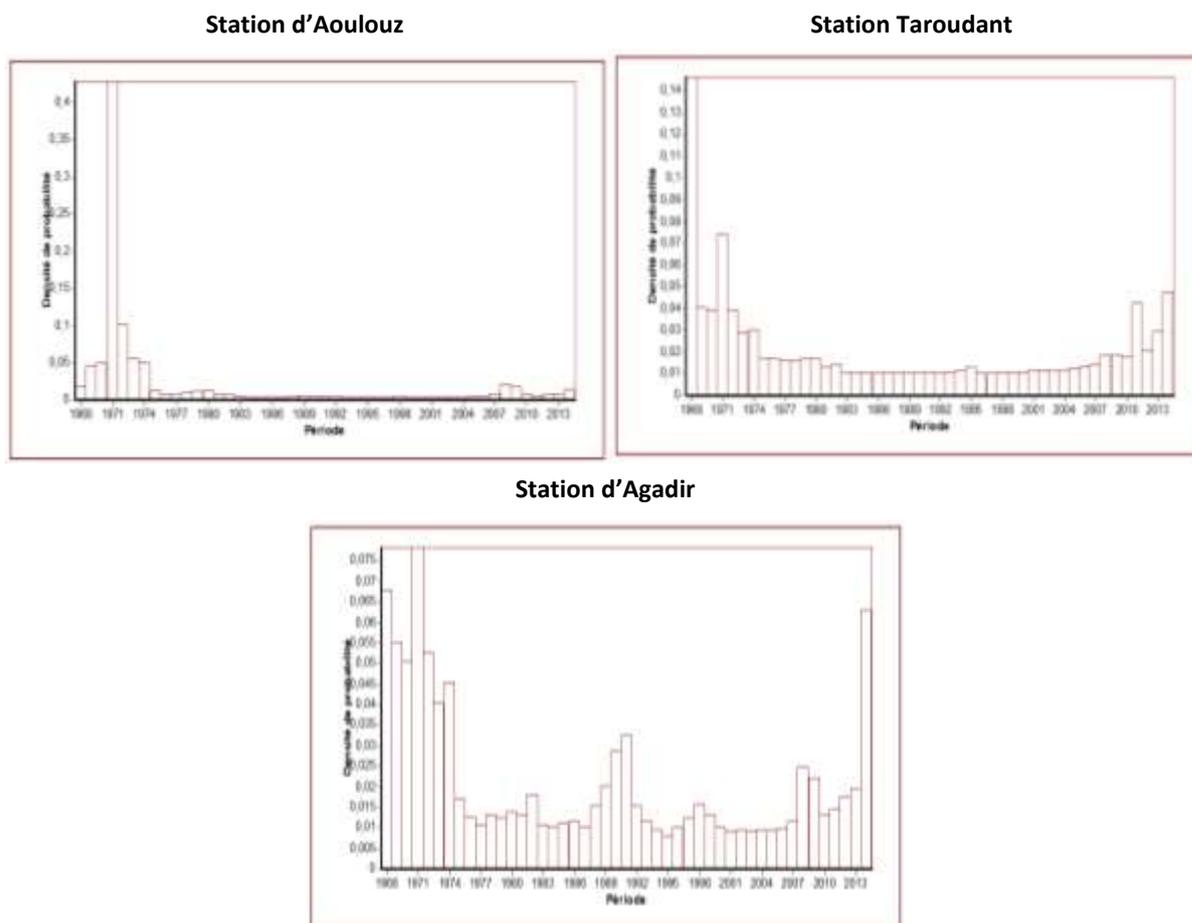
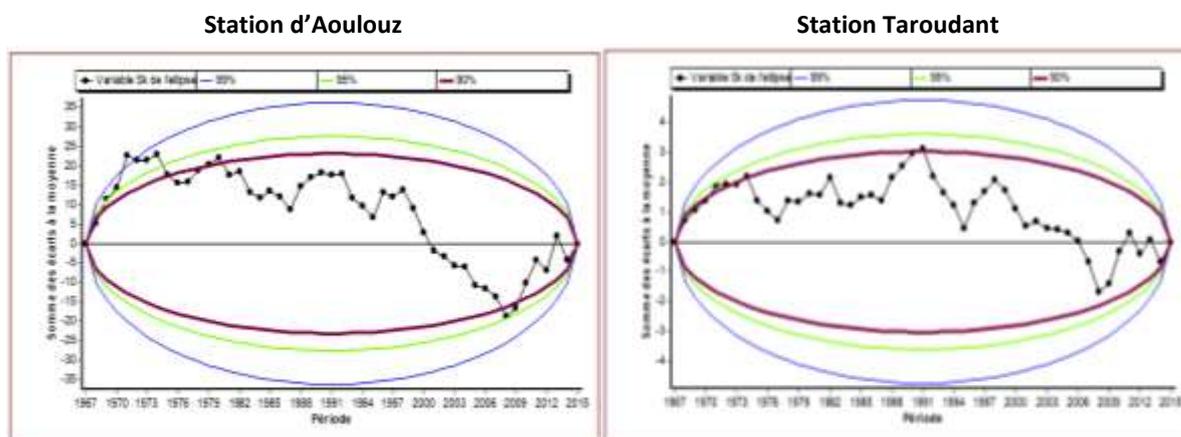


Figure 32 : Résultats d'application du test de Lee et Heghinian sur la série pluviométrique des trois stations.

4.2. Interprétation des résultats du test de Buishand :

La figure ci-dessous, illustre trois ellipses du test de Buishand et leurs intervalles de confiance, pour les stations d'Aoulouz, de Taroudant et d'Agadir. Pour la première station, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée pour les intervalles de confiance de 90 %, 95 % et de 99 %, la rupture est indiquée par l'ellipse de Buishand en 1971. Tandis que, pour la deuxième station, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée au seuil de confiance de 90 %, 95% et de 99 %, de même pour la troisième station, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée au seuil de confiance de 90 %, 95 % et de 99 %, ce qui indique l'absence d'une rupture.



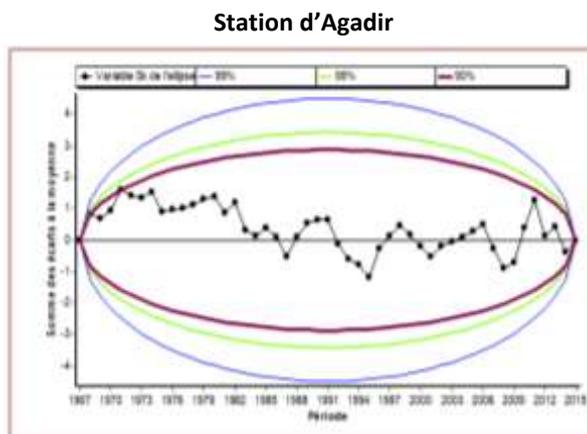


Figure 33 : Résultats d'application du test de Buishand à la série pluviométrique des trois stations.

4.3. Interprétation des résultats du test de Pettitt :

La figure ci-dessous, montre la fonction du test de Pettitt et son intervalle de confiance pour les stations d'Aoulouz, de Taroudant et d'Agadir. Pour la série pluviométrique de la station d'Aoulouz, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée pour les trois intervalles de confiance (90 %, 95 % et 99 %), ainsi la série pluviométrique présente une rupture qui est localisée en 2008. Alors que, l'application de ce test sur la série pluviométrique de la station de Taroudant, nous indique que l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée aussi, au seuil de confiance 90 %, 95 % et de 99 %, la rupture est indiquée en 1995. Pour la série pluviométrique de la station d'Agadir, l'hypothèse nulle (absence de rupture) acceptée pour les trois intervalles de confiance (90 %, 95 % et 99 %), la rupture est détectée en 2008.

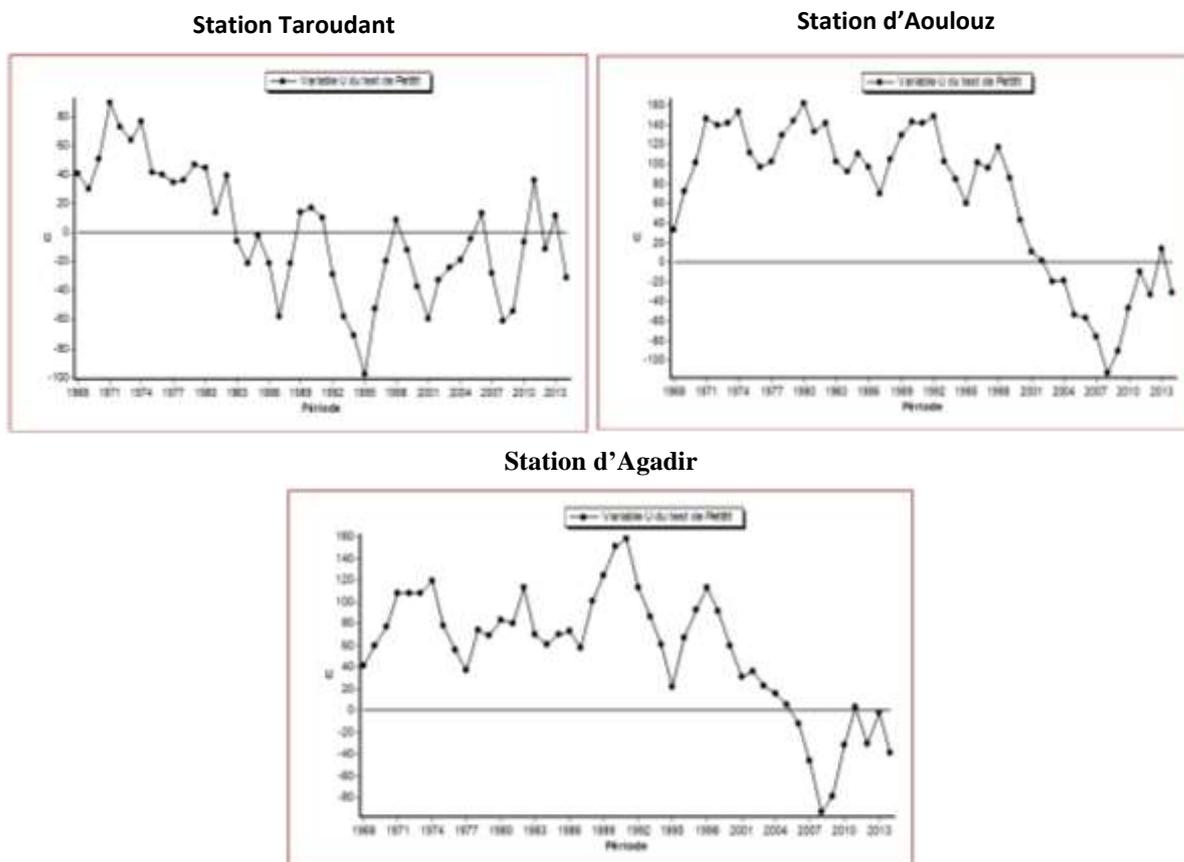


Figure 34 : Résultats d'application du test de Pettitt à la série pluviométrique des trois stations.

Tableau 12 : Résultats des tests de détection de rupture appliqués aux séries pluviométriques annuelles.

Bassin	Station	Période d'étude	Buishand	Pettitt	Lee et Heghinian	Segmentation de Pierre Hubert			
						début	fin	moyenn e	Ecart- type
Tensift	Aghbalou	1972- 2015	1972	2008	1974	1971	1972	928,000	178,191
						1973	2015	523,372	140,443
	Chichaoua	1972- 2015	Vraie	1998	2014	1972	2015	183,636	68,935
	Adamna	1978- 2014	Vraie	2008	1978	1978	2015	326,737	158,011
Souss- Massa	Aoulouz	1968- 2015	1971	2008	1971	1968	2002	323,408	140,567
	Taroudant	1968- 2015	Vraie	1995	1968	1986	2015	206,271	106,451
	Agadir	1968- 2015	Vraie	2008	1971	1968	2015	241,667	123,651

CONCLUSION

Nous avons conclu que l'analyse d'homogénéité pluviométrique est cruciale pour notre travail. En effet, les séries temporelles des précipitations annuelles dans la zone d'étude se sont avérées généralement de bonne qualité. Les quatre tests que nous avons utilisés nous permettent d'affirmer que ces séries de précipitations annuelles sont appropriées pour mener une étude climatique pertinente.

CHAPITRE N° 2 :

MISE AU POINT SUR LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE RÉCENTE DANS LES BASSINS DE TENSIFT ET DE SOUSS-MASSA (1968-2015)

INTRODUCTION

L'approche employée pour caractériser la variabilité climatique de la zone d'étude (le Sud-Ouest du Maroc) est principalement basée sur des analyses statistiques. Ces analyses incluent l'examen des tendances et la détection des ruptures, visant à définir les caractéristiques communes entre les séries de données, à identifier d'éventuels comportements périodiques (cyclicité annuelle, interannuelle, ou à plus long terme), et à suivre leur évolution au fil du temps, en particulier pour les signaux instationnaires. L'un des objectifs généraux de ce chapitre est de mieux comprendre la variabilité climatique des bassins versants étudiés à court terme et les facteurs qui la contrôlent.

La démarche adoptée repose notamment sur l'analyse des données de précipitations et de températures à différentes échelles de temps, notamment à l'échelle annuelle, interannuelle et mensuelle. Le réseau de stations météorologiques continue d'être la base essentielle pour l'étude de la variabilité climatique saisonnière et interannuelle des précipitations terrestres (Willmott et al, 1994). Dans ce contexte, ce travail se concentre sur des analyses statistiques approfondies.

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier la variabilité climatique récente dans le bassin versant de Tensift et de Souss-Massa, et également d'analyser les éventuelles tendances dans les séries de données des stations météorologiques étudiées. L'analyse de la variabilité climatique récente repose sur des calculs statistiques visant à évaluer les irrégularités des données pluviométriques et thermométriques dans la région d'étude, ainsi qu'à identifier les périodes sèches et humides.

Axe 1 : Les caractéristiques pluviométriques des bassins de Tensift et de Souss-Massa :

Cet axe s'articule autour de l'analyse des données climatiques dans notre zone d'étude. Nous utiliserons des tests statistiques, d'une part, pour la détection des tendances et des ruptures dans les séries observées de ces paramètres et, d'autre part, pour étudier la tendance climatique et la structure des hauteurs de pluies et des températures annuelles observées dans les bassins de Tensift et du Souss-Massa.

Les principaux objectifs de cet axe, sont les suivants :

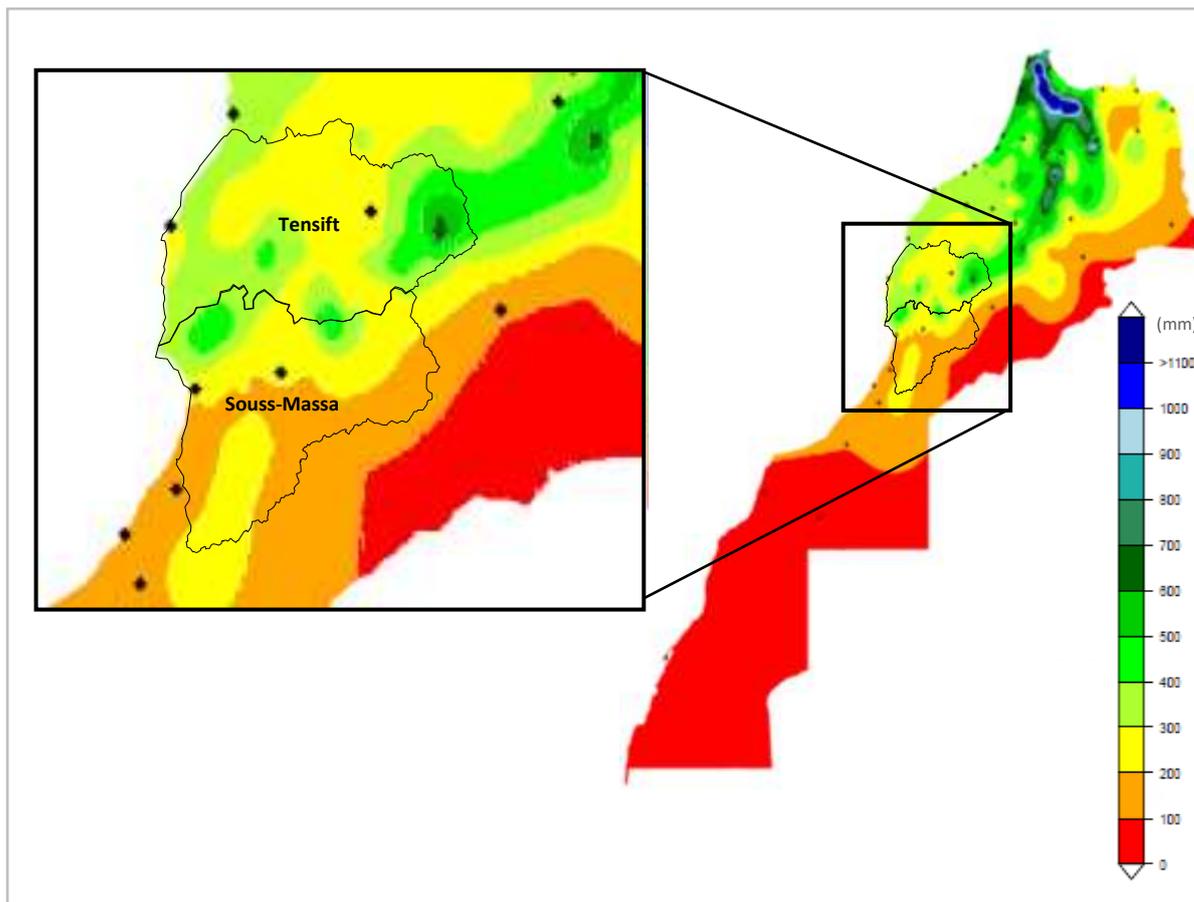
- 1) Examiner les tendances annuelles à long terme et les ruptures dans les séries des précipitations et des températures, au cours de la période étudiée ;
- 2) Étudier la significativité statistique des tendances, en utilisant une analyse non paramétrique ;
- 3) Identifier les extrêmes pluviométriques et thermométriques, qui sont à l'origine de tous les changements qui se sont produits dans les zones étudiées ;
- 4) Étudier les effets des modes de téléconnexion (NAO, SOI, WeMOI) sur la modulation des conditions climatiques au Sud-Ouest du Maroc (Tensift et Souss-Massa).

I. Étude de l'évolution du climat récent dans les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa :

1. Spatialisation des précipitations pluviométriques annuelles dans le domaine d'étude :

Le climat régnant sur l'ensemble du domaine d'étude est généralement de type aride à semi-aride, à influence océanique près des côtes. En raison de son étendue et de son relief, la zone d'étude se caractérise par un climat très différencié, d'une zone à l'autre. Ainsi, le climat est semi-aride influencé par le courant froid des Canaries dans la zone côtière, semi-aride et aride dans les zones intérieures des bassins et semi humide en montagne (CSEC, 2001).

Le nombre de stations disponibles est insuffisant, donc la spatialisation des pluies annuelles effectuée ne donne pas de résultats satisfaisants, et pour une meilleure connaissance de la distribution des pluies à différente échelle de temps dans les bassins de Tensift et de Souss-Massa, on a fait appel à une carte faite par la direction de la météorologie nationale, dans un rapport sur la pluviométrie annuelle moyenne au Maroc, calculée sur la période 1971-2000 (carte 21).



Carte 21 : Pluviométrie annuelle moyenne au Maroc, calculée sur la période 1971-2010 (Source : DMN).

Cette spatialisation confirme que la côte atlantique et l'amont des deux bassins versants sont généralement plus arrosés que l'aval. La zone du Sud de Souss-Massa est moins pluvieuse. On constate que les hauteurs pluviométriques connaissent une variation spatiale importante de l'ordre d'environ 300 mm, entre l'amont et l'aval, pour le cas de Tensift et de l'ordre d'environ 400 mm entre le Nord et le Sud du bassin versant de Souss-Massa (latitudes). Cette différence dépend essentiellement, des facteurs suivants : la proximité de la mer, l'altitude et les latitudes.

2. Les caractéristiques pluviométriques des bassins versants de Tensift et de Souss-Massa :

L'objectif de cette étude est de déterminer la variabilité temporelle et spatiale des précipitations pluviométriques, durant les périodes retenues dans la zone d'étude, de déterminer et d'identifier les régions pluviométriques. D'un point de vue méthodologique, la démarche adoptée repose sur un traitement des données pluviométriques des stations de Tensift (1972-2015), et de Souss-Massa (1968-2015). Le but est d'extraire des renseignements sur la variabilité des pluies dans les deux bassins, tout en identifiant les situations majeures et les caractéristiques des situations extrêmes (volumes atteints, fréquences d'apparition...).

2.1. L'analyse pluviométrique à l'échelle annuelle :

Comme dit auparavant, l'analyse des précipitations annuelles est faite afin de déterminer les variations temporelles, et d'extraire l'information climatique. Il arrive souvent, que les hauteurs des pluviométries annuelles, soient relativement différentes et soumises à des variabilités spatiales.

On va essayer de détecter cette variabilité, à partir des données de 6 stations représentatives des deux bassins, respectivement de la partie amont, centre et aval de chaque bassin : Aghbalou, Chichaoua et Adamna (Tensift), Aoulouz, Taroudant et Agadir (Souss-Massa).

2.1.1. La pluviométrie à l'échelle annuelle dans le bassin versant de Tensift :

A l'échelle du bassin du Tensift, l'analyse des pluviométries annuelles des stations d'Aghbalou, Chichaoua et Adamna qui est représentent les trois parties du bassin de Tensift (Amont, centre et aval), montrent une irrégularité temporelle sur toute la durée de la série. La moyenne de la chronique est de l'ordre de 530 mm (Aghbalou), 327 mm (Adamna) et 184 mm (Chichaoua). D'une station à l'autre, les pluviométries annuelles connaissent une variabilité remarquable, l'écart entre le maximum (921 mm à Aghblaou (Amont), 299 mm à Chichaoua (centre) et 758 mm à Adamna (aval)) atteint les 622 mm, ce qui explique le contraste pluviométrique entre les trois régions du bassin. D'un point de vue statistique, si on considère les années inférieures à la moyenne comme années sèches, on remarque que sur les 44 années étudiées, 22 années sont inférieures à la moyenne (années sèches) pour la station d'Aghbalou, 21 années à la station de Chichaoua et 20 années à Adamna pour la période entre 1978-2015 (fig.35).

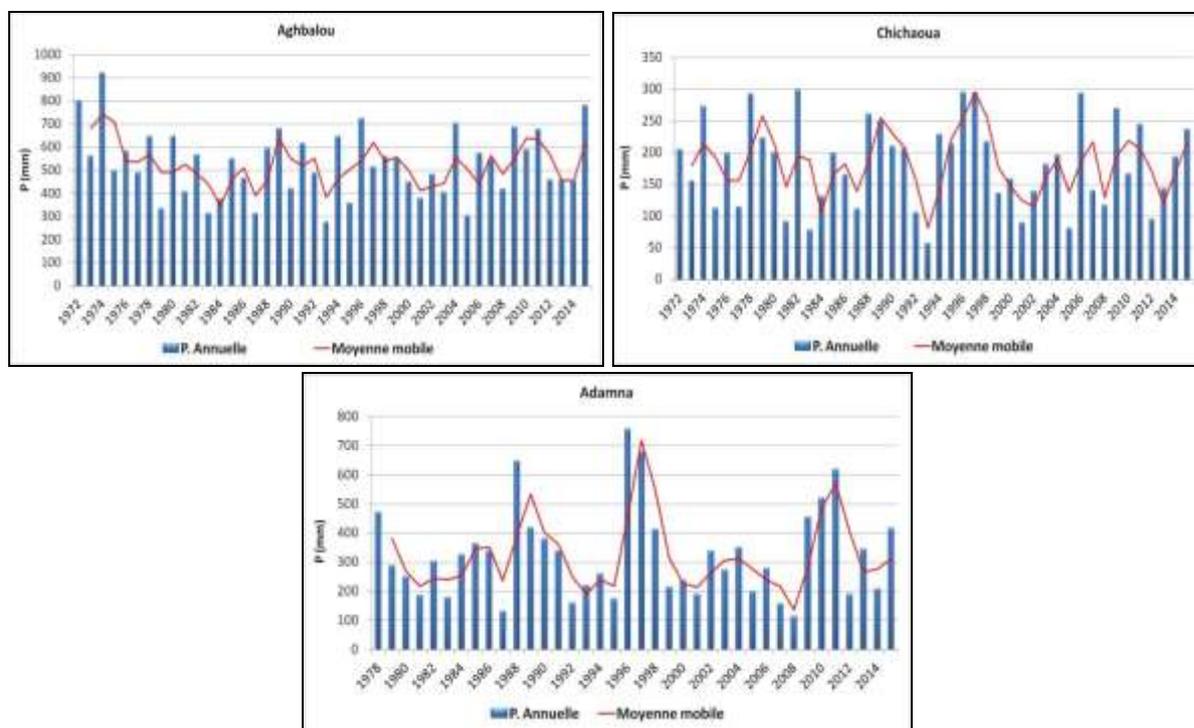


Figure 35 : Évolution des précipitations annuelles, par rapport à la moyenne mobile à la station d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna (1972-2015).

Les valeurs maximales relatives à la période de mesure ont été enregistrées à Aghbalou (921 mm) en 1974, Chichaoua (299 mm) en 1982 et à Adamna (758 mm) en 1996, alors que les pluies minimales ont été mesurées en 1993 au niveau de la station Chichaoua (57 mm), Adamna (115 mm en 2008) et dans la station d'Aghbalou (151,3 mm en 1993).

Tableau 13 : caractéristiques statistiques des trois stations (1972-2015).

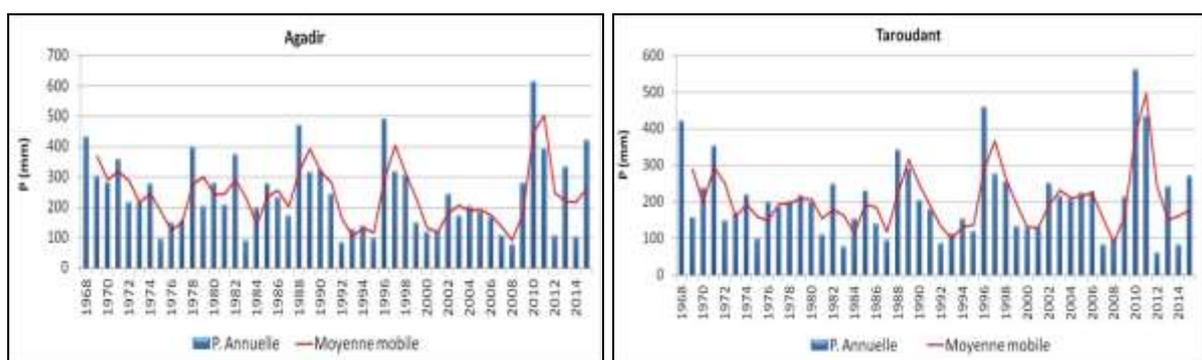
Station	Moyenne P (mm)	Max P (mm)	Min P (mm)
Aghbalou	530	921	277
Chichaoua	184	299	57
Adamna	327	758	115

Les stations ressortent que, l'amont du bassin est bien arrosé avec des moyennes pluviométriques qui dépassent les 530 mm (la station d'Aghbalou), l'intérieur du bassin, avec la station de Chichaoua, enregistre les pluies les plus faibles de la série (moins arrosée). À l'aval, la station d'Adamna se positionne avec des moyennes pluviométriques de 327 mm.

2.1.2. La pluviométrie à l'échelle annuelle dans le bassin versant de Souss-Massa :

L'étude des modules pluviométriques annuels et interannuels montre une évolution temporelle des précipitations, avec une alternance d'années humides et d'années sèches, tout au long de la série. On remarque que les précipitations maximales ont été enregistrées pendant l'année hydrologique 2010 en aval du bassin (station d'Agadir) avec 613 mm, et 561 mm à l'intérieur du bassin (Taroudant) pendant la même année (2010), alors qu'en amont (station d'Aoulouz), pendant l'année hydrologique 2013 avec 724 mm. Par contre, les années les plus sèches de la période d'étude, avec un minimum de 77 mm à la station d'Agadir, 59 mm à Taroudant et 133 mm à la station d'Aoulouz.

D'un point de vue statistique, si on considère les années inférieures à la moyenne, comme années sèches, on remarque que sur les 48 années étudiées (1968-2015), 26 années sont inférieures à la moyenne (années sèches), pour la station d'Agadir, 26 années à la station de Taroudant, et enfin 28 années à la station d'Aoulouz (fig.36).



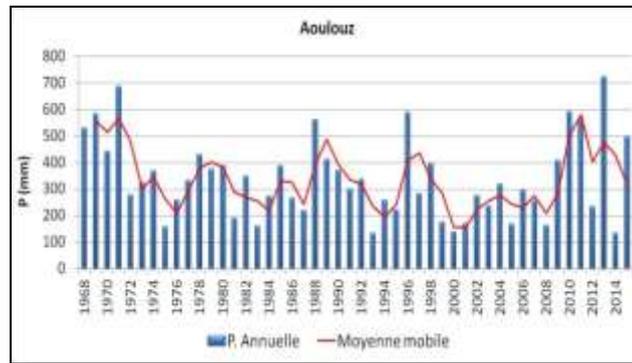


Figure 36 : Évolution des précipitations annuelles, par rapport à la moyenne mobile aux stations d'Agadir, Taroudant et d'Aoulouz (1968-2015).

Les stations ressortent que, l'amont du bassin de Souss-Massa est bien arrosé, avec des moyennes pluviométriques qui dépassent les 338 mm (station d'Aoulouz), l'intérieur du bassin avec la station de Taroudant, enregistre les pluies les plus faibles de la série avec une moyenne de 206 mm (moins arrosée). A l'aval, la station d'Agadir se positionne avec des moyennes pluviométriques de 242 mm.

Tableau 14 : caractéristiques statistiques des trois stations (1968-2015).

Station	Moyenne P (mm)	Max P (mm)	Min P (mm)
Agadir	242	613	77
Taroudant	206	561	59
Aoulouz	338	724	133

2.2. Analyse pluviométrique à l'échelle mensuelle dans les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa :

Le but de cette analyse est d'avoir une idée, sur la distribution des pluies à l'échelle mensuelle. En effet, la variation mensuelle des pluies, permet de mieux comprendre la répartition temporelle des entrées pluviométriques mensuelles dans les bassins de Tensift et de Souss-Massa, et de déterminer les fluctuations du volume des précipitations au cours de l'année.

2.2.1. La pluviométrie à l'échelle mensuelle dans le bassin versant de Tensift :

Vu l'importance des précipitations dans le changement climatique, une étude de l'évolution de ce facteur mensuel a été menée. L'analyse de la figure ci-dessous (Fig.37), met en évidence une forte variabilité pluviométrique mensuelle, au niveau des trois stations. En effet, on peut classer deux périodes distinctes, qui contrastent fortement en terme de précipitations.

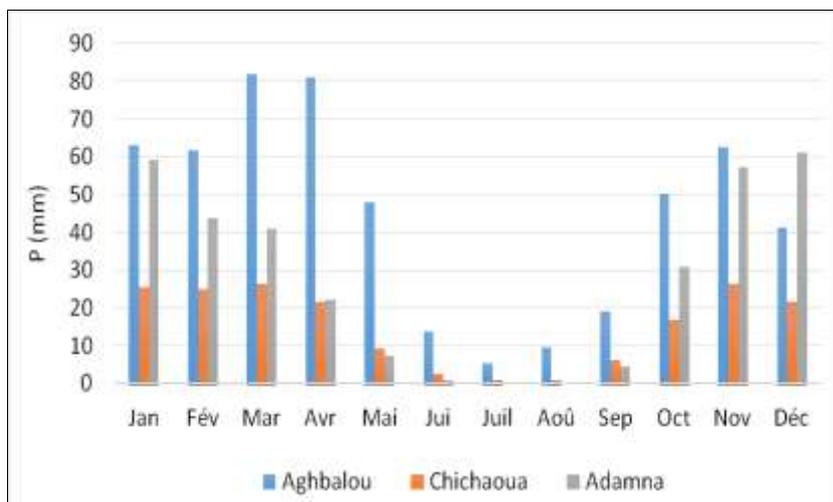
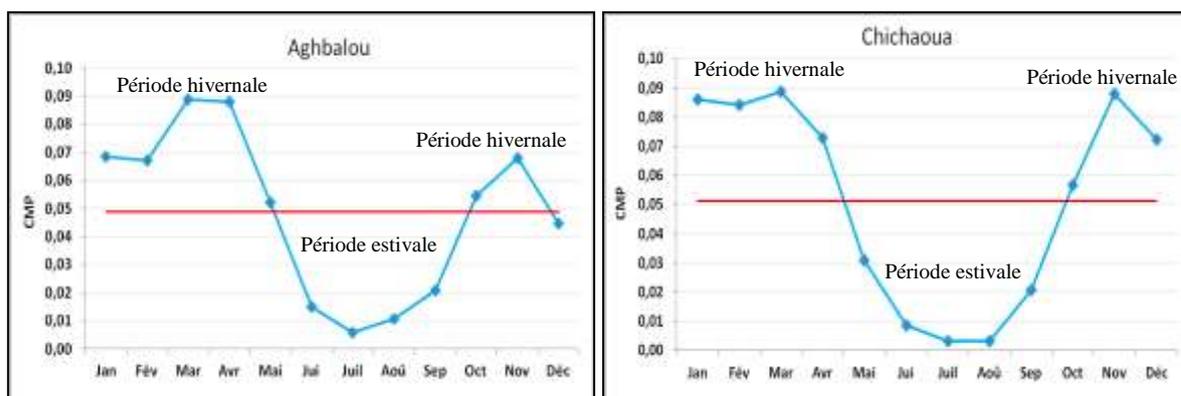


Figure 37 : les précipitations moyennes mensuelles aux stations Aghbalou, Chichaoua et Adamna (1972-2015).

On conclut, à partir de l'interprétation des précipitations moyennes mensuelles des stations d'Aghbalou et Chichaoua durant la série (1972-2015) et d'Adamna durant la série (1978-2014), que ces stations montrent deux périodes remarquables :

- ❖ Période Octobre-Mai : C'est la période dans les trois stations où la pluviométrie locale est la plus forte : 82 mm en moyenne mensuelle pour le mois Décembre (Aghbalou), 59 mm pour le mois Janvier (Adamna) et 26 mm pour le mois Mars et Novembre (Adamna), c'est presque toujours les mois les plus pluvieux.
- ❖ Période Juin-Septembre : Les précipitations y sont beaucoup plus faibles que lors de l'autre période (varient entre 19 mm et 5 mm à la station d'Aghbalou et ne dépassent pas 9 mm à Chichaoua et Adamna), comme elles peuvent être nulles (0 mm, par exemple : Juillet et Aout). Au cours de cette période, les précipitations sont essentiellement dues à des phénomènes orageux locaux.

Cet aspect de la variabilité mensuelle, peut être abordé par la méthode du coefficient mensuel de précipitation (CMP). Le coefficient mensuel de précipitation nous permet de faire un découpage, pour déterminer la période hivernale et estivale. Il est le rapport des valeurs mensuelles sur la moyenne de la chronique.



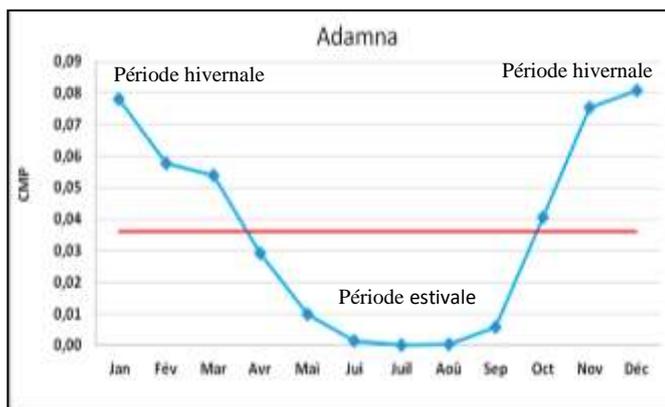


Figure 38 : Coefficient mensuel de précipitations aux stations Aghbalou, Chichaoua et Adamna (1972-2015).

L'analyse de la figure ci-dessus montre l'existence de deux périodes, par rapport à la valeur de référence de chaque station :

i. Station d'Aghbalou (valeur de référence 0.05) :

- ✓ La période hivernale : elle est la plus arrosée et démarre en Octobre jusqu'au mois de Mai (pour le mois Décembre, elle tombe sous forme de neige >1070m d'altitude).
- ✓ La période des faibles précipitations qui se situe pendant la période estivale, elle commence en Juin, jusqu'au mois de Septembre.

ii. Station de Chichaoua (valeur de référence 0.05) :

- ✓ La période hivernale : elle commence en Septembre, jusqu'au mois d'Avril.
- ✓ La période estivale : elle commence en Mai, jusqu'au mois de Septembre.

iii. Station d'Adamna (valeur de référence 0.035) :

- ✓ La période hivernale : elle démarre en Octobre, jusqu'au mois de Mars.
- ✓ La période estivale : elle commence en Avril, jusqu'au mois de Septembre.

2.2.2. La pluviométrie à l'échelle mensuelle dans le bassin versant de Souss-Massa :

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles durant les 48 années, ressort que la pluviométrie moyenne au niveau de la station d'Agadir, se caractérise par un maximum (47 mm) pluviométrique en Décembre et un minimum (0,1 mm) enregistré en Juillet. Ainsi, on constate que les précipitations moyennes mensuelles sont marquées par une hétérogénéité et une grande variabilité, du point de vue de leur répartition. Et d'après l'analyse des précipitations moyennes mensuelles au niveau de la station de Taroudant, on trouve que la pluviométrie moyenne se caractérise par un maximum (36 mm) pluviométrique en Décembre et un minimum (0.3 mm) enregistré en Juillet. Ainsi, on constate que les précipitations moyennes mensuelles sont marquées par une hétérogénéité et une grande variabilité du point de vue de leur répartition. Dans la station d'Aoulouz, on trouve que la pluviométrie moyenne se caractérise par un maximum (54 mm) pluviométrique en Novembre et un minimum (1.2 mm) enregistré en juillet.

On conclut que, l'interprétation de la représentation graphique des précipitations moyennes mensuelles des trois stations durant la série (1968-2015), montre une forte variation pluviométrique mensuelle. Donc, on peut déterminer deux classes : la première a connu une pluviométrie plus forte qui s'étend d'Octobre jusqu'à Avril où les précipitations dépassent 16 mm/mois en moyenne, et la deuxième a connu une faible pluviométrie et s'étende de Mai jusqu'à Septembre, avec une moyenne inférieure à 16 mm/mois.

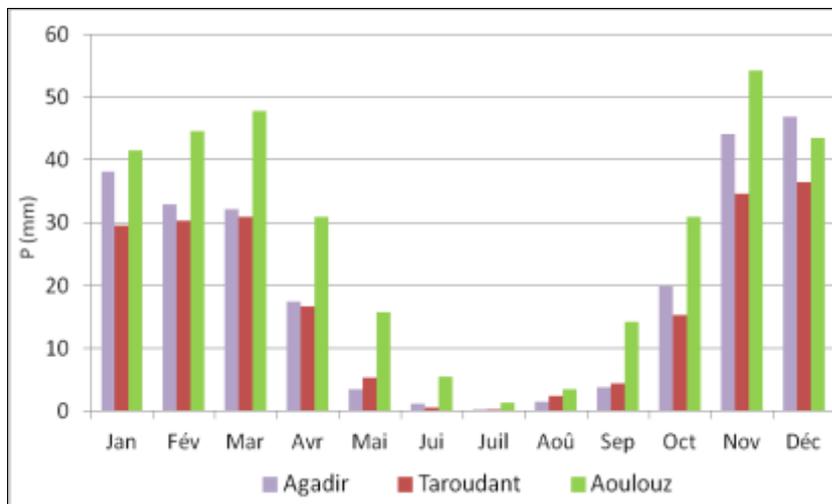


Figure 39 : les précipitations moyennes mensuelles aux stations Agadir, Taroudant et Aoulouz (1968-2015).

L'analyse de la figure ci-dessous, du coefficient mensuel de précipitation (CMP) des trois stations, montre l'existence de deux périodes, par rapport à la valeur de référence de chaque station :

i. Station d'Agadir (valeur de référence 0.083) :

- ✓ La période hivernale : elle est la plus arrosée et commence en Novembre, jusqu'au mois de Mars.
- ✓ La période des faibles précipitations qui se situe pendant la période estivale, elle commence en Avril, jusqu'au mois de Septembre.

ii. Station de Taroudant (valeur de référence 0.084) :

- ✓ La période hivernale : elle démarre en Novembre, jusqu'au mois de Mars.
- ✓ La période estivale : elle commence en Avril, jusqu'au mois d'Octobre.

iii. Station d'Aoulouz (valeur de référence 0.082) :

- ✓ La période hivernale : elle démarre en Octobre jusqu'au mois d'Avril.
- ✓ La période estivale : elle commence en Mai jusqu'au mois de Septembre.

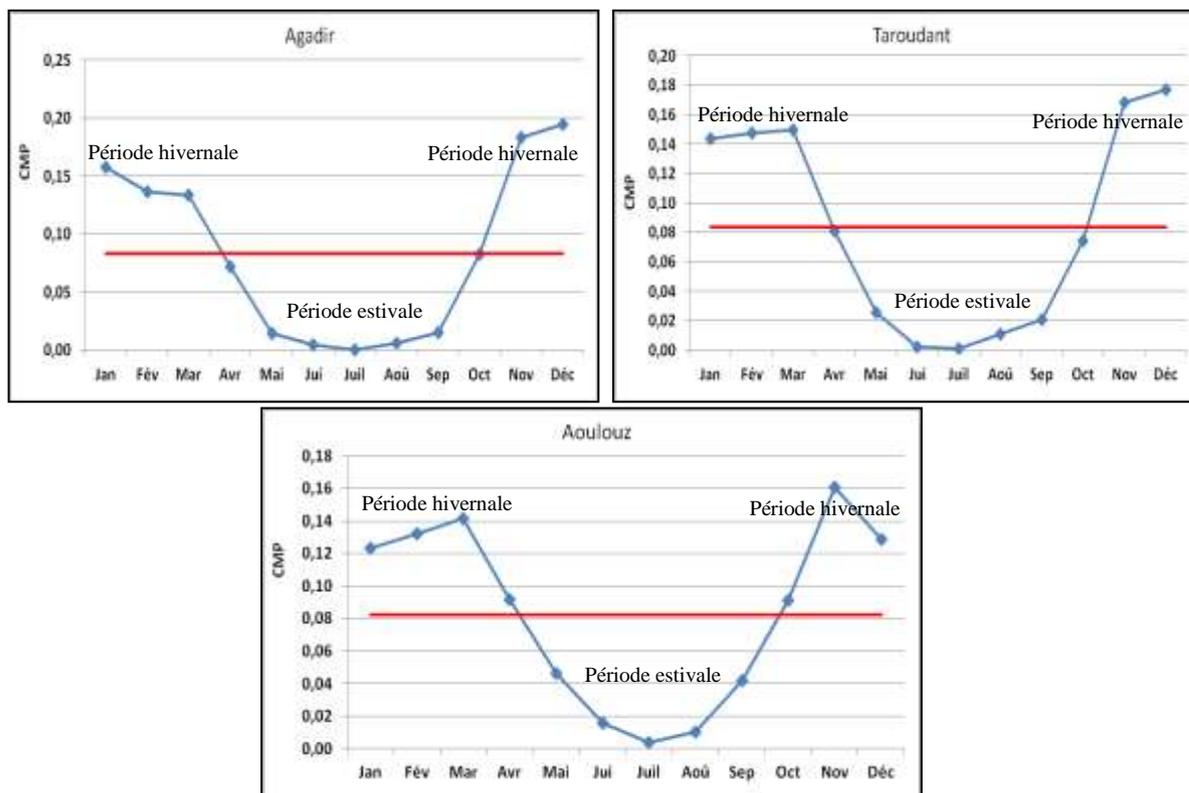


Figure 40 : Coefficient mensuel des précipitations aux stations : Agadir, Taroudant et Aoulouz (1968-2015).

2.3. Analyse pluviométrique à l'échelle saisonnière dans les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa :

2.3.1. La pluviométrie à l'échelle saisonnière dans le bassin versant de Tensift :

Restons toujours dans l'analyse pluviométrique en changeant l'échelle temporelle, cette fois au niveau saisonnier. Les résultats obtenus semblent donc bien suivre la même tendance climatique observée au niveau mensuel : une forte variation saisonnière, avec un Hiver pluvieux dans les trois stations, l'Automne et le printemps restent légèrement moins arrosés (fig.41).

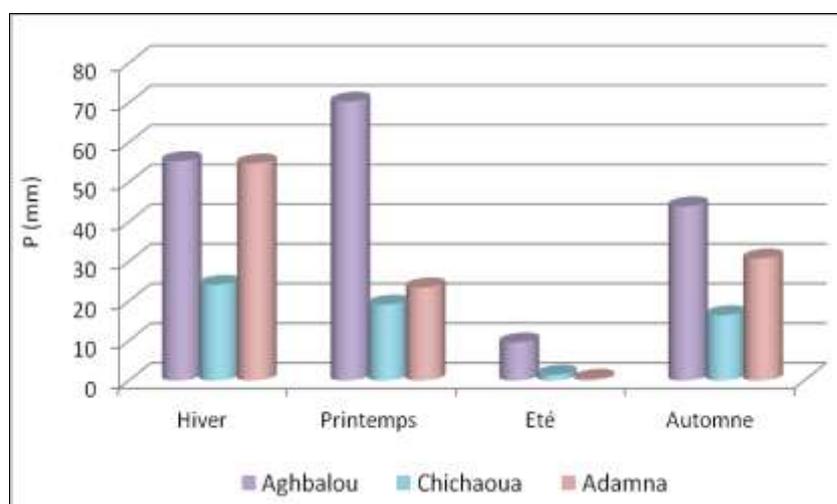


Figure 41 : les précipitations moyennes saisonnières aux stations : Aghbalou, Chichaoua et Adamna (1972-2015).

Les variations saisonnières des précipitations dans le bassin versant du Tensift sont résumées sur le tableau suivant :

Tableau 15 : Pluies saisonnières et leurs contributions dans les pluies moyennes annuelles aux stations de Chichaoua, d'Aghbalou et d'Adamna (1972-2015).

Stations	Contribution (%)	Hiver	Printemps	Été	Automne
Chichaoua	Précipitations moyennes saisonnières (mm)	24	19	1	16
	Contribution (%)	39,34	31,14	1,63	26,22
Aghbalou	Précipitations moyennes saisonnières (mm)	55	70	10	44
	Contribution (%)	30,72	39,10	5,58	24,58
Adamna	Précipitations moyennes saisonnières (mm)	55	23	0	31
	Contribution (%)	50,46	21,10	0	28,44

Le tableau ci-dessus montre que, la saison hivernale est la saison qui reçoit le maximum de précipitations, pour la station de Chichaoua (39%), et Adamna (50%), tandis que, la saison du Printemps est la saison qui reçoit le maximum de précipitations pour la station d'Aghbalou (39%). Alors que l'Été reste la saison la plus sèche, avec une contribution variant entre 5 à 0% des pluies totales.

2.3.2. La pluviométrie à l'échelle saisonnière dans le bassin versant de Souss-Massa :

La totalité des stations pluviométriques du bassin versant de Souss-Massa ont reçu le maximum de hauteur des pluies en Hiver.

L'analyse des variations des précipitations de chaque saison, au cours de ces derniers 48 ans, montre une forte variation saisonnière avec un Hiver pluvieux dans les trois stations, l'Automne et le printemps restent légèrement moins arrosés (fig.42).

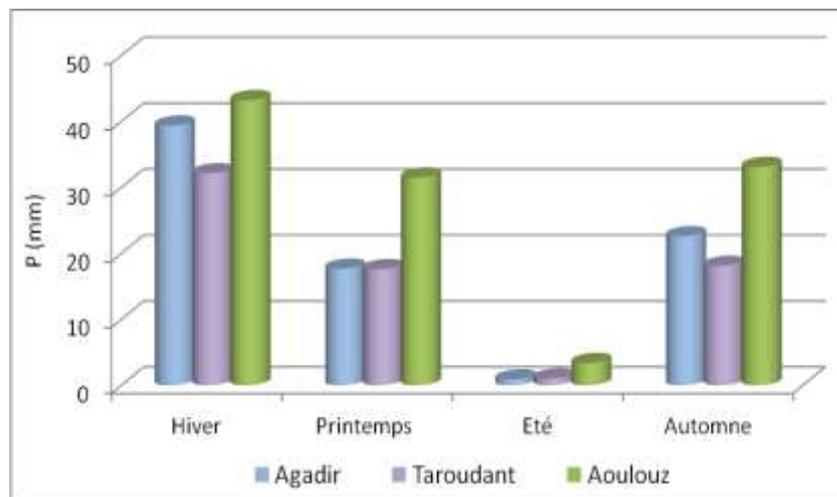


Figure 42 : les précipitations moyennes saisonnières aux stations : Agadir, Taroudant et Aoulouz (1968-2015).

La variation saisonnière des précipitations dans le bassin versant de Souss-Massa est résumée sur le tableau suivant :

Tableau 16 : Pluies saisonnières et leurs contributions dans les pluies moyennes annuelles aux stations d'Agadir, Taroudant et d'Aoulouz (1968-2015).

Stations	Contribution (%)	Hiver	Printemps	Été	Automne
Agadir	Précipitations moyennes saisonnières (mm)	39	18	01	23
	Contribution (%)	49	22	01	28
Taroudant	Précipitations moyennes saisonnières (mm)	32	18	01	18
	Contribution (%)	47	26	01	26
Aoulouz	Précipitations moyennes saisonnières (mm)	43	31	03	33
	Contribution (%)	39	28	03	30

On constate que, la saison hivernale est la saison qui reçoit le maximum de précipitations pour les trois stations : Agadir (49%), Taroudant (47%) et Aoulouz (39%), suivi par la saison d'automne, alors que l'Été reste la saison la plus sèche avec une contribution inférieure à 3% des pluies totales durant la série 1986-2015.

Axe 2 : Les caractéristiques thermiques des bassins de Tensift et de Souss-Massa :

L'étude climatique d'un bassin versant, devrait comporter l'analyse de son bilan thermique, dans lequel interviendrait, non seulement les calories apportées par le rayonnement solaire, mais aussi, les échanges de chaleur entre le sol, l'atmosphère et les nappes d'eau.

Afin de déterminer le régime des températures de la zone d'étude, nous avons mené une analyse à l'échelle annuelle et à l'échelle mensuelle, pour les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa. Le but, d'une part, est d'identifier les tendances thermiques générales des deux bassins, et d'autre part, pour repérer les variations du régime dans le temps. Les études portant sur la caractérisation des climats sont nécessaires, pour évaluer les contraintes liées aux différents types de climat, au regard des disponibilités en eau et leurs conséquences.

I. La variabilité de la température dans le bassin versant de Tensift :

Afin de déterminer les caractéristiques et les tendances thermiques dans le bassin versant de Tensift, nous allons analyser les variabilités des températures, d'après les données des stations météorologiques d'Oukaimidene (1990-2009), de Marrakech (1961-2010) et de Takerkoust (1983-2010), que nous avons choisi, comme stations de référence à l'échelle annuelle et mensuelle.

1. La température à l'échelle annuelle dans le bassin versant de Tensift :

À l'échelle annuelle, les températures moyennes annuelles enregistrées au niveau des trois stations étudiées ne dépassent pas généralement 22°C. A l'échelle interannuelle, la variation des températures moyennes est faible ne dépassent pas 4°C, au niveau des trois stations au cours de la période étudiée. En plus, l'évolution des températures moyennes annuelles tend généralement vers la hausse. On peut observer aussi des pics considérables pour les trois stations (9.7°C en 2001 pour la station d'Okaimidane, 21.1°C en 2001, pour la station de Marrakech et 20.8 °C en 2002 pour la station de Takerkoust). On peut considérer ces deux années (2001 et 2002) comme, années chaudes de la chronique étudiée dans le bassin de Tensift.

Les figures ci-dessous, présentent les températures moyennes annuelles enregistrées au niveau des stations d'Oukaimidene (1990-2009), Marrakech (1961-2010) et Takerkoust (1983-2010) :

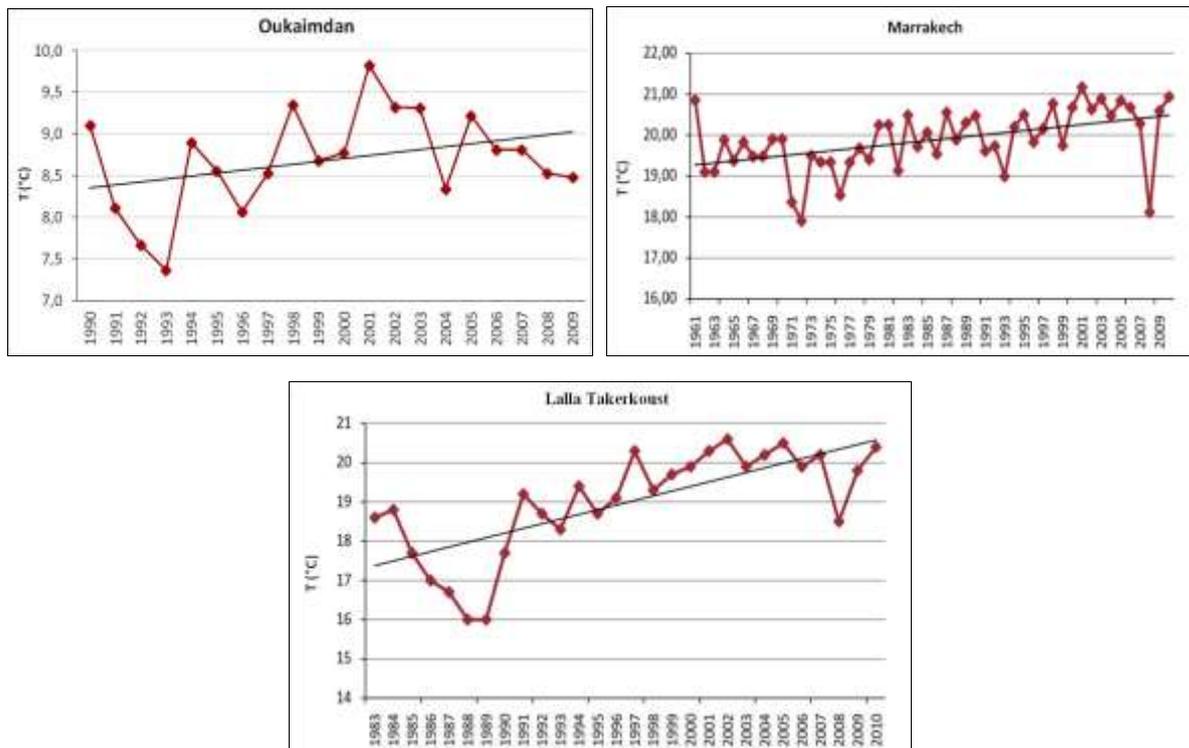


Figure 43 : Évolution de la température moyenne annuelle des stations d'Oukaimidene (1990-2009), Marrakech (1961-2010) et de Takerkoust (1983-2010).

On peut conclure que, l'analyse des températures enregistrées aux différentes stations climatiques du bassin de Tensift (figures au-dessus), illustre une augmentation significative, du point de vue thermique, où des records absolus de températures ont été battus ces dernières décennies.

2. La température à l'échelle mensuelle dans le bassin versant de Tensift :

À l'échelle mensuelle, la température dans le domaine d'étude, varie d'un mois à l'autre. Les trois stations (Oukaimidene, Marrakech et Takerkoust), en général, se caractérisent par des hautes températures aux mois d'Été, des basses températures aux mois Hiver avec des températures extrêmes moyennes, de l'ordre de 30 °C en Juillet et de 01 à 10 °C en Janvier pour les trois stations.

La représentation graphique des températures (Fig.44) montre que, les mois de Décembre, Janvier et Février sont le plus froid avec une moyenne minimum (2°C à la station d'Oukaimidene et 12°C aux stations Marrakech et Takerkoust) au mois de Janvier. Les mois de Juin, Juillet, août et Septembre forment la saison chaude. On remarque également que, la température monte régulièrement depuis le mois le plus froid (Janvier) jusqu'au mois le plus chaud (Août) au niveau des trois stations.

Les figures suivantes représentent les températures moyennes mensuelles enregistrées au niveau des stations d'Oukaimidene (1990-2009), Marrakech (1961-2010) et Takerkoust (1983-2010) :

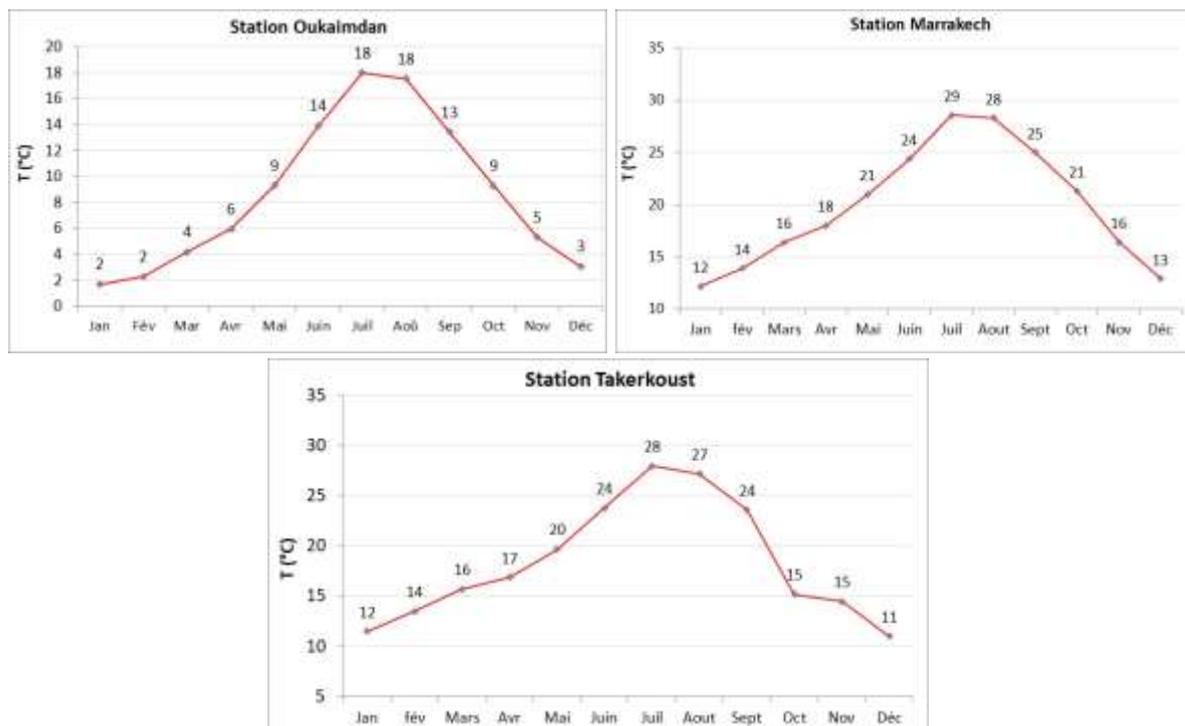


Figure 44 : Évolution des températures moyenne mensuelle de la station d'Okaimidene (1990-2009), Marrakech (1961-2010) et de Takerkoust (1983-2010).

II. La variabilité de la température dans le bassin versant de Souss-Massa :

L'objectif est d'identifier les tendances thermiques dans le bassin versant de Souss-Massa. Nous allons analyser les variabilités des températures, d'après les données des stations météorologiques d'Aoulouz (1981-2018), Taroudant (1981-2018) et d'Agadir (1981-2018) que nous avons choisi comme stations de référence à l'échelle annuelle et mensuelle.

1. La température à l'échelle annuelle dans le bassin versant de Souss-Massa :

À l'échelle annuelle, l'analyse de la courbe des variations moyennes annuelles de la température au niveau des stations étudiées, montre que ces températures sont caractérisées par une variabilité interannuelle, qui confirme l'irrégularité de ce paramètre. En effet, la température dans le bassin de Souss-Massa se caractérise par une variabilité temporelle faible ne dépassant pas 3 °C, avec une tendance générale vers la hausse, pour toutes les stations pendant la période étudiée. On peut observer aussi, des pics considérables pour les trois stations (18.6 °C en 2017 pour la station d'Aoulouz ; 20.7 °C en 2017, pour la station de Taroudant et 20.8 °C en 1995 pour la station d'Agadir). On peut considérer ces deux années (1995 et 2017) comme années chaudes de la chronique étudiée dans le bassin de Tensift.

- À la station d'Aoulouz, dans le bassin amont du Souss-Massa, les températures moyennes annuelles sont très peu variables, elles fluctuent entre 16 et 18,6 °C.
- À la station de Taroudant, dans le centre du bassin de Souss-Massa, les températures moyennes annuelles sont aussi très peu variables, elles fluctuent entre 18 et 20,7°C.

L'évolution des températures moyennes annuelles tend généralement vers la hausse. On peut observer des pics considérables, pour la station de Taroudant (20.7 °C en 2017 et 20.5°C en 2001), et on peut considérer ces deux années, comme années chaudes de la chronique étudiée dans cette station.

- À la station d'Agadir, dans le bassin aval du Souss-Massa, les variations des températures moyennes annuelles sont très faibles, elles fluctuent entre 19.2 et 20,8°C. La station d'Agadir, qui jouit d'un climat doux, de littoral, se démarque des deux autres stations concernant les températures d'Été, qui sont largement plus fraîches à Agadir : de juillet à septembre, la moyenne n'est que de 22,5°. En revanche, les températures de novembre à février sont légèrement plus élevées à Agadir.

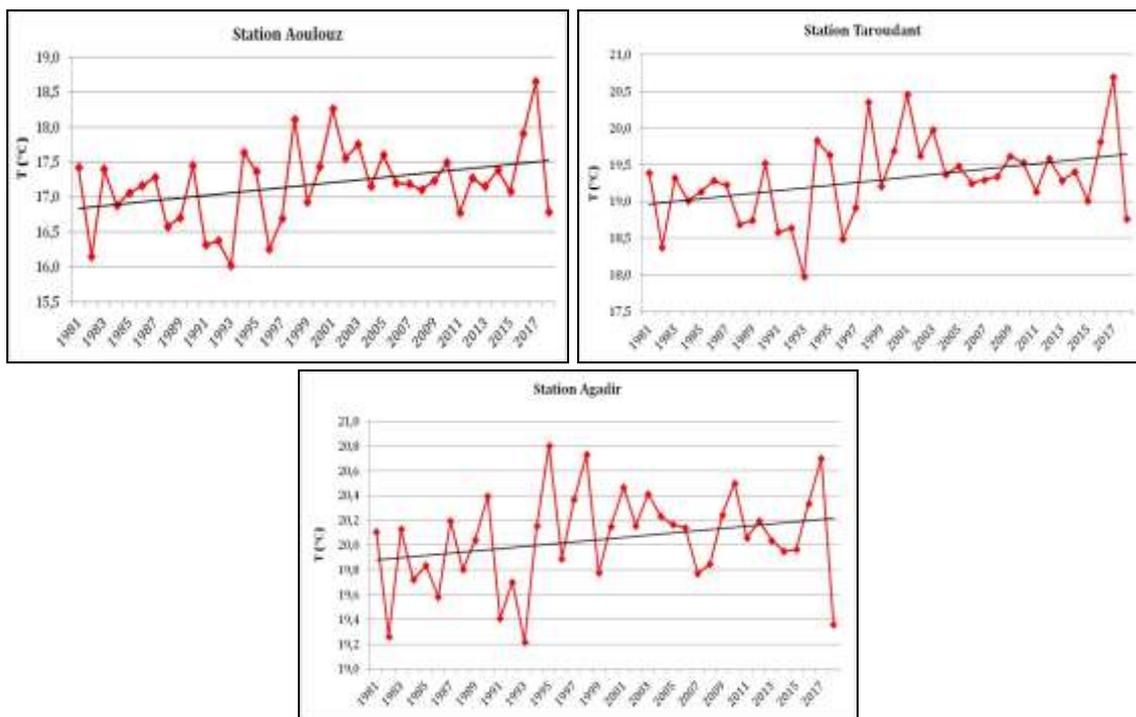
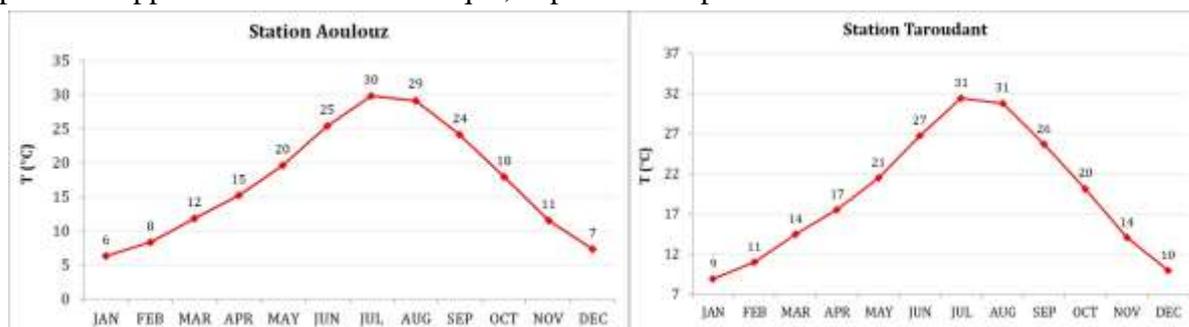


Figure 45 : Évolution de la température moyenne annuelle des stations d'Aoulouz (1981-2018), Taroudant (1981-2018) et d'Agadir (1981-2018).

2. La température à l'échelle mensuelle dans le bassin versant de Souss-Massa :

À l'échelle mensuelle, à la station d'Aoulouz, ce sont les mois de juillet et d'août qui connaissent les plus hautes températures de l'année : respectivement 30 et 29 °C en moyenne, alors que Janvier et Décembre sont les mois les plus frais, avec des moyennes respectives de 6 et 7 °C (fig.46). Les amplitudes thermiques sont ici assez élevées, et on verra plus loin que plus on s'approche de la côte atlantique, et plus ces amplitudes tendent à s'atténuer.



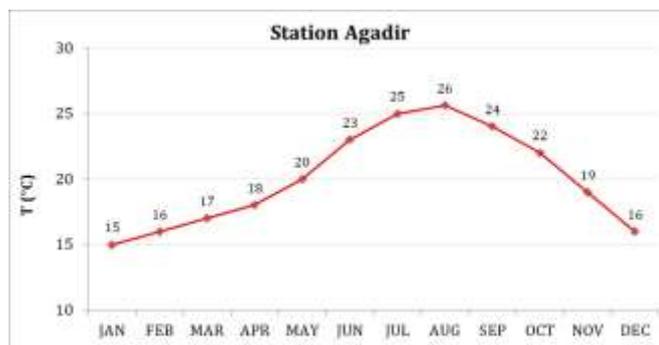


Figure 46 : Évolution de la température moyenne mensuelle des stations d'Aoulouz (1981-2018), Taroudant (1981-2018) et d'Agadir (1981-2018).

À l'échelle mensuelle, à la station de Taroudant ces températures sont très variables, elles fluctuent entre 9 et 31 °C. En effet, les mois d'Août et de Juillet connaissent les plus hautes températures de l'année 31 °C en moyenne, alors que janvier et décembre sont les mois les plus frais, avec des moyennes respectives de 9 et 10 °C. Les amplitudes thermiques sont ici assez élevées, et on verra plus loin que, plus on s'approche de la côte atlantique, et plus ces amplitudes tendent à s'atténuer.

À Agadir -au bord de la mer, les températures ont généralement des moyennes moins élevées qu'à Taroudant ou Aoulouz, surtout en Été. En revanche, les mois de Novembre, Décembre et Janvier sont plutôt légèrement moins frais à Agadir. Les températures minimales et les minima extrêmes y sont, cependant, plus élevés toute l'année de 2 à 3°C en moyenne. Grâce aux influences océaniques donc, les amplitudes diurnes sont relativement faibles. Comme à Aoulouz et à Taroudant, mais d'une façon beaucoup moins accusée, on peut aussi distinguer ici, une saison chaude continue de mai au mois d'octobre, qui fait suite à un semestre plus frais, de Novembre à Avril.

Un essai comparatif des températures mensuelles à Agadir, Taroudant et à Aoulouz montre une certaine concordance entre les températures à Aoulouz et à Taroudant. Là, nous trouvons en moyenne, 3 mois très chauds : Juin, Juillet, et Août, avec une moyenne nettement supérieure à 25°C, et une moyenne des maxima supérieurs à 30°C ; 5 mois relativement chauds : de Mars à Mai, et Septembre-Octobre, avec une moyenne de 20° C, et des maxima supérieurs à 22°C ; et enfin, 4 mois doux : de Novembre à Février avec 14°C de moyenne.

Axe 3 : Contribution à l'étude du bilan hydrique des bassins de Tensift et de Souss-Massa

Les études portant sur la variabilité et les changements climatiques ont intéressé la communauté mondiale, suite à plusieurs manifestations climatiques de grande ampleur. Parmi celles-ci, on note la sécheresse qui a touché les deux bandes tropicales de notre planète (Ircoulon, 1976).

La caractérisation de la variabilité climatique à l'aide des méthodes statistiques et l'évaluation de son impact, constituent les objectifs majeurs de cette étude.

Sur une période donnée, la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, constitue une appréciation du degré d'aridité du climat. Le changement climatique

se traduisant par une hausse de l'évapotranspiration (liée principalement à l'accroissement de la température) et, jusqu'à présent, une relative constance des précipitations.

L'évapotranspiration est le processus quantitativement le plus important, lorsque l'on considère la transformation de la pluie en débit à l'exutoire d'un bassin versant. Théoriquement, sur les surfaces continentales, les deux tiers de l'eau de pluie tombant sur les bassins versants rejoignent l'atmosphère par évaporation et transpiration (Oudin, 2004).

I. Bilan hydrique : Estimation de l'évapotranspiration (ETP et ETR) :

La disponibilité en eau superficielle et/ou souterraine est relativement liée, au fonctionnement du bilan hydrologique. La connaissance de ce dernier, s'appuie sur l'analyse de toutes ses composantes : précipitation, température, évapotranspiration (potentielle et réelle), ruissellement, infiltration, ainsi que le régime d'écoulement (Brochet et al, 1974).

Le bilan hydrique est l'élément le plus important, dans les études hydrologiques et hydrogéologiques, et il est basé notamment, sur les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (Oudin, 2004).

L'établissement de ce bilan d'eau est fonction de plusieurs facteurs climatiques, dont la pluviométrie et la température sont indispensables.

Le bilan hydrique a été donc établi aux stations du bassin versant de Tensift et de Souss-Massa entre les années 1981-2015, dates dont les mesures de la température sont disponibles.

II. Évapotranspiration : Aperçu globale :

L'évapotranspiration est définie aisément, comme la quantité d'eau sujette à la perte par évaporation, sous l'influence de nombreux facteurs climatiques, parmi eux, on cite : température de l'air, durée d'insolation, humidité du sol, vitesse du vent,... Ce qui se traduit par un dégagement d'eau dans l'atmosphère, sous forme de vapeur. Elle englobe deux processus ; l'évaporation direct à partir des surfaces libres d'eau (processus physique) et l'évaporation indirect "transpiration" par l'intermédiaire des plantes (processus physiologique). Ces évaporations jouent un rôle capital, dans les calculs des régimes du bilan hydrique (Luck, 2015).

Il faut distinguer l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'ETP, que beaucoup d'auteurs appellent EP pour des commodités d'écriture, est la lame liquide évaporée et transpirée, lorsque la fourniture d'eau au substratum terrestre est illimitée. Par exemple, sur un océan, un lac, une rivière ou une prairie inondée, $ETR = ETP$. Mais pendant l'Été, si le sol est partiellement sec et s'il ne pleut pas, les plantes ne peuvent transpirer que la quantité d'eau dont elles disposent, c'est-à-dire, une quantité inférieure à ETP. Cette réduction forcée de l'évaporation est évidemment préjudiciable au développement des plantes (Weingartner, 2003).

Il existe plusieurs méthodes permettant d'estimer les paramètres du bilan hydrologique. On peut citer, entre autres : la méthode de Turc (1931), de Thornthwaite (1948) et de Penman (1948). Chacune de ces méthodes a ses avantages et ses limites. Pour la détermination des paramètres du bilan hydrique, nous avons opté pour la méthode de Thornthwaite. Le choix de cette méthode s'explique par le manque de données climatiques supplémentaires, qui

pourraient permettre l'utilisation des méthodes plus précises. La fiabilité de la méthode de Thornthwaite dans notre étude, se résume à la superficie de la zone d'investigation et au calcul du bilan hydrologique qui est mieux exprimé par celle-ci (Brochet et al, 1974).

Pour la détermination du bilan hydrique, nous avons choisi la méthode de Thornthwaite, compte tenu des données disponibles. Les principaux paramètres recherchés sont l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

L'application de la méthode de Thornthwaite (1948), dans l'estimation des bilans mensuel et annuel, nous a permis de ressortir les principales composantes du bilan, à savoir ; l'évapotranspiration potentielle et réelle, l'infiltration et le ruissellement. Cette méthode tient compte des précipitations et de la température moyenne mensuelle. Elle donne de meilleurs résultats (proche de la réalité), dans les régions humides à climat tempéré.

La méthode de Thornthwaite a été appliquée dans notre zone d'étude, à l'échelle mensuelle et aussi annuelle, en se basant sur les mesures des précipitations et des températures enregistrées aux stations météorologiques de Marrakech, Takerkoust, dans le bassin versant de Tensift et d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir, dans le bassin versant de Souss-Massa durant la période 1981-2015.

1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration n'est pas, comme la pluie, une variable directement mesurable à l'échelle du bassin versant. On a donc eu recours à une variable estimée, l'ETP, pour représenter la capacité évaporatoire de l'atmosphère. Aussi, le concept d'ETP est généralisé et a été développé pour des applications agronomiques, son utilisation à l'échelle du bassin versant est par conséquent non démontrée.

Ce type d'évapotranspiration est estimé, à l'aide de la formule simplifiée de Thornthwaite (1948), qui tient compte de la température moyenne de l'air et de la position géographique de la station de mesure.

La formule proposée par Thornthwaite est applicable pour une température moyenne mensuelle de l'air inférieure à 26,5 °C. Dans le cas où la température moyenne de l'air dépasse ou égale 26,5 °C, les valeurs de l'évapotranspiration potentielle non corrigée seront tirées directement à partir d'une table de correspondance.

La formule de Thornthwaite, ne dépendant que de la variable climatique de la température, sera utilisée ici. De cette manière, des valeurs moyennes inter-mensuelles d'ETP, à ne pas confondre avec une valeur d'ETP d'un mois donné, sont calculées comme suit :

$$ETP (mm/mois) = 16 * \left(\frac{10 * t_i^{\circ}}{I} \right)^a * F$$

t_i° : Moyenne interannuelle des températures du mois en degrés Celsius. Si cette moyenne est nulle ou négative, l'ETP est nulle ;

$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 * t_i^{\circ})^{1,514}$: Indice thermique annuel, somme des 12 indices thermiques mensuels ;

$a = 0,016 * I + 0,5$: Fonction de l'indice thermique annuel I ;

F : Facteur correctif qui correspond à la durée du mois et du jour. Il dépend du mois « m » et de la latitude ϕ du lieu.

2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle (ETR) est souvent estimée, à partir de la comparaison des valeurs de l'ETP déjà obtenues par la formule de Thornthwaite, avec celles des précipitations mesurées dans les cinq stations météorologiques. On distingue deux cas :

- Dans le cas où la précipitation est supérieure à l'évapotranspiration potentielle ($P > ETP$), l'évapotranspiration réelle sera égale à l'évapotranspiration potentielle ($ETR = ETP$), et la tranche d'eau restante entre la lame d'eau précipitée et l'ETP, représente un excédent qui est stockée dans le sol en premier lieu, jusqu'à la saturation de la RFU (100 mm au maximum) et puis, à l'écoulement superficiel et l'alimentation de la nappe profonde (Mebarki, 2005).
- Dans le cas où la précipitation est inférieure à l'évapotranspiration potentielle ($P < ETP$), l'évapotranspiration réelle sera égale à toute la quantité d'eau précipitée, plus toute ou une partie de la réserve facilement utilisable, jusqu'à la vider totalement. Lorsque la RFU est entièrement épuisée, le déficit agricole représente la différence entre l'évapotranspiration potentielle et réelle ($ETP - ETR$), cette tranche d'eau qu'il faudrait apporter aux végétations, pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse (Mebarki, 2005).

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence, l'évolution de la demande atmosphérique en eau donnée par la différence entre les apports pluvieux et les pertes partielles par évaporation. Cet indicateur a surtout été appliqué, à des régions ayant une saison sèche et une saison des pluies (Vissin, 2007). Dans le cas de cette étude, nous avons utilisé une nouvelle chronique (1981-2018), en raison de la disponibilité des données thermométriques et pluviométriques de la même station.

III. Interprétation des résultats du bilan hydrique :

Le bilan hydrique a été établi aux stations de Marrakech et Takerkoust dans le bassin versant de Tensift, et les stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir au bassin versant de Souss-Massa sur la période 1981-2018, dates dont les mesures de la précipitation et la température sont disponibles. Pour mieux apprécier l'impact de la variabilité climatique, nous avons établi les bilans hydriques annuels, avant et après la rupture, dans les séries pluviométriques étudiées.

Pour évaluer l'impact du changement climatique sur la zone d'étude, nous avons calculé les paramètres du bilan hydrologique annuel et mensuel, avant et après la rupture de 1996-1997. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous. L'analyse de ce tableau, montre que l'ETP moyenne annuelle, qui était estimée à 1 008mm à la station de Marrakech et 934 mm à la station de Takerkoust, avant la rupture dans le bassin de Tensift, est passée à 1 030 mm après la rupture à la station de Marrakech et 960 mm à la station de Takerkoust. Dans le bassin versant de Souss-Massa, l'ETP estimée à 912, 991, 911mm avant la rupture aux stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir, respectivement, est passée à 940 mm à la station d'Aoulouz, 1018 mm à la station de Taroudant et 921 mm à la station d'Agadir, après la

rupture. Alors que, l'ETR moyenne annuelle, qui était de 222 mm à la station de Marrakech, avant la rupture, est réduite à 202 mm, après la rupture, et de 303 mm, 186 mm et 237 mm aux stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir respectivement, avant la rupture, à été réduite à 302 mm et 229mm pour les stations d'Aoulouz et d'Agadir, et à 213 mm pour la station de Taroudant, après la rupture.

Tableau 17 : Estimation des moyennes annuelles du bilan hydrique dans les deux bassins versants étudiés (1981-2018).

Bassin versant	Station	ETP (mm)		ETR (mm)	
		1981-1996 (avant rupture)	1997-2018 (après rupture)	1981-1996 (avant rupture)	1997-2018 (après rupture)
Tensift	Marrakech	1008	1030	222	202
	Takerkoust	934	960	-	-
Souss-Massa	Aoulouz	912	940	303	302
	Taroudant	991	1018	186	213
	Agadir	911	921	237	229

Par ailleurs, les valeurs moyennes mensuelles du bilan hydrique pour une saison ou pour l'année entière, sur la période 1981-2018, sont calculées par la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP estimée selon la méthode de Thornthwaite).

Les bilans hydriques des stations ont été étudiés au pas de temps annuel et mensuel. En effet, pour déterminer les années ou les mois secs et humides, les pluies mensuelles ou annuelles ont été comparées avec l'Évapotranspiration Potentielle (ETP) mensuelle ou annuel selon le cas :

- Si $P < ETP$, le mois ou l'année est sec.
- Si $P > ETP$, le mois ou l'année est humide.

L'évapotranspiration potentielle a été estimée par la méthode de THORNTHWAITE, à partir des données des températures des stations de Marrakech, Takerkoust dans le bassin versant de Tensift et des stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir pour le bassin du Souss-Massa.

Les données pluviométriques des stations retenues des deux bassins versants ont été utilisées, car elles présentent les plus longues chroniques et peu de lacunes.

En termes de résultats, les tracés de l'évapotranspiration potentielle normale, pour les deux stations du bassin versant de Tensift et les trois stations de Souss-Massa, font ressortir des valeurs élevées de l'évapotranspiration de Mai à Octobre, en saison sèche. On observe aussi, des valeurs élevées en Avril pour la station d'Agadir, située à proximité de la côte atlantique.

Une analyse graphique de ces données de l'évapotranspiration, comparées aux moyennes pluviométriques mensuelles de nos 5 stations météorologiques sélectionnées, montre qu'en général, durant les mois de Janvier, Février et Décembre, l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle, puisque nous avons une pluviométrie supérieure à l'ETP (fig.47 et 48).

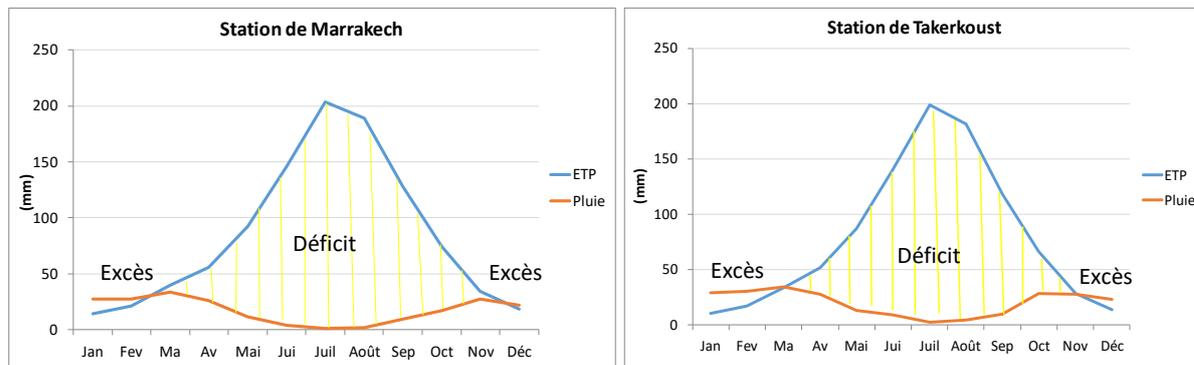


Figure 47 : bilan hydrique mensuel moyen du bassin versant de Tensift (1981-2018).

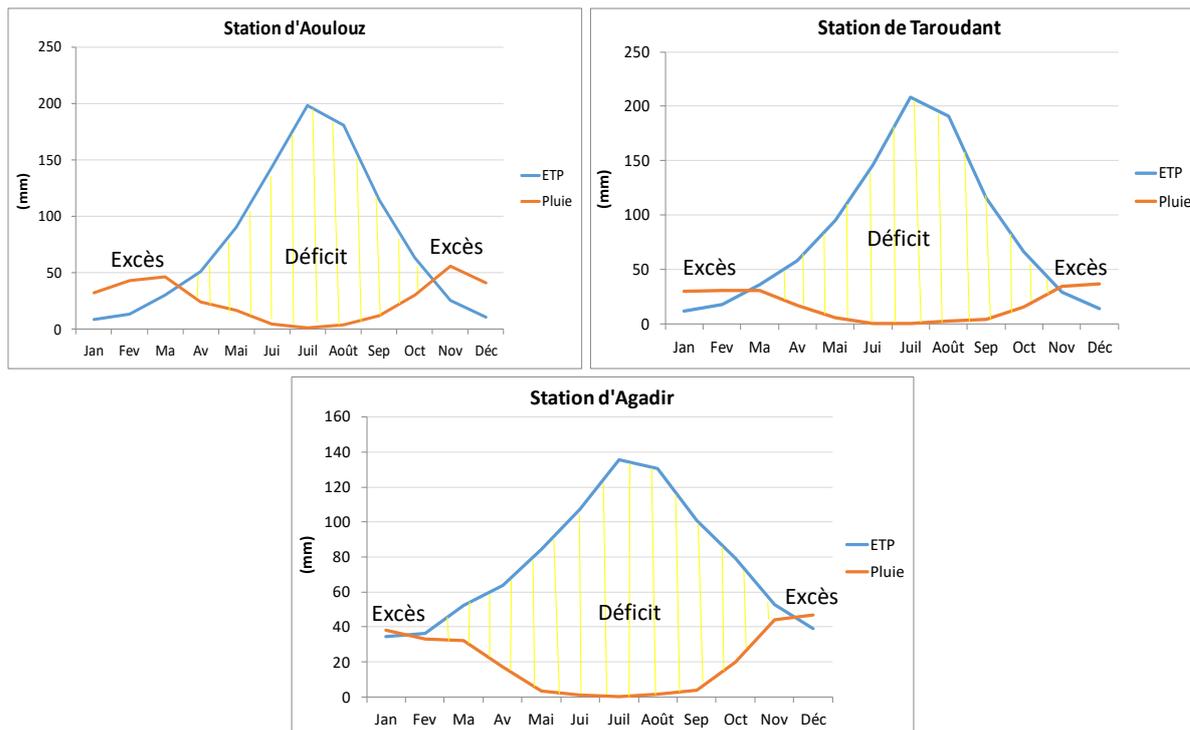


Figure 48 : bilan hydrique mensuel moyen du bassin versant de Souss-Massa (1981-2018).

Selon les résultats des bilans hydriques obtenus par l'application de la méthode de Thornthwaite, on déduit les points suivants :

- ✓ Dans la zone étudiée, l'évapotranspiration potentielle est relativement élevée. Elle est (en moyenne) de l'ordre de 200 mm, pour les stations du bassin versant de Tensift (Marrakech et Takerkoust) et de Souss-Massa (Aoulouz et Taroudant), et de l'ordre de 136 mm pour la station d'Agadir, avec un maximum marqué au mois de Juillet.
- ✓ La période déficitaire où l'évapotranspiration potentielle dépasse nettement la quantité d'eau précipitée, touche 7 mois de l'année, d'Avril à Octobre, avec un manque d'eau maximal observé en Juillet, de l'ordre de 200 mm dans toutes les stations étudiées et d'environ 136 mm à celle d'Agadir.
- ✓ Le bilan hydrique est parfaitement excédentaire dans environ 5 des 12 mois de l'année (de Novembre à Mars), aux stations de Takerkoust, d'Aoulouz et de Taroudant et de 4 mois (de Décembre à Mars) à la station de Marrakech et d'Agadir.

À la lumière de ces résultats, on peut dire que la tendance à la hausse des températures et de l'évapotranspiration, représente une significativité plus élevée. Cela porte à conclure que, les changements du bilan hydrique ont été plus fortement influencés par l'augmentation de la température et de l'évapotranspiration, que par la diminution de la pluviométrie.

CONCLUSION

En conclusion, cette étude climatique, portant sur les précipitations et les températures, revêt une grande importance car elle permet de caractériser le climat récent dans la zone d'étude, en mettant en évidence ses variations spatio-temporelles. Elle permet également de mettre en lumière les écarts significatifs qui peuvent survenir entre une année humide, marquée par un excès de précipitations, et une année sèche, caractérisée par un déficit de précipitations.

Les bassins versants du Tensift et de Souss-Massa présentent une variabilité et une irrégularité spatio-temporelle des températures et des précipitations. L'analyse de l'évolution des températures moyennes annuelles révèle une tendance à l'augmentation dans les deux bassins versants.

L'analyse de l'homogénéité des données pluviométriques est d'une grande importance pour cette étude, car elle permet de dresser un diagnostic climatique de la zone d'étude, en mettant en évidence les variations spatio-temporelles qui sont cruciales pour identifier les périodes humides et sèches.

Les précipitations moyennes mensuelles se révèlent encore plus irrégulières que les précipitations annuelles, avec une variabilité marquée. On peut distinguer deux périodes climatiques distinctes :

- ✍ La période d'Octobre à Avril, où les précipitations locales sont les plus abondantes, constituant généralement les mois les plus pluvieux et favorisant un stockage significatif des précipitations.
- ✍ La période de Juin à Septembre, où les précipitations sont nettement moins abondantes, principalement dues à des phénomènes orageux locaux.

L'augmentation observée des températures à l'échelle annuelle dans les deux bassins versants est un constat important, tandis qu'à l'échelle mensuelle, les températures varient d'un mois à l'autre. En général, les mois d'été sont caractérisés par des températures élevées, tandis que les mois d'hiver présentent des températures plus basses, avec des valeurs extrêmes moyennes d'environ 30°C en juillet et de 01 à 10°C en janvier.

La tendance à la baisse des précipitations, associée à la hausse des températures précédemment observée, met en évidence une diminution globale de l'humidité et l'installation régulière de conditions de sécheresse dans la région.

Le calcul du bilan hydrique par la méthode de « Thornthwaite » aux stations de Marrakech et Takerkoust (Tensift) et d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir (Souss-Massa) montre que l'évapotranspiration potentielle au niveau de ces stations est relativement élevée de mai à octobre. Au cours de la période étudiée, l'augmentation observée du déficit hydrique estival est due à une augmentation de l'évapotranspiration potentielle. Ce déficit hydrique climatique met en évidence la pression exercée sur la disponibilité de l'eau pour les cultures.

Les résultats de cette analyse seront complétés ultérieurement par le calcul des indices de sécheresse, permettant d'identifier et de caractériser les différentes sécheresses survenues dans la zone étudiée.

CHAPITRE N° 3 :

LES EXTRÊMES CLIMATIQUES DANS LES BASSINS DE TENSIFT ET DE SOUSS-MASSA : EXTRACTION ET ANALYSE DE LA SÉCHERESSE CLIMATIQUE ACTUELLE

INTRODUCTION

La sécheresse, parmi d'autres phénomènes étroitement liés aux changements climatiques, affecte de plus en plus de régions à travers le monde. C'est l'un des événements climatiques extrêmes qui ont marqué les populations à travers les générations, touchant aussi bien les zones arides que les zones humides normalement bien arrosées (Whilite, 1993 ; Dubreuil, 1997).

Le premier objectif de ce chapitre est de caractériser l'incidence de la sécheresse climatique dans le bassin versant de Tensift et de Souss-Massa en identifiant les différentes tendances climatiques dans la zone étudiée, en utilisant plusieurs indices. Le deuxième objectif consiste à étudier les effets des indices climatiques, tels que l'ONA, l'ENSO, le WeMOI, sur la modulation des conditions climatiques dans les zones étudiées.

Axe 1 : Caractérisation des occurrences de la sécheresse dans les bassins de Tensift et de Souss-Massa :

I. Généralités sur la sécheresse au Maroc :

La sécheresse est l'une des catastrophes naturelles qui a fait l'objet des études de plusieurs auteurs, à partir des données climatiques (Meko et al, 1995 ; El Jihad, 2003 ; Stour et al, 2008). La sécheresse ne doit pas être confondue avec l'aridité. La sécheresse se manifeste dans le temps, tandis que l'aridité est un phénomène spatial (elle est limitée aux régions à faible précipitation). La sécheresse est un phénomène naturel complexe et ne dispose pas d'une définition précise. Cependant, on peut dire que la sécheresse est un déficit de disponibilité en eau, par rapport à une situation considérée comme normale, pour une période donnée et une région déterminée (Beaudin et al, 2007). En effet, elle se manifeste uniquement, par certains indices et paramètres que plusieurs chercheurs ont essayé d'identifier. Ces indices permettent, d'identifier les différents types de sécheresse (météorologique, agricole et hydrologique), son intensité, sa durée, son étendue spatiale et sa probabilité de récurrence. La plupart de ces indices sont fondés sur deux concepts à savoir : l'année normale et le seuil qui indique la sécheresse.

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses et 1,3 milliards en sont mortes de causes directes ou indirectes. Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses, risquent d'augmenter dans les années à venir. L'augmentation de la population humaine, qui entraîne une pression accrue sur l'environnement, y contribue grandement. Dans plusieurs régions du globe, une pratique agricole non-adaptée aux conditions environnementales et climatologiques, combinée à la surexploitation des réserves hydriques, accélère le processus des sécheresses et entraîne parfois une situation irréversible, la désertification (UNCCD, 2004).

La sécheresse a toujours été présente dans l'histoire du Maroc, elle s'est imposée avec force ces dernières décennies, en tant qu'élément structurel du climat du pays. Le Maroc vit actuellement l'épisode sec le plus long de son histoire contemporaine, caractérisé par une diminution des précipitations et une tendance nette à la hausse des températures. Des études de dendrochronologie (Stockton, 1988) ont montré que le Maroc a souvent été marqué par des périodes de sécheresses intenses, qui reviennent de façon périodique, amenant des famines et des épidémies (Stour et al, 2008). La famine engendrée par la sécheresse de 1597-1608 a exterminé le tiers de la population (Safi, 1990). L'étude du Ministère de l'Équipement en 1997, a montré que le Maroc a connu onze sécheresses entre 1896 et 1996, dont l'intensité a été modérée à forte. Dans d'autres études, le Maroc est passé de cinq années de sécheresse sur 40 de 1940 à 1979, à 6 années sur 16 entre 1980 et 1995, puis à 4 années sur 7 entre 1996 et 2002 (Armand et al, 2013). En effet, les séries de sécheresses auxquelles ont été confrontées différentes régions du Maroc, depuis le début des années 1980 sont aussi repérées par Esper et al. (2007). La fin des années 1980 et le début des années 1990 sont connues par des conditions sèches, généralement sur une grande partie du bassin méditerranéen. En effet, les années 1981 à 1995 ont été particulièrement sèches au Sud de l'Europe et au Nord du Maroc (Kutiel et al, 1996). La récurrence des conditions sèches sur la zone méditerranéenne depuis

le début des années 1980 a été attribuée, à la persistance de la phase positive de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) (Xoplaki et al, 2004). Cette dynamique de sécheresse s'accompagne d'un réchauffement important, lié au changement climatique planétaire, qui rend ces années sèches de plus en plus difficiles, pour différents secteurs socio-économiques du pays.

Dans la littérature, on distingue quatre types de sécheresse, qui sont les suivantes :

- ❖ **La sécheresse climatique** : la définition de la sécheresse climatique est basée sur le degré d'aridité d'une période sèche, par rapport à la normale (centre ou moyenne) et sur la durée de cette période sèche. Ces définitions doivent être considérées spécifiques à une région, puisque les conditions climatiques normales, changent grandement d'une région à l'autre (Margat, 1989).
- ❖ **La sécheresse agricole** : Elle fait un rapport entre les sécheresses climatiques ou hydrologiques et les impacts sur le milieu agricole. Elle porte sur l'insuffisance des précipitations, la différence entre l'évapotranspiration réelle et potentielle, et le manque en eau des sols et des réserves hydriques. Ces sécheresses dépendent grandement des conditions climatiques, des caractéristiques biologiques et phénologiques des cultures, ainsi que des propriétés physiques et biologiques des sols (Beaudin et al, 2007).
- ❖ **La sécheresse hydrologique** : La sécheresse hydrologique est liée à tout déficit pluviométrique prolongé, entraînant une baisse de l'alimentation des cours d'eau et de la recharge des réservoirs de surface ou souterrains (Whilite, 1990).
- ❖ **La sécheresse socio-économique** : Elle associe l'offre et la demande d'un bien économique et certains éléments des sécheresses météorologiques, hydrologiques et agricoles. Elle se distingue des autres types de sécheresse et dépend des procédés de temps et d'espace de l'offre et de la demande de ce bien économique. Ce bien dépend toujours des conditions climatiques et peut tout aussi bien être l'eau, une récolte ou de l'électricité. Il y a sécheresse socio-économique, lorsque la demande pour un bien excède l'offre, à cause d'un manque hydrique relié au climat (Beaudin et al, 2007).

L'objectif de notre travail est donc de caractériser la sécheresse climatique au Sud-Ouest du Maroc, pour la période 1968-2015 (Souss-Massa) et 1972-2015 (Tensift), à travers le calcul de quelques indices pluviométriques, à l'échelle annuelle (indice de rapport à la normale (RN), l'écart à la moyenne (Em) et l'indice normalisé (SPI)). Ensuite, nous allons analyser les relations entre la sécheresse et l'indice de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA), l'Oscillation Méditerranéenne occidentale (WeMOI) et l'Indice d'Oscillation Australe (SOI). En plus, émettre des hypothèses, qui peuvent expliquer la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse au Sud-Ouest du Maroc.

II. Les indices de la sécheresse utilisés :

Les indices sont le plus souvent, des représentations numériques de l'intensité des sécheresses, que l'on calcule à partir de valeurs climatiques ou hydrométéorologiques, dont les indicateurs précités. Ils mesurent l'état qualitatif d'une sécheresse, à un emplacement donné, pour une période donnée.

Au fil des ans, les météorologues et les climatologues ont mis au point, partout dans le monde, de nombreux indices de sécheresse. La surveillance du climat à diverses échelles

temporelles, permet de détecter de brefs épisodes humides, au sein de longues périodes de sécheresse, ou de brefs épisodes secs, au sein de longues périodes d'humidité. Les indices simplifient parfois, certaines relations complexes et facilitent la communication des informations à divers utilisateurs et parties prenantes, dont le public. Ils servent à établir l'intensité, l'emplacement, l'époque d'apparition et la durée d'un épisode de sécheresse. Ces indices constituent également, un bon moyen de communication avec le public et un outil de décision pour le gouvernement (Beaudin et al, 2007).

Plusieurs indices et méthodes ont été développés et utilisés, pour mieux identifier et analyser les caractéristiques de la sécheresse. Les indices de sécheresse et les outils les plus souvent utilisés, pour la surveillance et la prévision sont les suivants :

Dans ce travail, le choix des paramètres et des indices de sécheresse est basé sur leur applicabilité et leur simplicité d'utilisation.

1. Indice du Rapport à la normale des précipitations (RN) :

Cet indice, qui est exprimé en pourcentage, est un calcul simple et bien adapté aux besoins des présentateurs de météo de la télévision et le grand public. Il est l'une des mesures les plus simples des précipitations pour un emplacement (Willeke et al, 1994). Le rapport à la normale des précipitations représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période, par rapport à la normale historique de cette période. La normale étant habituellement la moyenne des précipitations totales de la période, calculée à partir d'environ 30 ans de données. Cet indicateur est appliqué à l'échelle locale ou régionale, pour des périodes de temps variant de 1 mois à quelques mois, voire même une année.

Cet indice est exprimé mathématiquement en pourcentage, comme suit :

$$RN(\%) = (P_i / P_m) \times 100$$

Où :

P_i : est la précipitation de l'année i ;

P_m : est la précipitation moyenne pour la même période de temps étudiée.

Ce rapport permet une estimation ponctuelle des précipitations, par rapport à la normale : une année est classifiée comme sèche, si la pluviométrie se situe au-dessous de la normale ; c'est-à-dire, lorsque le RN est inférieur à 100 % (Rognon, 1997).

2. Indice de l'écart à la moyenne (Em) :

Cet indice, le plus utilisé, permet de visualiser et d'estimer le déficit pluviométrique à l'échelle de l'année. L'écart à la centre est le plus utilisé par les agro-météorologues. Bien évidemment, quand l'échantillon des données est dissymétrique, la différence entre la moyenne et la centre est grande. L'écart à la moyenne est la différence entre la hauteur des précipitations annuelles (P_i) et la hauteur moyenne annuelle des précipitations (P_m).

Cet indice met en évidence, la succession de période d'années sèches et d'années humides plus ou moins marquées. Cet écart s'obtient par la formule suivante :

$$Em (\%) = P_i - P_m$$

Avec :

Em : écart à la moyenne ;

Pm : module pluviométrique moyen ;

Pi : total de l'année considérée.

- L'écart est positif, pour les années humides ;
- L'écart est négatif, pour les années sèches.

Une année est dite *sèche*, lorsque cet indice est négatif et *humide* quand il est positif. Le cumul de l'indice de l'écart en pourcentage à la normale des années successives permet de dégager les grandes tendances, en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des indices croît, il s'agit d'une tendance humide. La tendance est sèche, dans le cas contraire.

3. Indice normalisé (Standardisé) des précipitations (SPI) :

L'indice standardisé des précipitations (Hayes, 1996) a été développé, en vue de quantifier le déficit pluviométrique pour des échelles de temps multiples. En 2009, l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) a recommandé d'utiliser principalement le SPI, pour surveiller l'évolution des conditions de sécheresse météorologique. En prônant un large emploi du SPI, elle montrait la voie aux pays qui cherchaient à se doter d'un certain niveau d'alerte rapide à la sécheresse. C'est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait, le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace, pour analyser les périodes ou cycles humides, que les périodes ou cycles secs (Hayes, 2011).

L'indice SPI est utilisé dans divers instituts de recherche, des universités et des services météorologiques et hydrologiques nationaux du monde entier, dans le cadre des activités de suivi de la sécheresse et d'alerte précoce dans le domaine.

La formule mathématique de SPI est la suivante :

$$\text{SPI} = (p_i - p_m) / \sigma$$

Où :

Pi : Précipitation de l'année *i* ;

Pm : Précipitation moyenne ;

σ : Déviation standard ou écart type.

Une sécheresse sévit, lorsque le SPI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins, et se termine, lorsque le SPI devient positif. On effectue une classification de la sécheresse, suivant les valeurs du SPI.

Tableau 18 : Catégories des sécheresses et d'humidité définies par les valeurs du SPI.

Classifications ISP	
2,0 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	Modérément humide
de -0,99 à 0,99	Proche de la normale
de -1,0 à -1,49	Modérément sec
de -1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

III. Analyse de la variabilité et calcul des indices de la sécheresse :

Afin de caractériser et analyser la sécheresse dans la zone d'étude, différents indices ont été utilisés à savoir ; RN, EM et SPI. En premier lieu, une étude comparative entre les indices qui prennent en compte uniquement, les données de précipitation a été lancée à différentes échelles de temps, tous les indices précités ont la même classification des événements de sécheresse/humidité. En effet, la comparaison entre les quatre indices était faite sur les données de sept stations pour la période 1972-2015 (Tensift) et 1968-2015 (Souss-Massa), chacune représente une partie du bassin (l'amont, centre et l'aval).

IV. Analyse de la sécheresse annuelle dans le bassin versant de Tensift :

1. Indice du rapport à la normale des précipitations (RN), des stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna :

L'analyse des séries du rapport à la normale, au niveau des trois stations, montre une grande vulnérabilité du bassin versant de Tensift vis-à-vis de la sécheresse. En utilisant les seuils de sécheresse calculés ci-dessous, on a pu déterminer, pour chacune des stations étudiées, les fréquences des années sèches, normales et humides, durant la période étudiée au niveau des trois stations. Ces derniers nous ont permis de constater 22, 21 et 20 années sèches, respectivement au niveau des stations d'Aghbalou, Chichaoua et Adamna (tabl.19).

Tableau 19 : Fréquence des années sèches, normales et humides des trois stations, à l'aide de l'indice du rapport à la normale.

Stations	Années sèches	Années normales	Années humides
Aghbalou	22	10	12
Chichaoua	21	06	17
Adamna	20	12	07

Au cours des 44 années analysées pour Aghbalou et Chichaoua et 36 années pour Adamna, les sécheresses les plus remarquables par leur intensité ont été celles des années 2000-2003 et 2012-2014 (pour Aghbalou), et 1999- 2003 (pour Chichaoua), et 1979-1983 et 1992-1995 et 2005-2008 (pour Adamna). Les épisodes secs détectés pour les trois stations ont été qualifiés extrêmement sévères en termes d'intensité. La figure en bas, représente les épisodes de sécheresse détectés par l'indice du rapport à la normale au niveau des trois stations.

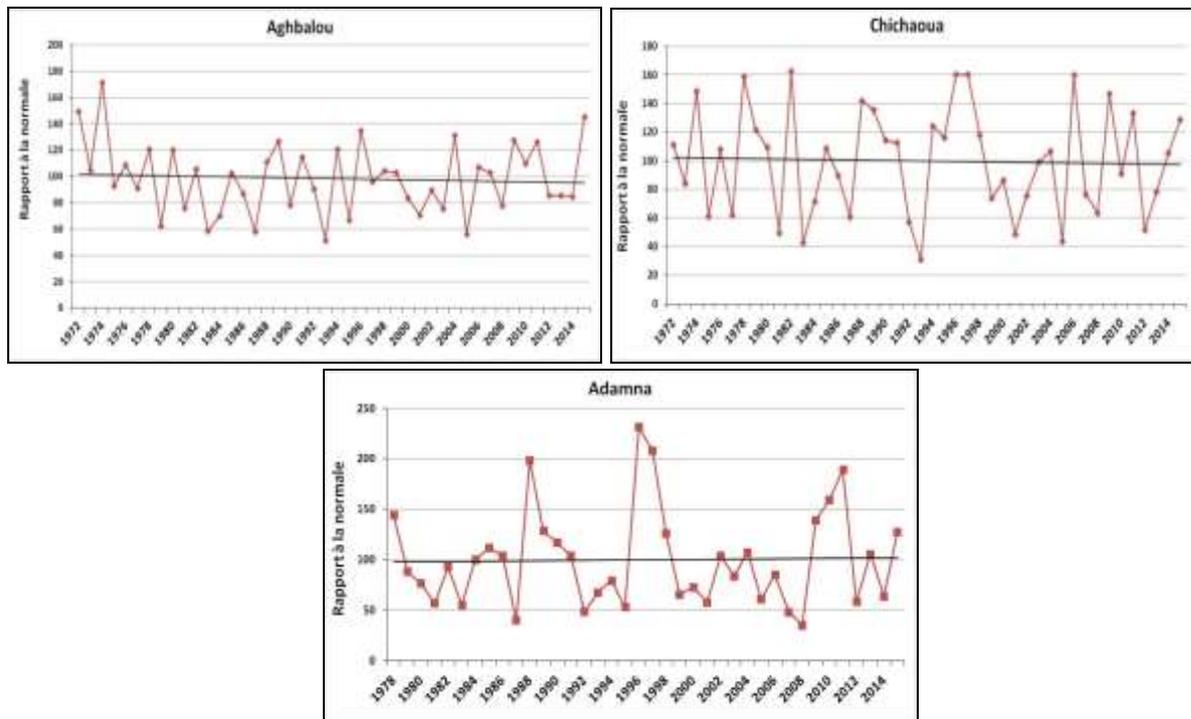


Figure 49 : Évolution de la sécheresse, à l'aide de l'indice du rapport à la normale, aux stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna (1972-2015).

2. L'écart à la moyenne pour les trois stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna :

L'analyse des figures ci-dessous, montre que les nombres d'années sèches sont devenus plus importants aux dix premières années du 21^{ème} siècle, par rapport aux années 80 et 90. Selon les résultats obtenus, l'écart à la moyenne présente globalement une tendance vers la baisse, qui confirme la diminution de la pluviométrie. On en déduit donc, une tendance vers la diminution du nombre d'années humides (année excédentaire) et l'augmentation du nombre d'années sèches ou déficitaires. Par conséquent, l'état de la pluviométrie évolue vers un assèchement au niveau du bassin de Tensift.

Les séries de données étudiées permettent, d'identifier plusieurs séquences, au niveau des trois stations. Pour les trois stations, les années les plus humides au cours de la chronique étudiée, correspondent à l'année 1974 pour Aghbalou, l'année 1982 pour Chichaoua et 1996 pour Adamna, avec des écarts à la moyenne respectifs de 392 %, 115 % et 431 %. L'année la plus sèche correspond à 1993 pour Aghbalou, 1993 à Chichaoua et 2008 pour Adamna. La plupart des stations utilisées, pour l'étude de la pluviométrie dans le bassin versant de Tensift, connaissent une baisse pluviométrique, à partir des périodes 1973-1987 et 1999-2008, qui marquent donc, le début de la sécheresse dans le bassin. Elle se caractérise par sa durée, son intensité et son extension.

Dans la station d'Aghbalou, on remarque l'alternance d'années sèches et humides, au cours de la période d'étude. La période 1972-1980 et 2006-2011 au niveau de cette station est globalement humide, le maximum des pluies est de 921 mm en 1974, alors que la période 1981-1987 et 2000-2005 est caractérisée par une phase sèche. Elle est marquée par une irrégularité spatio-temporelle des pluies, avec cependant, quelques années humides 1982 et

2004. On constate aussi, que le nombre d'années sèches pendant 44 ans, est de 22 années et aussi 22 années humides.

Au niveau de la station de Chichaoua, on remarque que les périodes 1978-1980, 1988-1991 et 1994-1998 sont humides, le maximum des pluies est 109 mm en 1982. Tandis que, les périodes 1981-1987 et 1999-2008 sont caractérisées par des phases sèches. Elle est marquée aussi, par une irrégularité spatio-temporelle des pluies, avec cependant, quelques années humides 1985, 2004 et 2006. On ressort d'après la figure (50), que le nombre d'années sèches à Chichaoua, au cours de 44 ans de cette chronique est de 20 années et 24 années humides.

Dans la station d'Adamna, on constate que les périodes 1988-1991, 1996-1998 et 2009-2011 sont humides, le maximum des pluies est de 431 mm en 1996. Cependant, les périodes 1979-1984, 1992-1995 et 1999-2008 sont caractérisées par des phases sèches. Elle est marquée aussi, par une irrégularité spatio-temporelle des pluies, avec deux années presque humides 2002 et 2004. Les figures ci-dessous ressortent que, le nombre d'années sèches dans cette station au cours de la chronique est de 20 années et 16 années humides.

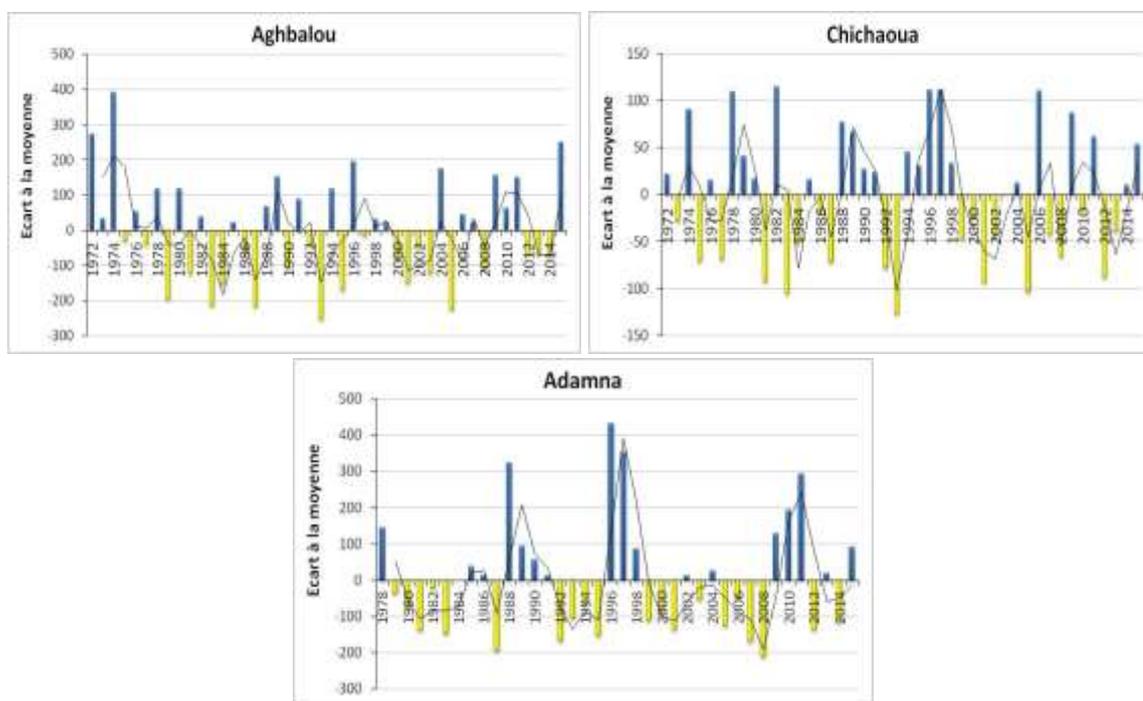


Figure 50 : Évolution de la sécheresse météorologique à l'aide de l'indice de l'écart à la moyenne aux stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna (1972-2015).

Afin de faire une analyse ponctuelle, au niveau des postes pluviométriques retenus dans cette étude, et pour mieux évaluer les variations de la pluviométrie annuelle, nous avons calculé l'indice SPI.

3. L'indice SPI des trois stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna :

L'analyse des valeurs du SPI montre qu'avant 1980, très peu de séquences sèches ont été observées, dans la plupart des stations étudiées (Fig.51). Ainsi, de 1972 à 2015, 08 séquences sèches, 11 séquences sèches et 09 séquences sèches ont été respectivement observées au niveau des stations d'Aghbalou, Chichaoua et Adamna, pour la période 1972-2015. En effet, l'indice statistique SPI a révélé que la période 1983-1984 dans le bassin versant du Tensift a

connu un important déficit pluviométrique. En effet, le calcul de l'indice standardisé de sécheresse pluviométrique du bassin versant de Tensift, depuis l'année hydrologique 1972 jusqu'à 2015, montre l'alternance de séquences sèches et humides, durant la chronique étudiée. Il est à noter aussi, que la durée maximale de sécheresse dans cette zone d'étude, est d'au moins 4 années.

La station d'Aghbalou a connu des périodes de 2 années successives de sécheresse (1983-1984 et 1986-1987), avec des pics en 1979, 1983, 1987, 1993 et 2005, ces pics ont été caractérisés par des sécheresses de types extrêmement sévères. Alors que, les périodes 1972-1974 et 1988-1989, 1996-1999 et 2009-2011 sont globalement humides. Cette station a également été marquée, par des périodes de 3 et 4 années successives proches de la normale (1975-1977, 2012-2014 et 1997-2000). En effet, cette station est marquée par une irrégularité spatio-temporelle des pluies.

À la station de Chichaoua, on remarque l'alternance de périodes humides et sèches au cours de la période d'étude avec une succession de phases humides et relativement normales dépassant parfois 5 ans, enregistrés aux périodes de 1988-1991, 1994-1998 et 1978-1980. Alors que cette station a connu aussi, des périodes de sécheresse de 2 années successives (1983-1984, 1992-1993 et 2001-2002), avec des pics en 1981, 1983, 1993, 2001 et 2005, ces pics ont été caractérisés par des sécheresses de types extrêmement sévères.

L'analyse de l'indice standardisé des précipitations (SPI) pour la station d'Adamna a révélé que cette station a connu un important déficit pluviométrique, à partir des années 80, avec des pics en 1987, 1992, 2007 et 2008. Ces pics ont été caractérisés par des sécheresses de types extrêmement sévères. Durant la période de 1978-2015, la station d'Adamna a enregistré plus de séquences de sécheresse. Elle a connu des périodes de 2 années successives de sécheresse (1992-1993, 2007-2008), avec des périodes relativement normales de 3 et 4 années successives (1984-1986, 1989-1991, 2002-2004, 2012-2015).

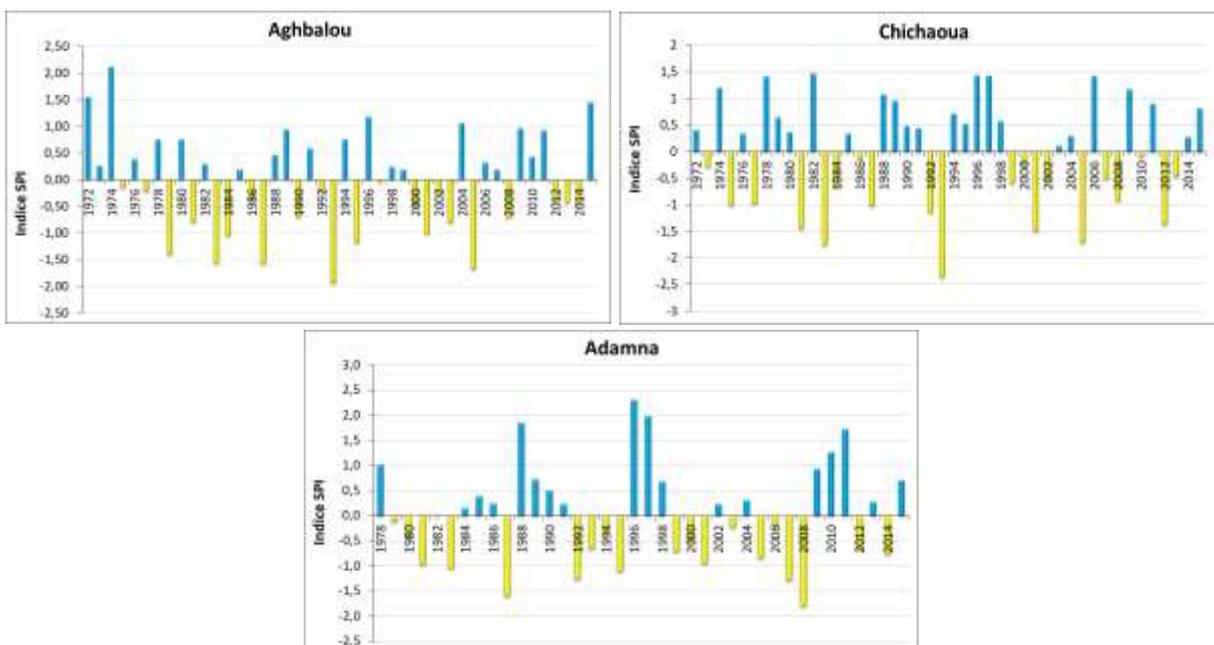


Figure 51 : Évolution de la sécheresse météorologique, à l'aide de l'indice SPI aux stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna (1972-2015).

D'autre part, le pourcentage des années sèches et humides dans le bassin versant de Tensift, ne dépasse pas chacun le seuil de 25 % sur la période 1972/2015. Par contre, on remarque la dominance des années proches de la normale, qui représentent un pourcentage aux alentours de 60 % (fig.52).

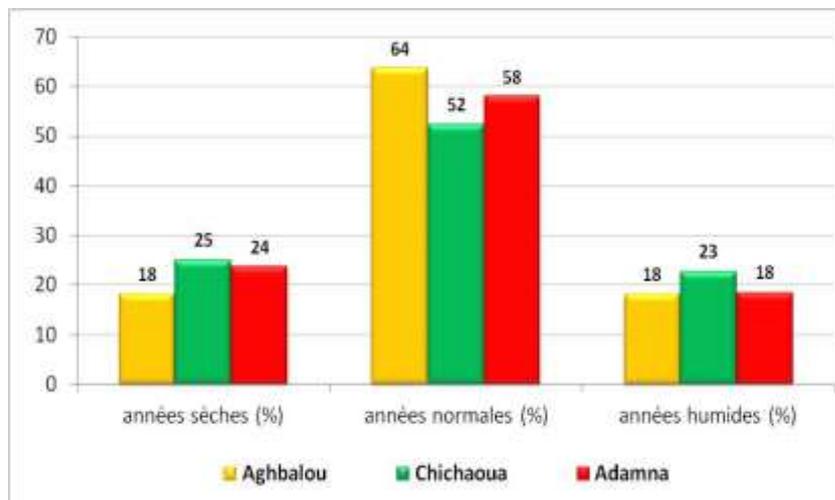


Figure 52 : Pourcentage des années sèches, normales et humides au Tensift (1972-2015).

Pour conclure, la variabilité climatique dans le bassin versant du Tensift se matérialise, par une alternance des années humides et sèches, au regard de l'évolution des indices pluviométriques. Sur l'ensemble du bassin, la variabilité des pluies a enregistré des indices pluviométriques négatifs, précédé par quelques années humides, interrompues par des années sèches.

L'étude des indices de la sécheresse au niveau du bassin versant du Tensift, fait généralement ressortir deux périodes, les années relativement excédentaires commencent à partir de 1988 jusqu'à 1998, viennent après, les années déficitaires entre 1999 et 2008. Ces périodes sont interrompues par des années sèches ou humides, en fonction de la période. Tandis que la période entre 1996-1998 est remarquablement humide, les années 1983 et 1993 sont extrêmement sévères au niveau des trois stations.

V. Analyse de la sécheresse annuelle dans le bassin versant de Souss-Massa :

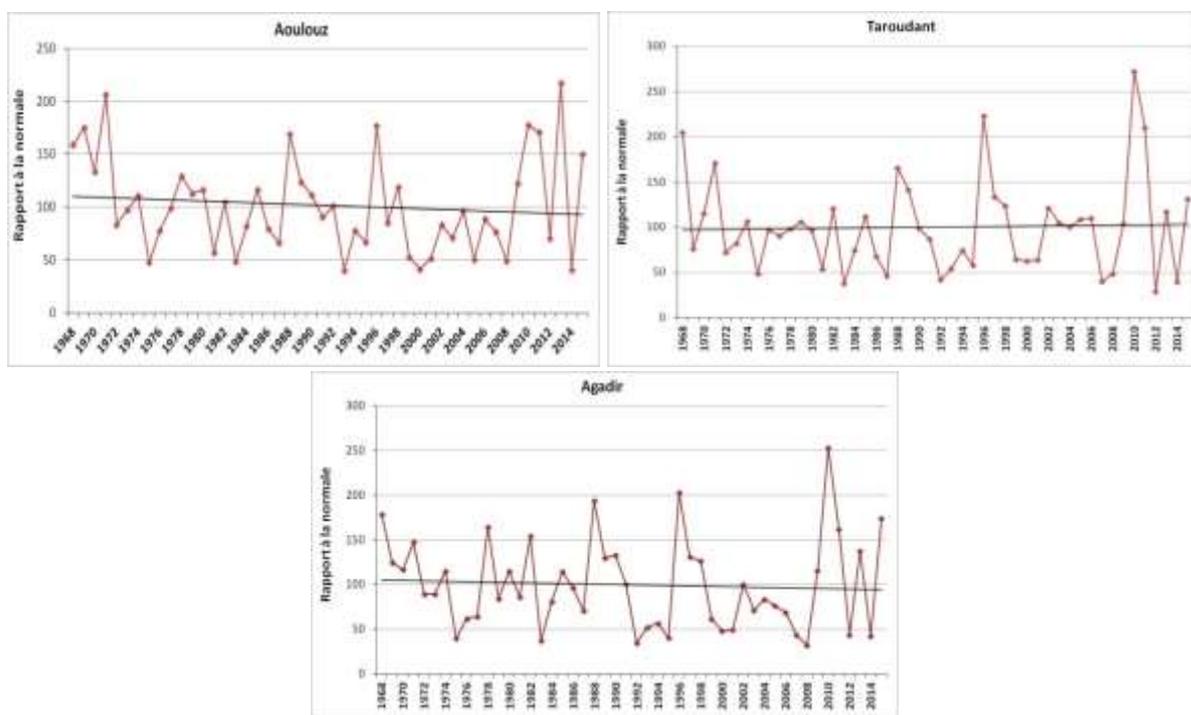
1. Indice du rapport à la normale des précipitations (RN) des trois stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir :

L'analyse des séries du rapport à la normale, au niveau des différentes stations dans le bassin versant de Souss-Massa, montre une vulnérabilité remarquable de ce bassin vis-à-vis de la sécheresse. Les seuils de sécheresse calculés ci-dessous, nous ont permis de déterminer les fréquences des années sèches, normales et humides, durant la période étudiée au niveau des trois stations. On remarque l'alternance des périodes humides et sèches au cours de la période d'étude, le nombre des années sèches, pendant 48 ans est 27, 26 et 26 d'années sèches respectivement au niveau des stations d'Aoulouz, Taroudant et Agadir (Tabl.20).

Tableau 20 : Fréquence des années sèches, normales et humides des trois stations à l'aide de l'indice du rapport à la normale.

Stations	Années sèches	Années normales	Années humides
Aoulouz	27	03	18
Taroudant	26	07	15
Agadir	26	02	20

Au cours des 48 années analysées pour Aoulouz et Taroudant et Agadir, les sécheresses les plus remarquables par leur intensité ont été celles des années 1975-1977, 1993-1995 et 1999-2008 à la station d'Aoulouz; 1975- 1978, 1990-1995 et 1999-2002 pour Taroudant, et 1975 - 1977, 1992-1995 et 1999-2008 à la station d'Agadir. Les épisodes secs détectés pour les trois stations ont été qualifiés forts et extrêmement sévères, en termes d'intensité. La figure en bas, représente les épisodes de sécheresse détectés par l'indice de rapport à la normale, au niveau des trois stations du bassin versant de Souss-Massa.

**Figure 53** : Évolution de l'indice du rapport à la normale des trois stations (Aoulouz, Taroudant et Agadir) pour la période (1968-2015).

2. Indice de l'écart à la moyenne des stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir :

Le calcul de l'indice « écart à la moyenne » dans les trois stations du bassin versant de Souss-Massa au cours de 48 ans (Fig.54), montre l'alternance de séquences sèches et humides. Les figures montrent aussi, que les nombres d'années sèches sont généralement devenus plus importants aux dix premières années du XXI siècle, par rapport aux années 70 et 80. Selon les résultats, l'écart à la moyenne présente une grande variabilité pluviométrique et une tendance vers la baisse, qui confirme la diminution de la pluviométrie. On en déduit donc, une tendance vers la diminution du nombre d'années humides et l'augmentation du nombre d'années sèches ou déficitaires. De ce fait, l'état global de la pluviométrie évolue vers un assèchement au niveau du bassin de Souss-Massa.

Les séries de données étudiées permettent d'identifier plusieurs séquences, au niveau des trois stations. Pour les trois stations, les années les plus humides au cours de la chronique étudiée, correspondent à l'année 2013 pour Aoulouz, l'année 2010 pour Taroudant et aussi 2010 pour Agadir, avec des écarts à la moyenne respectifs de 385 %, 354 % et 242 %. L'année la plus sèche correspond à 1993 pour Aoulouz, 2012 pour Taroudant et 2008 pour Agadir. La plupart des stations utilisées, pour l'étude de la pluviométrie dans le bassin versant de Souss-Massa, connaissent une baisse pluviométrique, à partir des années 70, qui marquent donc le début de la sécheresse dans le bassin.

Au niveau de la station d'Aoulouz on remarque l'alternance d'années sèches et humides au cours de la période d'étude. La période 1968-1971 et 2009-2013 au niveau de cette station, est globalement humide, le maximum des pluies est de 687 mm en 1971. Alors que, les périodes 1972-1976, 1981-1987 et 1999-2008 sont caractérisées par des phases sèches interrompues par des années humides 1974 et 1985, donc la station est marquée par une irrégularité spatio-temporelle des pluies. On constate aussi que, le nombre d'années sèches et humides durant 48 ans, est de 26 années sèches et 22 années humides.

Dans la station de Taroudant, on constate que, les périodes 1968-1971, 1996-1998, 2002-2005 et 2009-2011 sont relativement humides, le maximum des pluies est de 561 mm en 2010. Alors que, les périodes 1972-1987, 1990-1995 et 1999-2001 sont caractérisées par des phases sèches, Elle est marquée aussi, par une irrégularité spatio-temporelle des pluies, avec deux années presque humides 1982 et 1985. D'après la figure ci-dessous, on note que, le nombre d'années sèches et humides à la station de Taroudant, au cours de la chronique étudiée est de 28 années sèches contre 20 années humides.

La figure ci-dessous illustre l'évolution de la sécheresse, à l'aide de l'indice « l'écart à la moyenne » à la station d'Agadir. On remarque que, les périodes 1968-1971, 1988-1990, 1996-1998 et 2009-2011 sont des périodes humides, le maximum des pluies est 613 mm en 2010. Tandis que, les périodes 1972-1977, 1992-1995 et 1999-2008 sont globalement caractérisées par des phases sèches. D'après la figure ci-dessous, on ressort que, le nombre d'années sèches et humides durant 48 ans au niveau de la station d'Agadir est de 26 années sèches contre 22 années humides.

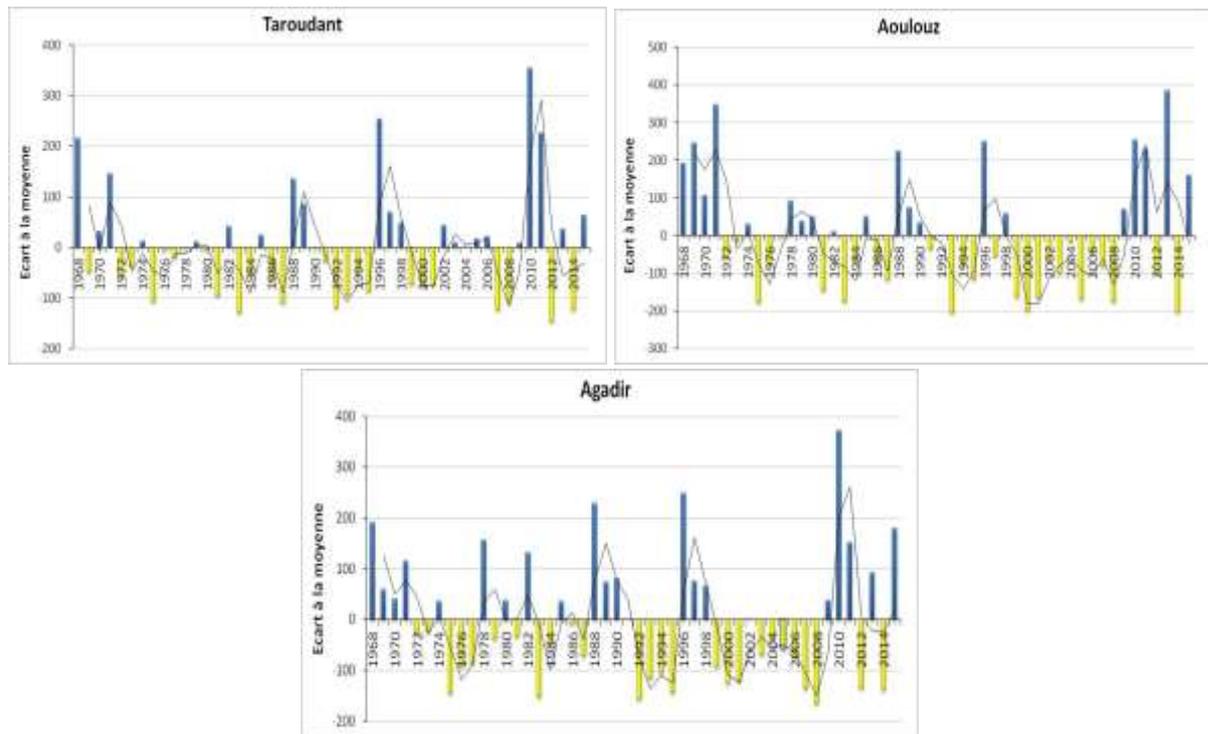


Figure 54 : Évolution de la sécheresse météorologique, à l'aide de l'indice l'écart à la moyenne aux stations d'Aoulouz, Taroudant et Agadir (1968-2015).

3. L'indice SPI des trois stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir :

L'indice « SPI » montre une alternance de phases sèches et d'autres humides, au niveau des trois stations étudiées, au cours de la période de 1968-2015. Les stations d'Aoulouz et d'Agadir montrent presque les mêmes intensités de sécheresse. L'analyse des valeurs de SPI montre qu'avant 1972 il n'y a pas de séquences sèches observées dans la plupart des stations étudiées (Fig.55). En plus, de 1972-2015, 09 séquences sèches ont été observées au niveau de la station d'Aoulouz, 10 séquences sèches à Taroudant et 11 séquences sèches pour Agadir. En effet, l'indice statistique SPI a révélé, que la période 1999-2008 dans le bassin versant de Souss-Massa a connu un important déficit pluviométrique. Il est à noter aussi, que la durée maximale de la sécheresse dans le bassin de Souss-Massa a atteint 10 années à la station d'Aoulouz.

D'une manière plus détaillée, la station d'Aoulouz a connu des périodes de 2 années successives de sécheresse (1975-1976, 1983-1984, 1993-1994 et 2007-2008). Cette station a également été marquée, par une période relativement sèche de 10 années successives (1999-2008), avec des pics en 1975, 1983, 1993, 2000, 2008 et 2014, ces pics ont été caractérisés par des sécheresses de types forts et extrêmement sévères. Alors que, les périodes 1968-1971, 1978-1980, 1988-1990 et 2009-2011 sont globalement humides. On constate que, d'une part, cette station est marquée par une irrégularité spatio-temporelle des pluies, et d'autre part, par de plus longues années successives de sécheresse.

L'analyse de l'indice standardisé des précipitations (SPI), pour la station de Taroudant a révélé que cette station a connu une importante alternance pluviométrique, à partir des années 70 avec des pics en 1983 et 2012. Ces pics ont été caractérisés par des sécheresses de types forts et extrêmement sévères. Durant la période 1968-2015, la station de Taroudant a

enregistré plus de séquences de sécheresse, elle a connu des périodes de 2, 3, 4 à 5 années successives de sécheresse (1983-1984, 1986-1987, 1991-1995 et 2007-2008).

À la station d'Agadir, on remarque l'alternance de périodes humides et sèches au cours de la période d'étude avec des phases humides de 3 à 4 années successives enregistrés de 1968-1971, 1988-1990, 1996-1998 et 2010-2011. Alors que, cette station a connu aussi des périodes de sécheresse de 2 et 3 années successives (1975-1977, 1992-1995, 2000-2001 et 2007-2008), avec des pics en 1983, 1992 et 2008, ces pics ont été caractérisés par des sécheresses de types forts à sévères. Elle a également été marquée par des périodes relativement normales, de 3 à 4 années successives (1972-1974, 1979-1981, et 2002-2006).

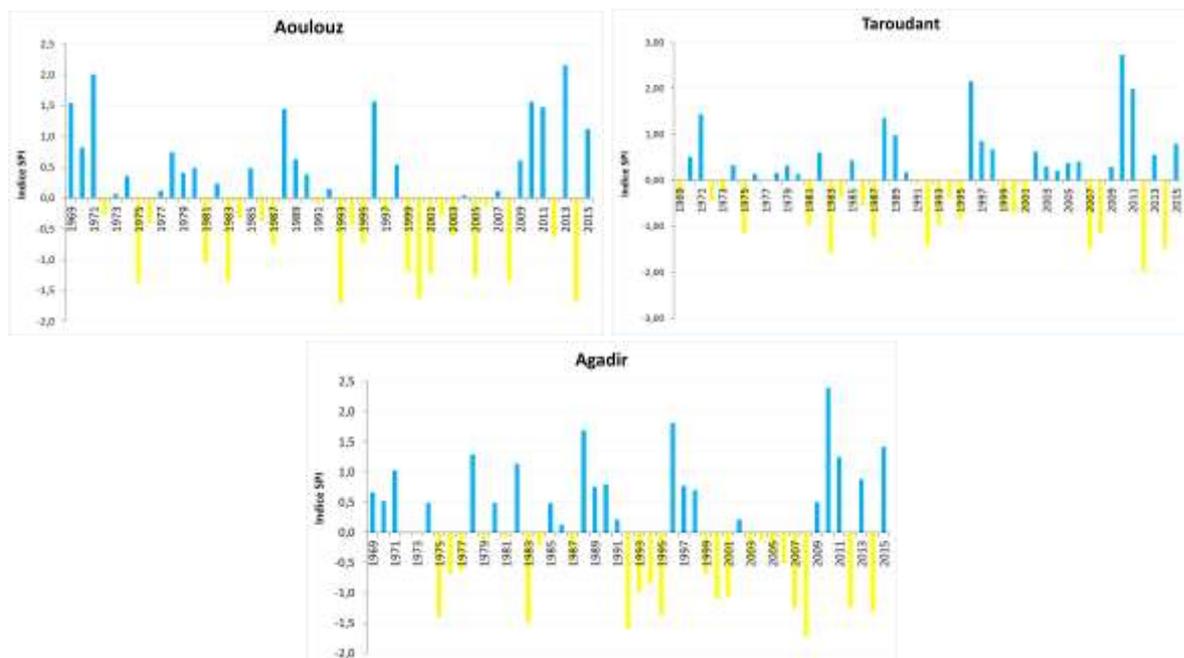


Figure 55 : Évolution de la sécheresse météorologique à l'aide de l'indice SPI aux stations d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir (1968-2015).

Par ailleurs, les pourcentages des années sèches et humides dans le bassin versant de Souss-Massa ne dépassent pas chacun, le seuil de 20 % à la période 1968-2015. Alors qu'on remarque la dominance des années normales, qui représentent un pourcentage aux alentours de 60 % (fig.56).

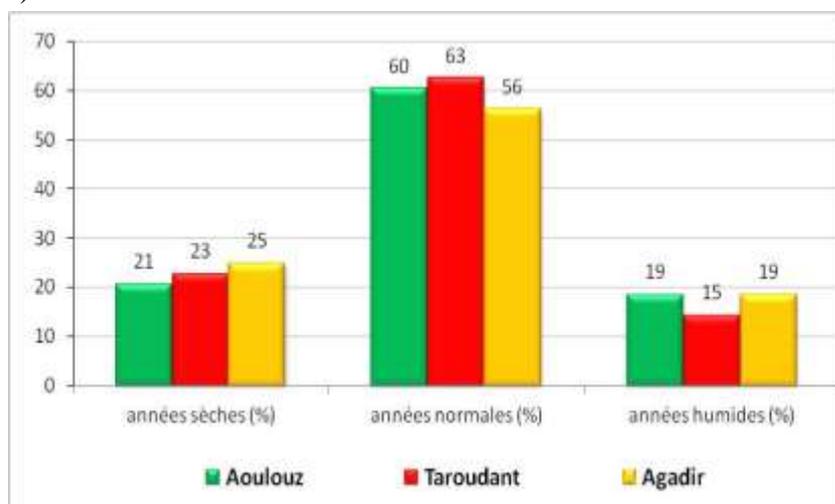


Figure 56 : Pourcentage des années sèches, normales et humides aux trois stations (1968-2015).

En bref, on note l'alternance des années sèches et humides sur toute la période étudiée, avec des fréquences et des intensités relativement similaires pour les trois stations.

Pour conclure, l'étude des indices de sécheresse précédents au niveau du bassin versant de Souss-Massa, fait généralement ressortir, des périodes excédentaires et des périodes déficitaires. Ces périodes sont interrompues par des années sèches ou humides. Au cours des 48 années analysées pour la station Aoulouz, Taroudant et Agadir, les années de sécheresses les plus remarquables par leur intensité, ont été celles des années 1999 et 2008 (pour Aoulouz), 1991-1995 (pour Taroudant) et 1999-2008 (pour Agadir). Les épisodes secs détectés pour les trois stations ont été qualifiés forts à extrêmement sévères, en termes d'intensité.

Axe 2 : Corrélations des modes de téléconnexion de l'hémisphère Nord avec l'indice de sécheresse (SPI) au Sud-Ouest du Maroc

La circulation atmosphérique est le principal facteur des changements, dans la rigueur des saisons, notamment hivernales, d'une année à l'autre. Parmi les éléments les plus distingués de la variabilité interannuelle de la circulation atmosphérique de grande échelle, l'importance de l'organisation spatiale des modes de téléconnexion (Wallace et al, 1981). La circulation atmosphérique présente une grande variabilité, reflétant les modes de téléconnexion, les conditions météorologiques et les systèmes de circulation, qui se produisent sur différentes échelles de temps, allant de quelques jours, jusqu'à quelques mois, à plusieurs années, voire quelques siècles.

Le climat terrestre fluctue sur une très large gamme d'échelles temporelles, depuis les fluctuations à court terme, qui concernent la variabilité mensuelle et saisonnière, aux fluctuations interannuelles à inter-décennales. La variabilité globale du climat à court terme, est généralement associée à des phases de phénomènes océaniques et atmosphériques couplés, dont El Niño (ENSO), l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) et l'Oscillation Arctique (AO). Alors qu'El Niño Southern Oscillation (ENSO) affecte la météo et la variabilité du climat dans le monde entier, l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) représente le mode de climat dominant dans la région de l'Atlantique Nord. Ces oscillations, largement décrites dans la littérature (Hurrell et al, 2003), mettent en jeu l'interaction entre l'atmosphère et l'hydrosphère continentale et océanique, ainsi qu'elles ont été utilisées dans plusieurs recherches, pour développer des modèles précis afin de prévoir la variabilité climatique (Pan et al, 2004).

Les modes de téléconnexion reflètent les changements à grande échelle des ondes atmosphériques et des courants jets, et ils influencent la température, les précipitations, les trajectoires des tempêtes, l'emplacement du courant-jet et son intensité sur de vastes territoires. Par conséquent, ils sont souvent à l'origine de certaines anomalies des conditions météorologiques, produites sur de vastes distances (Miller et al, 2006).

À cet égard, il est important de pouvoir distinguer, si ces variations climatiques qui caractérisent notre zone d'étude (Tensift et Souss-Massa) sont connectées à des phénomènes de plus larges ampleurs spatiales et temporelles, ou s'elles sont seulement, une expression des effets locaux. Plusieurs études ont relié les variations climatiques (précipitations), aux fluctuations du climat (Collins, 2009), dans le but de comprendre les changements abrupts, les

fluctuations et les tendances observées. Par exemple, Labat (2010) a identifié les fluctuations récentes du cycle hydrologique de surface, dans les débits de plusieurs grands fleuves mondiaux, en relation avec les principaux modes de variabilité du climat (ENSO, NAO ...).

Cette partie du travail vise donc à chercher les relations entre la variabilité annuelle des précipitations au Sud-Ouest du Maroc (Tensift et Souss-Massa) et les différents modes de la circulation atmosphérique générale. Il s'agit donc, de mettre en évidence l'influence de la circulation atmosphérique sur la variabilité pluviométrique durant les périodes 1972-2015 et 1968-2015. Pour cela, nous avons déterminé les corrélations entre 6 stations pluviométriques et 3 indices climatiques à l'échelle annuelle, sur une période dépassant 40 ans, pour les deux bassins.

I. Identification des modes de téléconnexion étudiés :

La variabilité climatique ces dernières décennies, peut être expliquée par la modification de la composition chimique de l'atmosphère induite par l'homme, ça pourrait être aussi les fluctuations naturelles à basse fréquence du climat. Une description synthétique des principaux indices climatiques affectant le Maroc sera présentée : la NAO (North Atlantic Oscillation), le SOI (Southern Oscillation Index) et le WeMOI (Western Mediterranean Oscillation Index).

Le choix de l'indice standardisé des précipitations (dénommé en anglais, SPI, Standardized Precipitation Index), est lié au fait que cet indice, présente des avantages en termes de cohérence statistique et à la capacité de décrire et quantifier le déficit de précipitation à de multiples échelles de temps. Il permet également d'analyser les périodes humides ainsi que les périodes sèches et peut assurer une alerte précoce de la sécheresse et de les aider à évaluer sa sévérité.

II. L'oscillation Nord Atlantique (NAO) :

L'oscillation Nord Atlantique ou North Atlantic Oscillation (NAO), est un phénomène climatique qui joue un rôle très important sur les conditions météorologiques et océanographiques de l'Atlantique Nord. Dans cette région, les fluctuations climatiques aux moyennes et hautes latitudes se caractérisent par un petit nombre de structures bien définies, montrant une forte cohérence spatiale à grande échelle sur le bassin atlantique. L'Oscillation Nord Atlantique est le mode atmosphérique dominant plus particulièrement en hiver, son influence s'étendant de la côte Est des Etats-Unis à l'Eurasie et l'Afrique du Nord, jusqu'à l'Arctique (Visbeck et al, 2001).

La NAO est une variation naturelle du climat qui a des impacts importants sur le climat de l'Europe de l'ouest, des environs du nord de l'Afrique et de l'Est de l'Amérique du Nord. Elle a des effets bien plus importants en hiver qu'en été. C'est vers 1920 que les deux météorologues, l'autrichien Friedrich et l'anglais Gilbert Walker ont découvert ce phénomène. La variation de ce phénomène dépend de la pression atmosphérique. La NAO consiste en un basculement de la masse atmosphérique entre la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores. L'indice NAO se définit comme la différence normalisée de pression de surface entre ces deux régions (Hurrell et al, 1995).

Lors d'une phase dite positive, l'anticyclone des Açores est renforcé et s'étend sur le quart Sud-Ouest de la péninsule ibérique tandis que de faibles pressions se situent au niveau du Golfe Ligurien. Ceci va alors induire une circulation générale des masses d'air de surface de direction Nord-Ouest/Sud-Est. Au contraire, la phase négative s'observe lorsque la zone de basses pressions est située sur le Sud-Ouest de la péninsule ibérique, avec l'anticyclone central européen renforcé jusqu'au Golfe Ligurien. La circulation des masses d'air de surface se fait alors d'Est en Ouest (Lespinas, 2008).

La plupart des études de la NAO se sont concentrées sur des échelles de temps interannuelles au décennales, en particulier en association avec les variations climatiques à court terme en Europe et en Amérique du Nord (Hurrell et al, 1997) et les variations extratropicales de l'océan (Dickson, 1997). Ward et al, (1999) ont étudié l'évolution intra-saisonnière de la NAO pour la prévision de précipitations saisonnières en Afrique du nord.

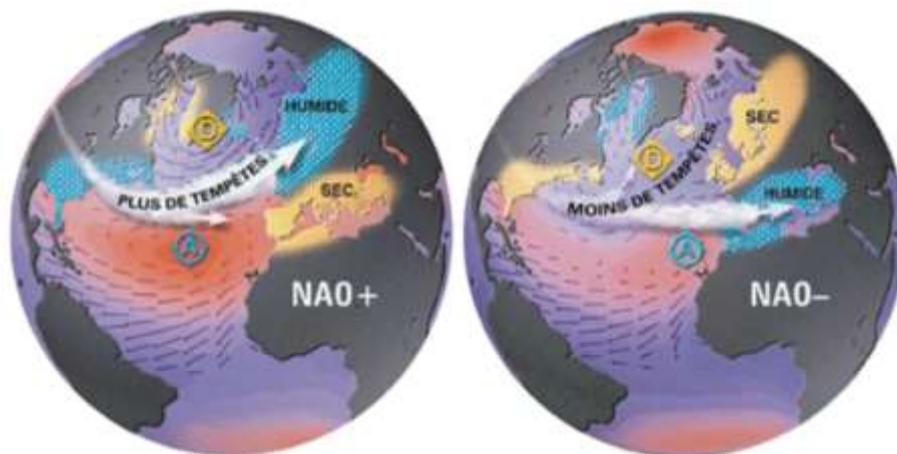


Figure 57 : Schéma récapitulatif des impacts associés aux deux phases de NAO (d'après Cassou, 2004).

La NAO « North Atlantic Oscillation », correspond à la différence de pression Atmosphérique au niveau de la mer (SLP), mesurée au niveau de deux stations représentant les centres d'actions au-dessus de l'Islande et des Açores (Bridgman et al, 2006).

1. Oscillation de la Méditerranée occidentale (WeMOI)

L'oscillation Méditerranéenne (MO), correspond au comportement opposé de la dynamique atmosphérique entre les sous bassins Est-Ouest de la Méditerranée (Conte et al. 1989). La MO est un modèle de variabilité de basse fréquence produisant des anomalies barométriques, thermiques et pluviométriques opposées entre les extrémités du bassin, la MO influence les précipitations dans le bassin méditerranéen (Maheras et al, 1999). La MO peut être interprété par deux pressions de surface opposées (et hauteur géopotentielle), dans son mode positif par un anticyclone dans la Méditerranée occidentale et Iberia, et son mode négatif dans la Méditerranée orientale (Maheras et al, 1999).

La définition Oscillation de la Méditerranée occidentale définie la première fois par Martin vide et Lopez Bustin (2006), correspond à la basse fréquence de la variabilité de la circulation. La MO couvre principalement la dynamique atmosphérique de l'ensemble du bassin méditerranéen. Alors que l'oscillation de la Méditerranée occidentale (WEMO) est définie que dans le cadre du bassin occidental de la Méditerranée et de ses alentours.

La phase positive de la WEMO correspond à l'anticyclone sur les Açores renfermant le quadrant Sud-Ouest ibérique et basses pressions dans le nord de l'Italie (golfe Genova) ; sa phase négative coïncide avec l'anticyclone central européen situé au nord de la péninsule italienne et zone de basse pression, souvent coupée des latitudes nordiques, dans la péninsule ibérique Sud-Ouest (Martin et al, 2006).

Au cours des phases positives les vents soufflent du Nord-Ouest sur Nord-Ouest méditerranéen (côte catalane) conduit par l'anticyclone des Açores. Pendant les phases négatives, les vents viennent du secteur oriental, situé sur le bord Sud-Ouest de l'anticyclone de l'Europe centrale.

L'indice Méditerranée occidentale Oscillation (WeMOI), définie comme la différence des valeurs normalisées des pressions au niveau de la mer entre Cadix-San Fernando en Espagne et Padoue en Italie (Martin-Vide et al, 2006). La WeMOI annuelle est la valeur moyenne du WeMOI mensuel correspondant, tandis que le WeMOI d'hiver est la valeur moyenne de la WeMOI de Décembre à Février.

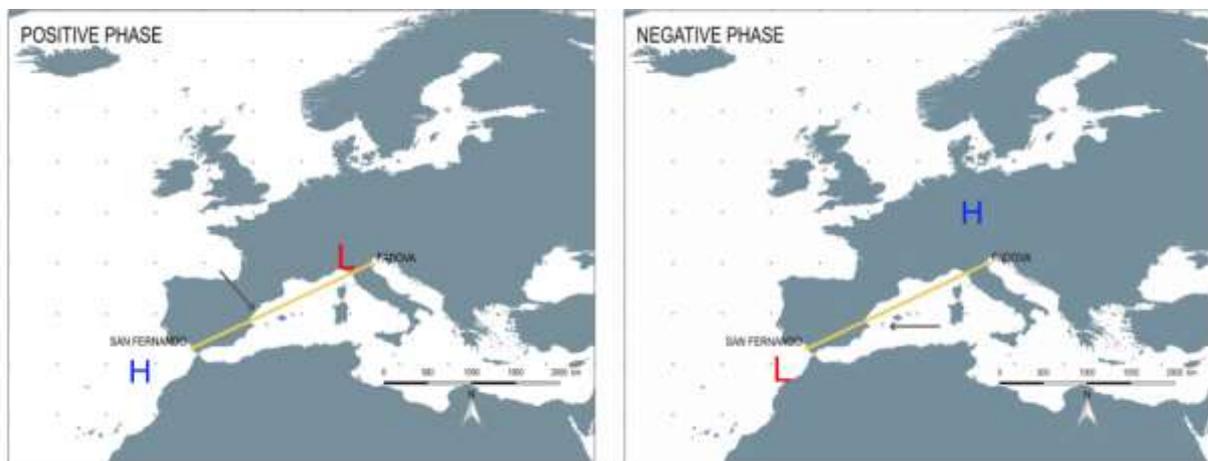


Figure 58 : Schéma des deux phases de WeMOI (d'après Estrela et al, 2002 ; Azorín et al, 2004).

Le WMOI pour « Western Mediterranean Oscillation Index », est un modèle de la variabilité basse fréquence de la circulation atmosphérique qui a été d'abord défini par Martin Vide et Lopez-Bustins (2006). L'Oscillation Méditerranéenne occidentale (WeMOI), défini comme la différence des valeurs normalisées des pressions au niveau de la mer entre Cadix San Fernando en Espagne et Padoue en Italie (Martin-Vide et al, 2006).

2. Indice d'Oscillation Australe (SOI) :

Le SO (Southern Oscillation) est un phénomène de l'échelle planétaire, associés aux grandes variations interannuelles de la température de surface, des précipitations et de la force du vent sur une grande partie du Pacifique. C'est le principal mode de variabilité de la pression dans les tropiques et influence le climat de nombreuses régions du monde (Krishnamurti, 1971 ; Allan et al, 1996). Le SOI mesurant les fluctuations de la pression atmosphérique entre l'ouest et l'est du Pacifique tropical pendant les épisodes El- Niño et La Niña.

ENSO (El-Niño Southern Oscillation) est un phénomène couplé entre l'océan et l'atmosphère qui se manifeste principalement dans l'océan Pacifique. Dans les tropiques, l'ENSO est considéré comme le mode principal de la variabilité interannuelle du climat à

cause de ses impacts globaux et régionaux (Camberlin, 2010). ENSO est connu pour exercer une influence importante sur le continent africain (Ropelewski et al, 1987 ; Nicholson et Kim, 1997 ; Camberlin et al, 2001 ; Jury et al, 2002). Déclinée à l'échelle trimestrielle, cette influence se traduit notamment, lors de la majorité des événements chauds dans le Pacifique (années El-Nino), par des sécheresses en Afrique australe (janvier-mars) et de l'Ethiopie au Sénégal (juillet septembre), ainsi que par des inondations en Afrique orientale (octobre-décembre). Il est remarquable que les précipitations en Afrique centrale restent relativement indépendantes de l'ENSO, Nicholson et Kim, (1997) ou Hulme et al, (2001) montrent eux aussi une quasi-absence de signal ENSO en Afrique centrale. Une exception relative est cependant la façade occidentale (Gabon, Sud Cameroun) en avril-juin, un peu plus sèche en année El-Nino. Halpert et al, (1992) révèlent l'absence d'un lien significatif entre l'ENSO et les anomalies climatiques au niveau de la méditerranée. Cela ne signifie pas qu'il n'y ait absolument aucune influence entre la circulation atmosphérique au-dessus du Pacifique et celle de la région méditerranéenne. Cela signifie simplement que ce lien est trop faible ou trop variable d'un événement à un autre pour apparaître dans les statistiques. Par contre, les mêmes auteurs ont mis en évidence une relation statistique entre les événements de type «La Niña» et les températures de fin d'hiver et de début du printemps au-dessus de la Méditerranée occidentale (Planton, 1999). Chiew et McMahon, (2002) ont étudié la cohérence entre les débits au Maroc et el Nino, ils ont identifié une intensité moyenne, liée à l'association entre un faible écoulement vers mai (+) et El Nino.

En terme d'anomalies, un événement « La Niña », l'opposé «d'El Niño», se traduit par des températures de surface océanique plus froides que la normale dans le Pacifique équatorial et central, événement moins fréquent que ne l'est « El Niño », avec un intervalle entre deux événements consécutifs compris entre 0 et 15 ans sur le dernier siècle. L'étude statistique révèle que les températures au-dessus du domaine méditerranéen, sont plus froides que la normale entre les mois de février et de mai suivant l'événement de «La Niña» (Halpert et al, 1992).

Le SOI « Southern Oscillation Index » donne une indication de l'évolution et de l'intensité d'El Niño ou La Niña dans l'Océan Pacifique. Le SOI est calculé en utilisant les différences de pression entre Tahiti et Darwin. Il est obtenu à partir du site : (<http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>).

Les trois indices climatiques étudiés sont disponibles, pour toutes les années de la série étudiée, sans discontinuité à partir de 1950, ce qui permet de reconstituer les événements climatiques et montrer l'influence de ces modes de téléconnexion sur le climat du Maroc, et notamment, sur le régime pluviométrique en termes de sécheresse au Sud-Ouest du Maroc.

III. Corrélation et analyse de la variabilité des indices climatiques (modes de téléconnexion), en relation avec l'indice de précipitations standardisé (SPI).

Les signaux des précipitations sont marqués par des structures annuelles et interannuelles, à la fois en termes de fréquences et de périodes d'occurrences de ces modes. Puisque ces modes d'oscillations sont présents dans les précipitations, ils peuvent être liés à des fluctuations climatiques. Nous choisissons ici, d'envisager ces fluctuations au moyen de trois indices climatiques, la NAO (Oscillation Nord-Atlantique), le WeMOI (Western Mediterranean Oscillation Index) et le SOI (Oscillation Australe).

Il reste important donc, de pouvoir distinguer si ces variations sont connectées à des phénomènes de plus larges ampleurs spatiales et temporelles, ou s'ils sont seulement, une expression des effets locaux.

1. Bassin versant de Souss-Massa :

Pour dégager la correspondance entre les modes de téléconnexion de l'Hémisphère Nord et la variabilité des extrêmes pluviométriques du bassin de Souss-Massa, nous sommes amenés à analyser leurs évolutions annuelles, avec l'indice SPI des précipitations des trois stations Aoulouz, Taroudant et Agadir, au cours de la période d'étude (1968-2015).

Au niveau des trois stations, la corrélation de leur indice « SPI », avec les trois modes de téléconnexion a révélé des valeurs significatives. Ce qui montre généralement, l'influence de ces modes, sur le régime pluviométrique de ces stations. Il est à noter que la position géographique des trois stations du bassin versant de Souss-Massa, constitue un facteur majeur, qui contribue dans ces bonnes corrélations. Elles sont situées face à l'océan et à l'Ouest des montagnes de l'Atlas, qui jouent un rôle de barrière pour Aoulouz.

À l'échelle annuelle, l'indice « SPI » a montré que les années 1975, 1983, 1992, 1995, 2007, 2008, 2018 sont des années fortes et extrêmement sévères à la station d'Agadir. Avec un calcul simple, on trouve que 90% de ces périodes, coïncident avec les phases positives de NAO et WeMOI, ce qui explique la réduction de la pluviométrie au cours de ces périodes. Ceci est aussi expliqué, par l'effet réduit de ces modes en dehors de l'hiver. Alors que seulement presque 40% de ces épisodes secs sont liés à la phase positive du mode SOI. En contraste, le pic des épisodes humides 1968, 1988, 1996, 2010 et 2015 peut être mis en relation avec un fort indice de NAO et WeMOI négatif, notamment, les années 1968 et 2010, par contre, avec un fort indice positif de SOI.

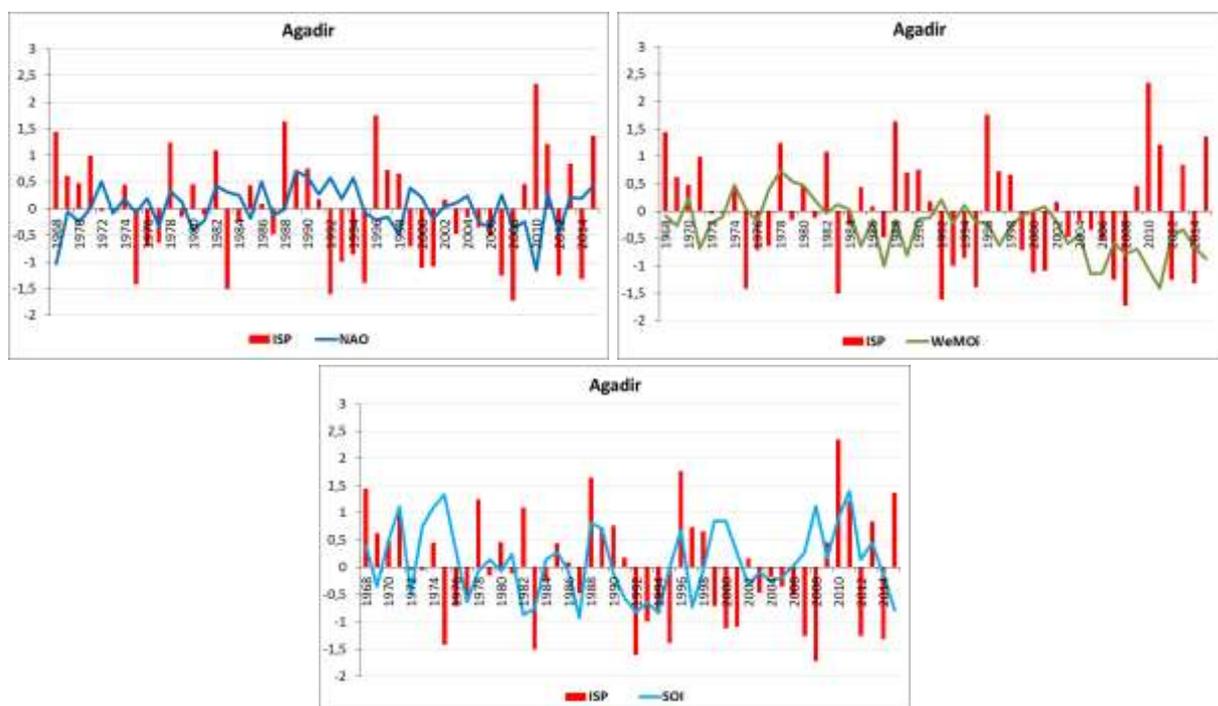


Figure 59 : Évolution des indices NAO, WeMOI et SOI, avec l'indice SPI des précipitations d'Agadir à l'échelle annuelle au cours de la période 1968-2015.

Les variations annuelles de l'indice « SPI » des précipitations à Taroudant, au cours de la période d'étude ont montré que les épisodes 1975, 1983, 1987, 1993, 2007, 2008, 2012 et 2014 représentent les années sèches de la période 1968-2015. Avec un calcul simple, on trouve que 80% de ces périodes coïncident avec les phases positives de NAO et 50% avec les phases positives de WeMOI, ce qui explique la réduction de la pluviométrie au cours de ces périodes. Ceci est aussi expliqué, par l'effet réduit de ces modes. Alors que seulement presque 37% de ces épisodes secs sont liés à la phase positive du mode SOI. En revanche, le pic des épisodes humides enregistrés en 1968, 1971, 1988, 1996 et 2010, peut être mis en relation, avec un fort indice négatif de NAO et WeMOI, notamment, les années 1968, 2010 et 2011, à l'inverse, avec un fort indice positif de SOI (fig.60).

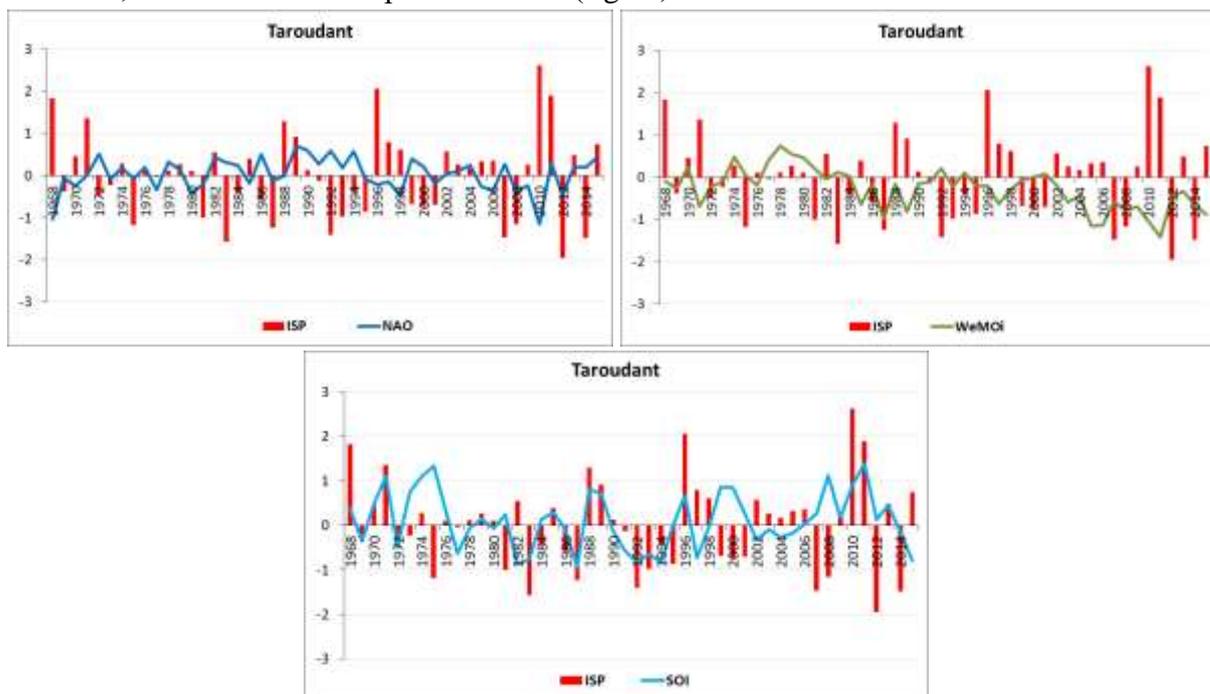


Figure 60 : Évolution des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations de Taroudant, à l'échelle annuelle, au cours de la période 1968-2015.

Toujours à l'échelle annuelle, l'indice SPI a montré que les années de 1975, 1981, 1983, 1987, 1993, 1999, 2000, 2001, 2005, 2008 et 2014 sont des années fortes et extrêmement sévères à la station d'Aoulouz. Avec un calcul simple, on trouve que 65% de ces périodes coïncident avec les phases positives de NAO et presque 50% avec les phases positives de WeMOI, ce qui explique la réduction de la pluviométrie au cours de ces périodes. Ceci est aussi expliqué, par l'effet réduit de ces modes en dehors de l'hiver. Alors que 55% de ces épisodes secs, sont liés à la phase positive du mode SOI. Par contre, le pic des épisodes humides 1968, 1969, 1971, 1988, 1996, 2010, 2011 et 2013, peut être mis en relation avec un fort indice négatif de NAO et WeMOI, par contre, avec un fort indice positif de SOI (fig.61).

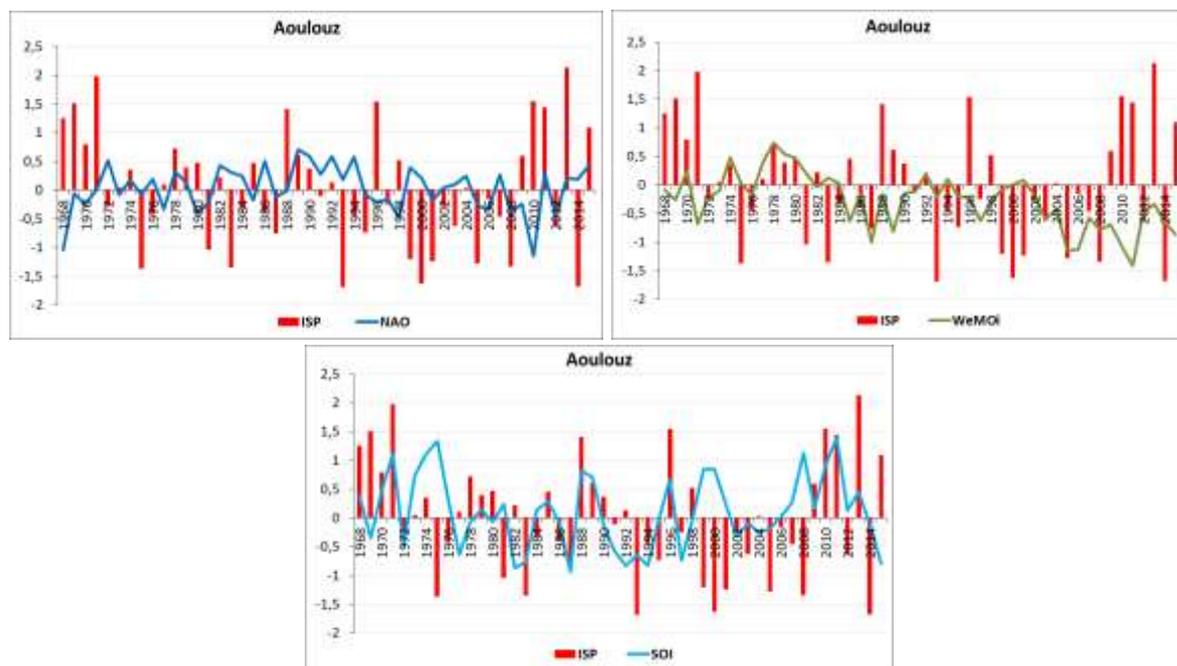


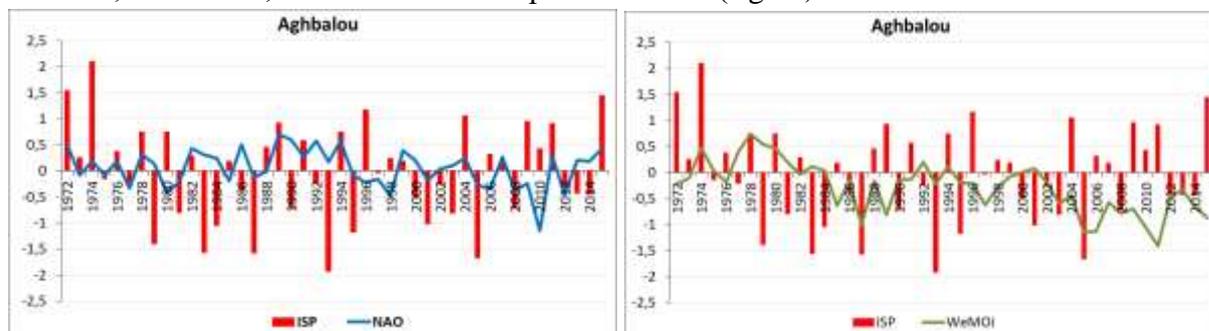
Figure 61 : Évolution des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations d'Aoulouz à l'échelle annuelle, au cours de la période 1968-2015.

Pour conclure, l'analyse des composites nous a donc permis, de constater que la phase positive du mode NAO et WeMOI, coïncide assez fréquemment, avec des déficits pluviométriques au bassin versant de Souss-Massa.

2. Bassin versant de Tensift :

Au niveau des trois stations du bassin versant de Tensift durant 44 ans (1972-2015), la corrélation de leur indice « SPI » avec les trois modes de téléconnexion (NAO, WeMOI et SOI), n'a pas révélé des valeurs significatives. Ce qui montre la faible influence de ces modes, sur le régime pluviométrique de ces stations.

Alors, à l'échelle annuelle, l'indice « SPI » a montré que les années sèches à Aghbalou, correspondent aux années 1979, 1983, 1984, 1987, 1993, 1995, 2001, 2005, dont 62% coïncident avec la phase positive de NAO et 50% avec la phase positive de WeMOI, alors que 37% avec la phase positive de SOI. Par contre, les pics des épisodes humides 1972, 1974, 1996, 2004 et 2015, peuvent être mis en relation, avec un faible indice négatif de NAO et WeMOI, à l'inverse, avec un fort indice positif de SOI (fig.62).



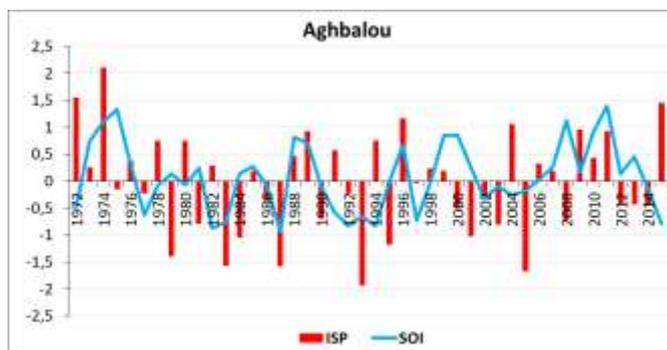


Figure 62 : Évolutions des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations d'Aghbalou à l'échelle annuelle au cours de la période 1972-2015.

Les variations annuelles de l'indice SPI des précipitations à Chichaoua au cours de la période d'étude ont montré que les épisodes de 1981, 1983, 1993, 2001, 2005 et 2012 présentent les épisodes forts et extrêmement secs de la période 1972-2015. Avec un calcul simple on trouve que 33% de ces périodes coïncident avec les phases positives de NAO et 66% avec la phase positive de WeMOI, Alors que 50% de ces épisodes secs sont liés à la phase positive du mode SOI. En contraste, le pic des années humides enregistré en 1974, 1978, 1982, 1996, 1997, 2006 et 2009 peut être mis en relation avec un faible indice négatif de NAO et WeMOI, alors que, cette relation assez significatif avec la phase positif de SOI (fig.63).

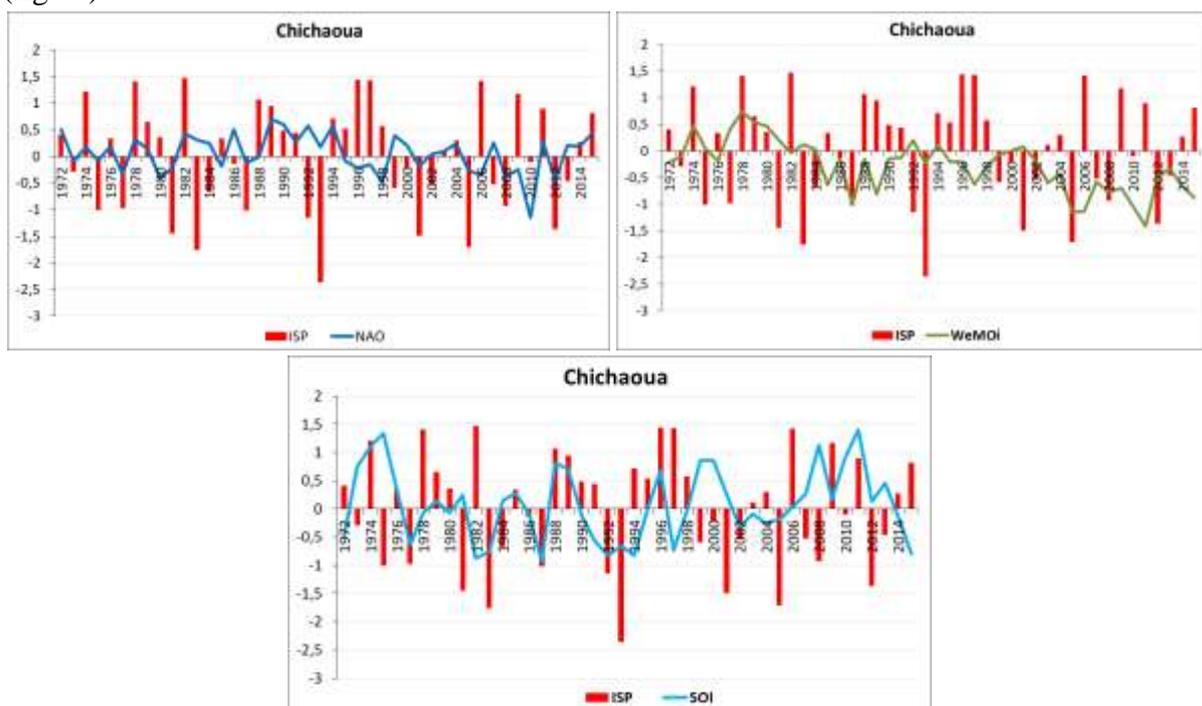


Figure 63 : Évolution des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations de Chichaoua à l'échelle annuelle, au cours de la période 1972-2015.

Pour la station d'Adamna à l'échelle annuelle (1978-2015), l'indice SPI a montré que les années 1981, 1983, 1987, 1992, 1995, 2007 et 2008 sont des années les plus sèches à cette station. Alors, avec un calcul simple, on trouve que 57% de ces périodes coïncident avec les phases positives de NAO et WeMOI, ce qui explique la réduction de la pluviométrie au cours de ces périodes et ceci est aussi expliqué par l'effet réduit de ces modes qui reste généralement faible. Alors que, presque 71% de ces épisodes secs, sont liés à la phase positive

du mode SOI. En revanche, le pic des épisodes humides 1988, 1996, 1997, 2010 et 2011, peut être mis en relation, avec un très fort indice négatif de NAO et WeMOI, notamment, les années 1997, 2010 et 2011, à l'inverse, avec un très fort indice positif de SOI (fig.64).

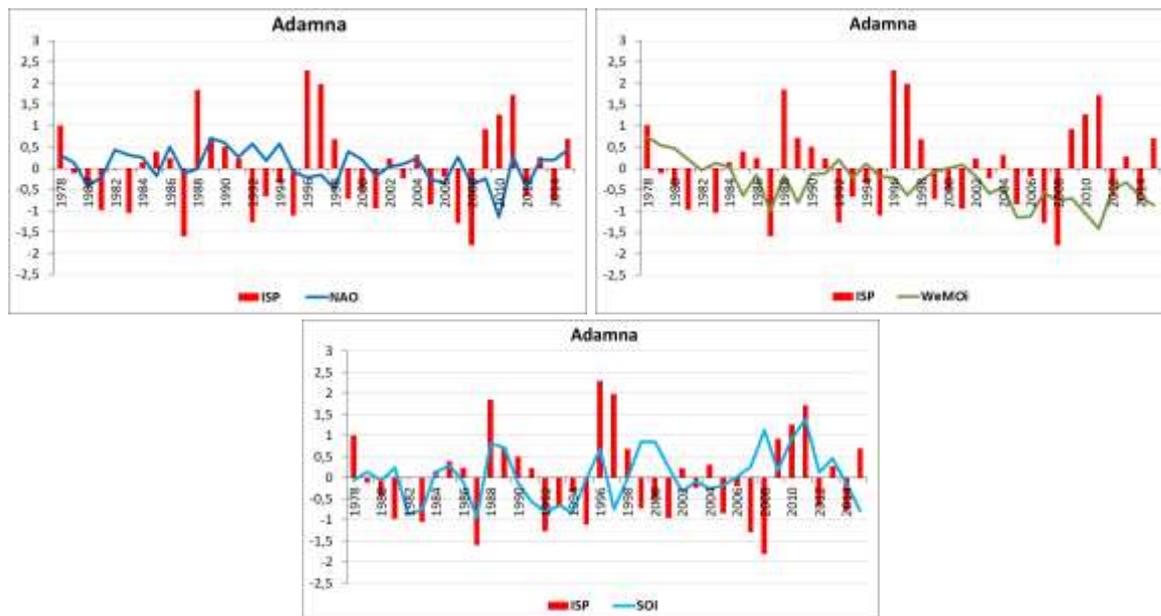


Figure 64 : Évolution des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations d'Adamna à l'échelle annuelle, au cours de la période 1978-2015.

Nous avons analysé les corrélations entre les 6 séries pluviométriques et les 3 indices climatiques (NAO, WeMOI et SOI) à l'échelle annuelle. Il apparaît que, les précipitations annuelles sont positivement corrélées avec NAO, WeMOI et SOI. La corrélation positive signifie que les précipitations de NAO, WeMOI évoluent dans le même sens à l'échelle temporelle, alors que le SOI évolue à l'inverse de NAO, WeMOI à l'échelle temporelle, pour les deux bassins de Souss-Massa et de Tensift. L'analyse des relations entre les épisodes secs (ISP) et les phases positives de NAO et WeMOI, met en évidence, des corrélations significatives dans les stations de Souss-Massa et faibles pour le Tensift. Dans l'ensemble, il apparaît que les deux bassins sont influencés par les trois indices (NAO, WeMOI et SOI), particulièrement le bassin versant de Souss-Massa.

Axe 3 : Le domaine d'étude face aux changements climatiques :

Les changements climatiques et leurs conséquences, constituent sans aucun doute, un des plus gros défis auxquels nos sociétés sont aujourd'hui confrontées. Face à cette réalité qui ne saurait être ignorée, la communauté internationale s'est mobilisée et se mobilise, notamment, au travers des négociations internationales sur le climat, sous couvert de la Convention Cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Si des progrès ont jusqu'à présent été trop limités, au regard des enjeux, l'établissement de l'accord de Paris, lors de la 21ème Conférence des Parties à la CCNUCC (CdP21) en Décembre 2015, a marqué une étape cruciale de ces négociations. La CdP22 à Marrakech, doit maintenant s'attaquer aux défis de la mise en œuvre.

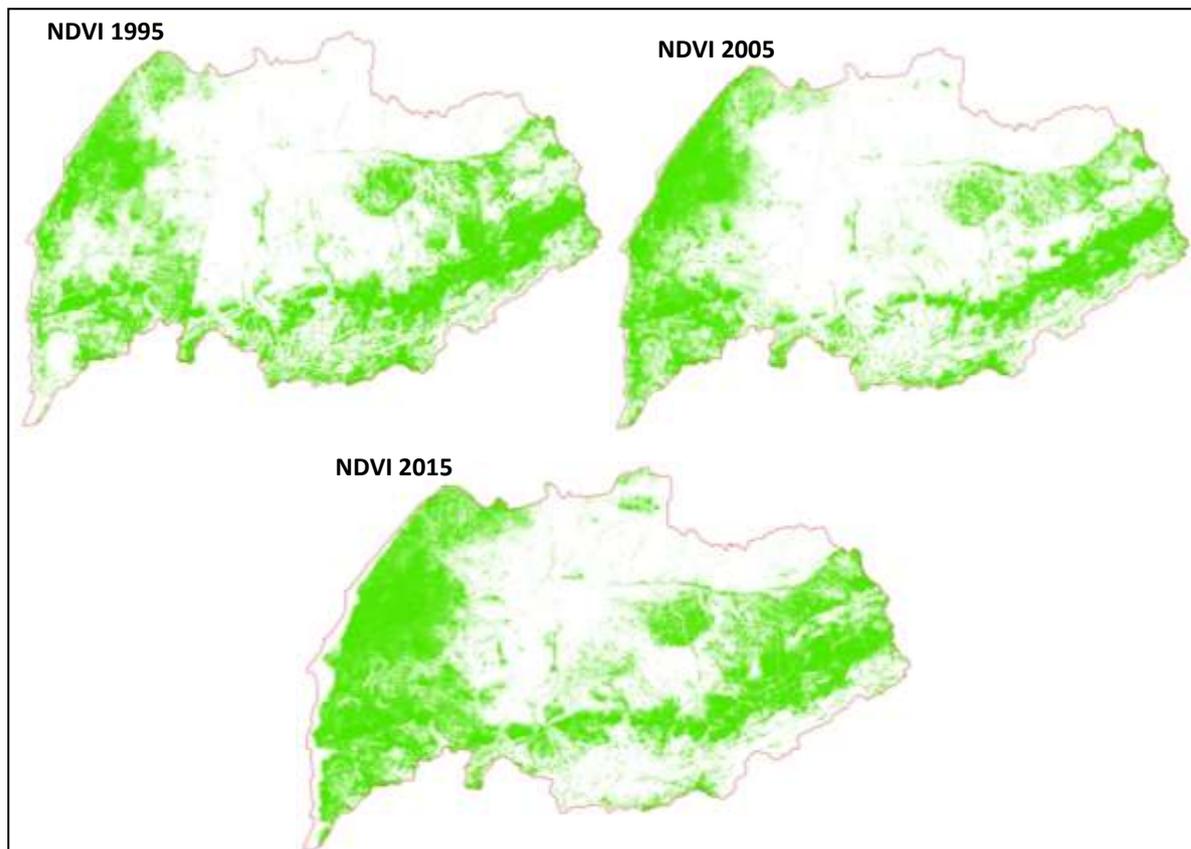
I. L'impact des changements climatiques sur les secteurs socio-économiques dans le bassin versant du Tensift :

Les changements climatiques deviennent un sujet de grande préoccupation. Le bassin versant de Tensift ne fait pas l'exception avec d'autres régions du Maroc. Il est aussi exposé aux effets néfastes, liés à des changements climatiques. Pour l'illustration de ces changements, deux paramètres importants ont été pris en considération, notamment, les précipitations et la température (Salama et al, 2010).

Le changement climatique représente une vraie menace, pour la croissance du développement local, et aux objectifs du millénaire pour le développement (PNUD, 2007). Les pays pauvres, précisément les pays tiers-mondistes, sont les plus vulnérables aux effets du changement climatique, notamment, à cause de leur dépendance à l'égard des rendements de l'agriculture sous pluie, de la pauvreté et du manque de capacités des populations rurales. Les effets du changement climatique, sont déjà évidents. En effet, les projections correspondant à de nombreux scénarios montrent que, le rendement agricole, et surtout en céréaliculture diminue. Les pays sont plus sensibles au climat (sécheresse ; pluie), et les événements extrêmes accentueront les contraintes subies par les ressources et les infrastructures, ainsi que les atteintes à la sécurité alimentaire et à la santé et freineront en outre le développement local (CC-DARE, 2011).

Le domaine d'étude subit l'impact du changement climatique, comme il ressort des études nationales réalisées à ce jour. Celles-ci (DMN, 2007) ont montré que, durant les quarante cinq dernières années, les régions qui étaient classées sous climat humide et subhumide régressent au profit des régions à climat semi-aride et aride, en témoignent, l'augmentation de la température annuelle moyenne estimée à 0,16°C par décennie et la baisse des précipitations printanières de 47% à l'échelle nationale. Les changements climatiques représentent donc, un enjeu majeur pour l'économie et la croissance, dans notre domaine d'étude. En effet, les événements extrêmes tels que la sécheresse et les inondations, et la forte dépendance de l'agriculture aux pluies, contribuent à la vulnérabilité locale aux changements climatiques. En outre, les ressources naturelles, en particulier les ressources en eau, qui représentent la plus grande partie des moyens de subsistance des populations, seront sérieusement affectées. En réalité, les activités et les ressources dont vivent les populations d'une région, sont tributaires des conditions climatiques car, leur état ne leur permettent pas l'accès aux technologies modernes (CC-DARE, 2011).

De plus, le climat subdésertique de cette région, handicape toutes les cultures à ciel ouvert telle la céréaliculture. En plus, la nappe phréatique est surexploitée par les cultures sous serres, malgré l'avancée technique dont bénéficient ces cultures en termes de forage, d'extraction, d'irrigation et de gestion d'eau. Par ailleurs, les plaines intérieures de cette région font face de plus en plus, à la désertification des sols et à l'invasion des criquets, rendant ainsi difficile, d'entretenir une agriculture rentable et prospère.



Carte 22 : Cartes de l'évolution du couvert végétal dans le bassin versant de Tensift (NDVI 1995-2005-2015).

II. L'impact des changements climatiques, sur les secteurs socio-économiques dans le bassin de Souss-Massa :

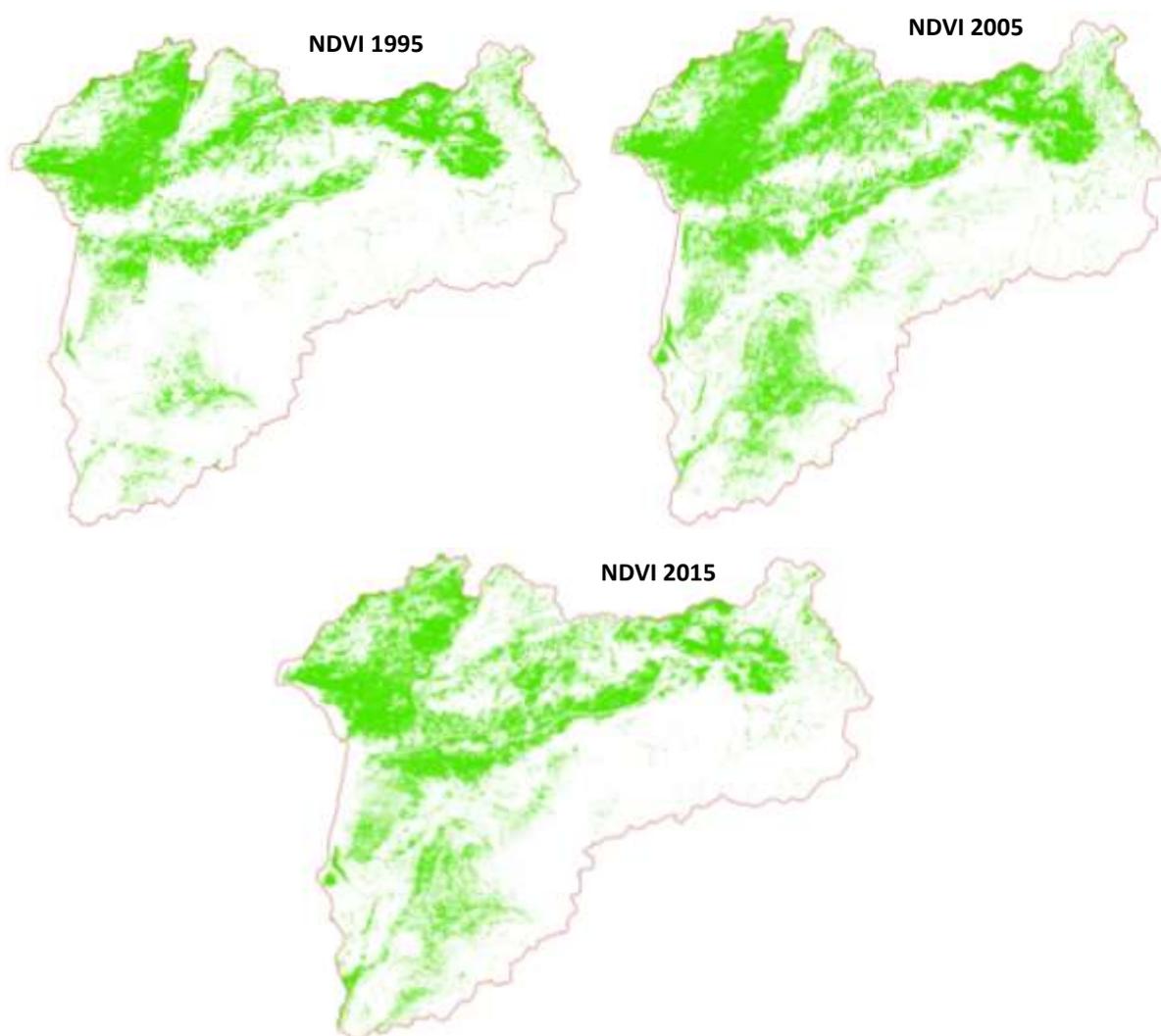
L'aggravation des conditions climatiques dans le bassin de Souss-Massa risque de conduire à de nouvelles sécheresses, à des pénuries d'eau et à l'augmentation de la température au cours des prochaines décennies.

L'agriculture et la foresterie sont deux secteurs qui sont de plus en plus exposés à des aléas climatiques d'origines diverses. Il s'agit, soit d'extrêmes climatiques, soit d'évolutions à plus ou moins long terme.

La vulnérabilité des systèmes agricoles et forestiers aux aléas climatiques, caractérise le degré auquel ces systèmes peuvent être affectés négativement par ces aléas. Pour les plantes et les animaux, la vulnérabilité dépend de plusieurs facteurs : la zone géographique, la topographie, l'espèce ou la race, l'âge, la nature et l'occupation des sols, le mode de conduite... (Reinsinger et al, 2013)

Par ailleurs, les ressources en eau deviennent de plus en plus rares, rareté qui se posera avec acuité, dans les années à venir. À cet égard, la sécheresse est une condition climatique régnant dans une région géographique où les précipitations sont très nettement inférieures aux valeurs habituellement escomptées. Ce phénomène, extrêmement complexe, est caractérisé par l'occurrence d'un déficit hydrique, dû à divers facteurs tels que les conditions météorologiques, hydrologiques et agronomiques, accentuée par l'accroissement démographique et les exigences de la croissance économique et du développement (OMM, 1992).

Globalement, les années de sécheresse sont caractérisées par des précipitations plus faibles que la normale (-20% à - 60%), pendant une période prolongée (une saison ou plus), combinées à des taux d'évaporation élevés (OMM, 1992). La sécheresse occasionne une baisse du niveau des retenues d'eau des barrages et des lacs, une baisse des débits et une réduction de l'humidité du sol, ainsi que des réserves d'eau souterraine. Elle est aussi, un facteur de dégradation des autres ressources naturelles telles que, la végétation, les parcours pastoraux et les sols, accentuant ainsi le processus de désertification. Dans ce contexte, le bassin versant de Souss-Massa connaît une pression agropastorale et urbaine, qui influence l'activité de production végétale de ce bassin. Cette pression anthropique se conjugue avec des variations du climat, depuis le début des années 1980. En outre, la plupart des nappes connaissent une baisse sans précédent, particulièrement, dans la région du Souss-Massa qui est marquée par des déficits hydriques aigus, expliqués par le développement de l'agriculture, du tourisme, de la pression démographique et surtout, une des zones les plus concernées par l'impact des changements climatiques (AFD, 2015).



Carte 23 : Cartes de l'évolution du couvert végétal dans le b.v de Souss-Massa (NDVI 1995-2005-2015).

III. La côte atlantique marocaine et le défi du changement climatique :

Les zones côtières étaient et demeurent, les espaces géographiques les plus exploités en raison de la richesse de leurs ressources. Les littoraux subissent les pressions anthropiques, liées aux activités économiques et aux flux démographiques, qui se font de plus en plus importants. Le changement climatique est susceptible, d'aggraver de plus en plus les problèmes existants et de créer de nouveaux risques (El Filali et al, 2003).

Le littoral est un milieu mouvant, soumis aux forces considérables de la mer, du vent et des fleuves côtiers, et que l'Homme a toujours cherché à maîtriser, pour mieux valoriser et sécuriser ses activités. Aujourd'hui, la logique s'inverse : avec les changements climatiques et l'élévation progressive du niveau de la mer, la gestion des risques sur le littoral, doit redonner de l'espace aux phénomènes naturels, utiliser les milieux sauvages comme tampon face aux événements et éloigner, autant que possible, les enjeux des secteurs vulnérables (El Filali et al, 2003).

Au cœur de la machine climatique terrestre, les océans subissent de plein fouet le changement climatique. Les effets observés aujourd'hui sur le milieu océanique sont nombreux : changements de la température de l'eau et des teneurs en oxygène, acidification, élévation du niveau de la mer, etc. Ces modifications physiques et biogéochimiques, et dans une moindre mesure, la sévérité des événements extrêmes, influent sur les conditions de vie dans les océans (El Ayoubi et al, 2003). La répartition géographique des espèces, ainsi que la dynamique des écosystèmes vont subir de profondes perturbations dans les décennies à venir et affecter les pêcheries au niveau mondial. Le déplacement des espèces vers les pôles conduira en particulier, à une baisse des ressources halieutiques dans les régions tropicales compromettant la sécurité alimentaire dans nombre de pays du Sud (Castaño et al, 2014).

Le Maroc, avec ses 2934 kilomètres de côte atlantique, est la première puissance halieutique en Afrique et dans le monde arabe. L'exploitation des ressources halieutiques contribue d'une manière significative à la richesse nationale et à l'équilibre de la balance commerciale, notamment, depuis les années 1970 (Delafon, 2005). Cette richesse halieutique est due principalement au phénomène de l'upwelling, qui permet la remontée avec les courants froids de sels minéraux, favorisant ainsi, le développement de la faune maritime (Bakun, 1990). En effet, la zone côtière marocaine soumise de plus en plus à une urbanisation accrue est fortement menacée par toutes les formes de dégradation : érosion, pollution, inondation, etc. Toutefois, dans le contexte des changements climatiques, elles sont de plus en plus artificialisées et densément peuplées, ce qui les rend particulièrement exposées à divers aléas météo-marins (Levrel et al, 2012).

Il n'est pas inutile de rappeler ici, que les évidences scientifiques suggèrent que l'élévation accélérée du niveau de la mer et l'intensification des ondes de tempête, liés au changement climatique, sont des menaces mondiales graves pour les zones côtières et les sociétés humaines (IPCC, 2012). Tous les modèles globaux montrent, une tendance à une élévation future. Il est très probable que le niveau moyen de la mer a augmenté à un taux moyen de 1,7 mm/an entre 1900 et 2010 et à un taux de 3,2 mm/an de 1993 à 2010. L'expansion thermique des océans et la fonte des glaciers ont été les plus gros contributeurs, représentant plus de 80% de l'élévation globale du niveau moyen de la mer sur cette

dernière période (Delafon, 2005). Toutefois, les tendances observées de la hausse du niveau moyen des mers, ainsi que celles projetées pour 2100 et au-delà, indiquent avec un degré de confiance élevée, que les systèmes côtiers et les zones basses, seront de plus en plus exposés à des niveaux marins extrêmes et à leurs impacts négatifs (GIEC, 2014).

La présence d'enjeux (villes, villages et activités humaines) dans la zone littorale, conduit à une exposition croissante aux risques. Toutefois, l'évaluation des actifs exposés aux risques n'est pas simple, en raison de la diversité de ces derniers. En outre, l'évaluation de la vulnérabilité de l'actif exposé, dépend de chaque aléa, rendant la tâche plus complexe. À cet égard, la Banque mondiale a classé le PIB côtier du Maroc dans le Top 10 des pays à risque, avec l'intensification des ondes de tempête. Par conséquent, compte tenu des effets de l'empiètement humain actuel et futur sur la côte, les autorités locales sont confrontées à la tâche, de plus en plus complexe, d'équilibrer entre le développement et la gestion des risques côtiers, en particulier, la submersion et l'érosion côtière (Ministère de l'Équipement, du transport et de la Logistique, 2014).

CONCLUSION

L'analyse des indices de sécheresse dans le bassin versant de Tensift et de Souss-Massa révèle généralement des périodes excédentaires et déficitaires, ponctuées par des années sèches ou humides au cours de la période étudiée. Pour la station Aoulouz, Taroudant et Agadir, les années de sécheresse les plus remarquables en termes d'intensité ont été 1999 et 2008 (pour Aoulouz), 1991-1995 (pour Taroudant) et 1999-2008 (pour Agadir). Ces épisodes secs ont été qualifiés de forts et extrêmement sévères en termes d'intensité.

Dans le bassin versant de Tensift, l'étude des indices de sécheresse révèle deux périodes distinctes. Les années relativement excédentaires vont de 1988 à 1998, suivies des années déficitaires entre 1999 et 2008. Ces périodes sont interrompues par des années sèches ou humides en fonction des années. La période entre 1996-1998 est remarquablement humide. Les années 1983 et 1993 sont considérées comme extrêmement sévères pour les trois stations.

Les corrélations entre les 6 séries pluviométriques et les 3 indices climatiques (NAO, WeMOI et SOI) à l'échelle annuelle montrent que les précipitations annuelles sont positivement corrélées avec NAO, WeMOI et SOI. La corrélation positive signifie que les précipitations suivent la même tendance temporelle que NAO et WeMOI, tandis que SOI évolue dans le sens inverse de NAO et WeMOI pour les deux bassins de Souss-Massa et de Tensift. L'analyse des relations entre les épisodes secs (ISP) et les phases positives de NAO et WeMOI révèle des corrélations significatives dans les stations de Souss-Massa mais des corrélations faibles pour le Tensift. Dans l'ensemble, il apparaît que les deux bassins sont influencés par les trois indices (NAO, WeMOI et SOI), en particulier le bassin versant de Souss-Massa.

En outre, les changements climatiques représentent un défi majeur pour l'économie et la croissance du développement local. Le changement climatique constitue un obstacle à la réalisation des objectifs du développement local dans la région d'étude et nécessite une prise en compte sérieuse dans les programmes de développement.

CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE

Dans ce travail, on a étudié l'évolution récente du régime pluviométrique au Sud-Ouest du Maroc et on a tenté d'évaluer son impact, de l'extension spatio-temporelle de la sécheresse au Sud-Ouest du Maroc. Les ruptures ont été détectées au cours de la période de mesure la plus complète disponible (1968-2015 et 1972-2015). L'étude pluviométrique a montré, par l'application des méthodes statistiques, de fortes irrégularités du régime pluviométrique au cours de la période étudiée :

a) Variabilité et irrégularité pluviométrique :

- ✍ Les bassins versants de Tensift et de Souss-Massa présentent une variabilité et une irrégularité spatio-temporelle marquée des précipitations.
- ✍ Les précipitations moyennes mensuelles sont encore plus irrégulières que les hauteurs annuelles, avec une saison sèche d'avril à octobre et une saison humide de novembre à mars, marquée par des précipitations maximales en décembre et janvier.

b) Évolution des températures :

- ✍ À l'échelle annuelle, il y a une tendance à l'augmentation des températures dans les deux bassins versants.
- ✍ À l'échelle mensuelle, les températures varient d'un mois à l'autre, avec des températures élevées en été et des températures plus basses en hiver.

c) Bilan hydrique :

- ✍ Le calcul du bilan hydrique par la méthode de Thornthwaite aux stations de Marrakech, Takerkoust (Tensift), Aoulouz, Taroudant et Agadir (Souss-Massa) montre une évapotranspiration potentielle élevée de mai à octobre.

d) Indices de sécheresse :

- ✍ Les indices de sécheresse étudiés ont permis de déterminer l'intensité et la fréquence des périodes de sécheresse au Sud-Ouest du Maroc au cours des périodes 1968-2015 et 1972-2015.
- ✍ Les années les plus sévères en termes de sécheresse ont été identifiées, telles que 1999 et 2008 (Aoulouz), 1991-1995 (Taroudant) et 1999-2008 (Agadir).
- ✍ L'alternance des années sèches et humides a été observée, avec des fréquences et des intensités relativement similaires pour les trois stations de Souss-Massa.
- ✍ La corrélation entre l'indice de sécheresse SPI et les modes de téléconnexion (NAO, WeMOI et SOI) a montré des valeurs significatives pour les stations de Souss-Massa, indiquant une forte influence de ces modes sur le régime pluviométrique de ces stations. En revanche, cette corrélation était faible pour les stations de Tensift, suggérant une influence limitée des modes de téléconnexion sur leur régime pluviométrique.

En conclusion, cette étude met en évidence la forte variabilité du climat et du régime pluviométrique au Sud-Ouest du Maroc, ainsi que l'impact potentiel des changements climatiques sur la sécheresse dans la région. Les résultats soulignent l'importance de suivre de

près l'évolution climatique pour mieux anticiper et gérer les périodes de sécheresse et leurs conséquences sur l'environnement et l'agriculture locales.

TROISIÈME PARTIE :

LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU COURS DES DEUX DERNIERS MILLENAIRES AU SUD-OUEST DU MAROC

INTRODUCTION

Les sédiments marins revêtent une importance cruciale en fournissant des informations précieuses sur les changements climatiques et océanographiques passés. Ils permettent d'étudier divers aspects tels que les fluctuations de la productivité biologique, l'état des fonds marins, la composition de l'eau de mer et des sédiments, ainsi que des éléments comme l'activité tectonique, la force des vents, et diverses sources d'origine volcanique, hydrothermale, hydrogène, éolienne et fluviale. Étant donné que ces changements ne peuvent pas être directement observés, des données indirectes, appelées « proxies » géochimiques, ont été développées au fil des décennies pour reconstituer les variations climatiques et les conditions environnementales du passé (Schneider et al., 1997). La plupart de ces « proxies » présentent des limitations qui restreignent leur application à des environnements spécifiques. De plus, les influences de processus secondaires, pouvant altérer ou masquer les signaux primaires, ne sont que partiellement comprises (Shaw et al., 1990). Par conséquent, des études approfondies à haute résolution des données géochimiques indirectes dans différents environnements marins sont nécessaires pour améliorer la fiabilité de ces indicateurs.

Dans le cadre de cette étude, nous aborderons deux objectifs principaux. Tout d'abord, nous effectuerons une caractérisation globale des sédiments marins, en examinant la distribution des éléments chimiques et en étudiant leurs interactions géochimiques. Ensuite, nous exploiterons des données à haute résolution pour analyser les variations climatiques dans la région d'étude à travers l'étude des sédiments marins. Nous chercherons notamment à identifier les changements climatiques et à estimer les températures de surface de la mer en utilisant deux carottes sédimentaires spécifiques.

Cette analyse reposera sur une stratigraphie qui se basera sur les relations entre les éléments chimiques, les rapports entre ces éléments, ainsi que les valeurs de Mg/Ca des foraminifères présents dans les sédiments des eaux profondes, prélevés à deux emplacements dans le Sud-Ouest du Maroc. Enfin, nous interpréterons certains indicateurs géochimiques, appelés « paléproxies », pour la période des 2000 dernières années.

Dans cette section, nous présenterons des données géochimiques à haute résolution provenant de deux sites, l'un marin et l'autre continental, situés dans la région du Sud-Ouest du Maroc. Nous combinerons ces ensembles de données avec les résultats obtenus à partir de sites géographiquement proches de la côte marocaine. L'objectif principal de cette analyse est de comparer et d'appliquer des méthodes géochimiques et sédimentologiques afin de reconstituer les changements climatiques et océaniques survenus au cours des 2000 dernières années dans le Sud-Ouest du Maroc, ainsi que de mieux comprendre la relation entre les environnements terrestres et marins.

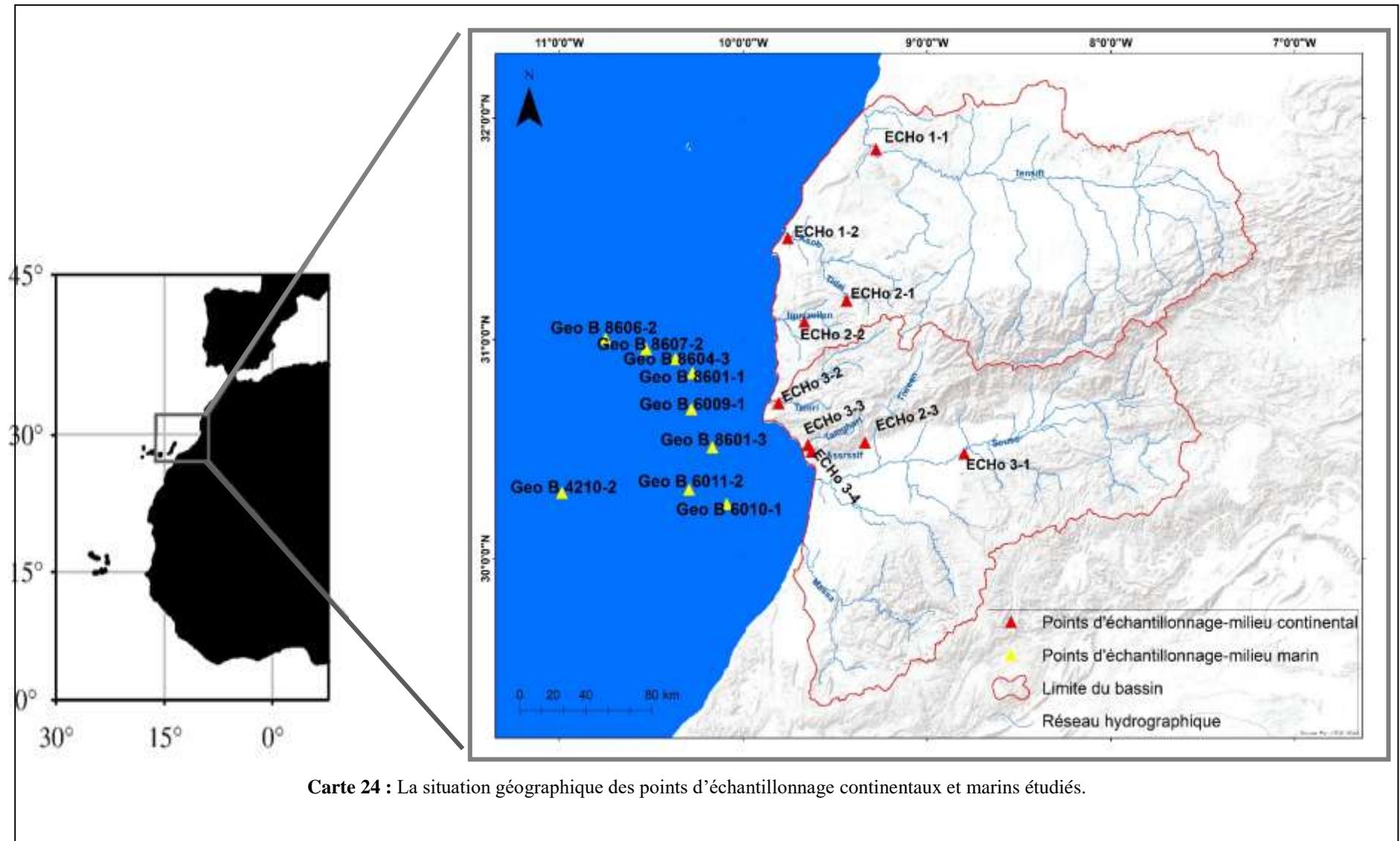
CHAPITRE N° 1 :

APPORT DE L'ÉTUDE GÉOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS DE LA SURFACE CONTINENTALE ET MARINE DU DOMAINE D'ÉTUDE : CARTOGRAPHIE ET ANALYSE

INTRODUCTION

Les échantillons prélevés ont été soumis à une série d'analyses à l'aide de différentes techniques. Les résultats obtenus dans le cadre de ces analyses serviront en premier lieu à effectuer une caractérisation chimique des sédiments présents à la fois en surface dans la région continentale (bassin de Tensift, Souss-Massa) et en milieu marin (la façade atlantique) au Sud-Ouest du Maroc (voir carte 2). L'objectif principal de cette étape est de mettre en évidence la distribution des composants chimiques et de comparer les caractéristiques entre les zones terrestres et océaniques.

L'analyse vise à mesurer la concentration totale des éléments, qu'ils soient majeurs ou en traces. Ces données nous permettront de quantifier et de caractériser la répartition de ces éléments dans chaque échantillon. Les deux types d'échantillons, à savoir les échantillons continentaux et marins, ont été analysés au moyen de la spectrométrie par fluorescence des rayons X (XRF) pour déterminer leur composition chimique. Le scanner XRF est situé à l'Université de Brême en Allemagne, et il s'agit d'un système d'analyse extrêmement précis et non destructif des sédiments en surface. Il est couramment utilisé pour analyser divers matériaux, qu'ils soient solides, liquides, en poudre, filtrés, ou autres. Au total, vingt-et-un échantillons ont été analysés, couvrant huit éléments majeurs : l'alumine (Al), le calcium (Ca), le fer (Fe), le potassium (K), le magnésium (Mg), le silicium (Si), le titane (Ti) et le sodium (Na). De plus, treize éléments en traces ont été examinés, parmi lesquels des éléments alcalino-terreux et de transition : le zirconium (Zr), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le rubidium (Rb), le vanadium (V), le zinc (Zn), le baryum (Ba), le manganèse (Mn), le phosphore (P), le soufre (S) et le strontium (Sr).



Axe 1 : Les bassins de Tensift et de Souss-Massa : analyse de la variation géochimique spatiale et temporelle des sédiments de surface continentale

L'échantillonnage continental a été réalisé lors de la campagne d'échantillonnage ECHO, dans le cadre du programme Maroc-allemand pour la Recherche Scientifique PMARS III, en avril 2017. Ces échantillons ont été prélevés à partir de neuf sites, localisés sur différents tributaires et cours d'eau au Sud-Ouest du Maroc (tabl.21).

Les neuf sédiments de surface ont été collectés le long des deux bassins versants Tensift et Souss-Massa au Sud-Ouest du Maroc dans des zones d'accumulation d'origine terrigène. Dans la zone d'échantillonnage, nous échantillons, en allant de la surface, jusqu'à près de 5cm de profondeur, en prélevant dans différentes berges des Oueds (écho1-1a1, écho1-1a2... etc.), proches les unes des autres, afin d'avoir des sédiments de mêmes caractéristiques. Ainsi ceci permet des prises dans deux places, proches de la partie humide et loin. Cette stratégie d'échantillonnage vise, à obtenir suffisamment de matière dans chaque échantillon.

À travers ces échantillons, nous déterminons les variations géochimiques, par rapport aux accumulations proches des côtes dans le Sud marocain.

Tableau 21 : Informations détaillées sur les prélèvements continentaux.

Station	Oued	Bassin versant	Type de prélèvement	Long.(W)	Lat. (N)	Z	Date
ECHO 1-1	Tensift	Tensift	Sédiment de surface	-9,27	31,86	20m	08/04/2017
ECHO 1-2	Ksob	Tensift	Sédiment de surface	-9,75	31,46	1m	08/04/2017
ECHO 2-1	Tidzi	Tensift	Sédiment de surface	-9,43	31,177	110m	09/04/2017
ECHO 2-2	Igouzoulen	Tensift	Sédiment de surface	-9,66	31,08	160m	09/04/2017
ECHO 2-3	Tiween	Souss-Massa	Sédiment de surface	-9,33	30,53	420m	09/04/2017
ECHO 2-4	Tamri	Souss-Massa	Sédiment de surface	-9,80	30,71	31m	09/04/2017
ECHO 3-1	Souss	Souss-Massa	Sédiment de surface	-8,79	30,48	222m	10/04/2017
ECHO 3-3	Tamraght	Souss-Massa	Sédiment de surface	-9,64	30,52	4m	10/04/2017
ECHO 3-4	Assrssif	Souss-Massa	Sédiment de surface	-9,62	30,49	97m	10/04/2017

I. La répartition spatiale des éléments majeurs et éléments traces, dans les sédiments continentaux :

1. Échantillon ECHO 1-1 :

La distribution des teneurs dans l'échantillon étudié, montre une teneur très élevée en Si, avec une valeur de 212925,1 mg/kg, par rapport aux autres points de prélèvement, mais contrairement aux autres échantillons, l'Al avec une valeur de 70828,88 mg/kg est l'élément le plus représentatif, suivi par le Ca avec 41339,19 mg/kg, le Fer avec 34181,43 mg/kg ainsi que le K et le Mg avec une teneur de 21984,23 mg/kg et de 16370,67 mg/kg respectivement.

Alors qu'on peut considérer le Ti (4509,42 mg/kg) et Na (4572,19 mg/kg), comme ayant de faibles teneurs. Pour les éléments traces, le S (864 mg/kg), Mn (750 mg/kg), P (333 mg/kg), Zr (193 mg/kg), Sr (136 mg/kg), montrent des teneurs très faibles. Les autres éléments traces : Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, sont très rares dans cet échantillon, ils ne dépassent pas les 100 mg/kg.

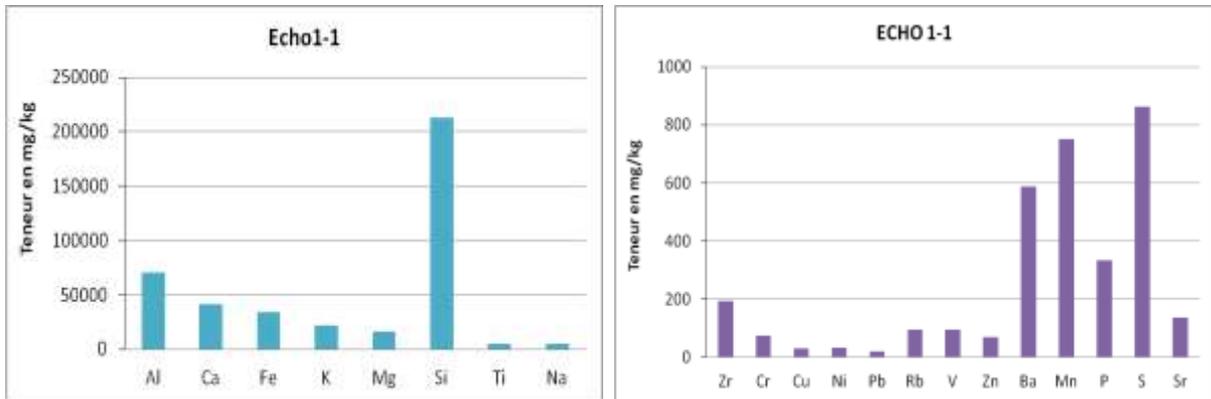


Figure 65 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « ECHO 1-1 ».

2. Échantillon ECHO 1-2 :

Pour l'échantillon ECHO 1-2, on trouve une différence majeure, par rapport aux autres échantillons, étant caractérisé par une forte teneur de Ca (118904,1 mg/kg), tandis que les teneurs en Si (115279,4 mg/kg), Al (43568,78 mg/kg), Fe (23304,78 mg/kg) et K (13416,92 mg/kg) sont beaucoup moins importantes que l'échantillon précédent. Pour les teneurs moyennes enregistrées dans cet échantillon, on trouve Mg (20833,64 mg/kg) et Ti avec une teneur de 2413,665 mg/kg. Les teneurs en éléments traces, tels que, le Ba (241 mg/kg), Mn (268 mg/kg), P (302 mg/kg) et S (858 mg/kg) sont généralement faibles. Les Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn et Sr présentent des teneurs très faibles (de 6 à 147 mg/kg) dans cet échantillon, ou bien nulles, comme le cas de Na.

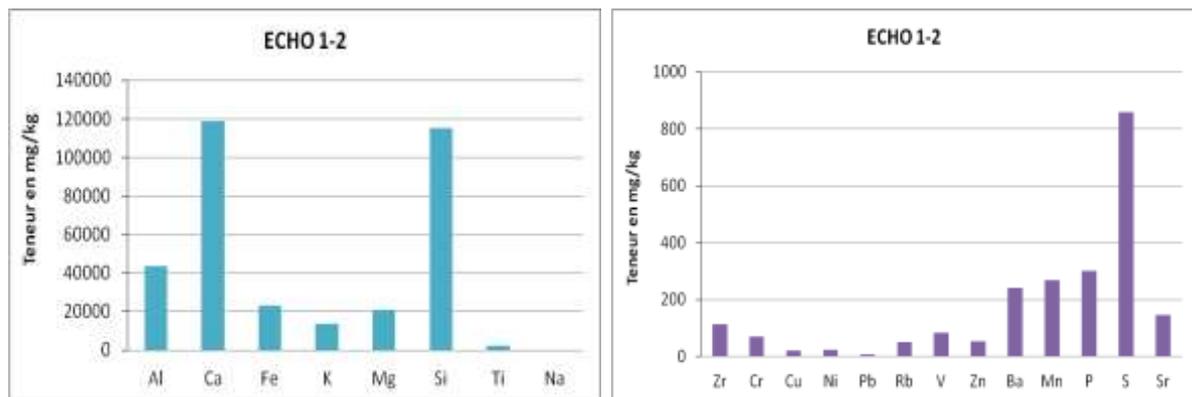


Figure 66 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « ECHO 1-2 ».

3. Échantillon ECHO 2-1 :

L'échantillon ECHO 2-1 est relativement similaire à l'échantillon ECHO 1-1. La teneur la plus forte est celle en Si, avec 163831,5 mg/kg, suivi par la teneur en Ca (109192 mg/kg), puis Al (36664,31 mg/kg), Fe (17980,65 mg/kg), Mg (17815,37 mg/kg), Ti (2783,32 mg/kg) et Na, avec une teneur de 953,67 mg/kg. Alors que, les teneurs des éléments traces, tels que, le Zr, Ba, Mn, P et S sont généralement faibles et inférieures à 800 mg/kg. Les Cr, Cu, Ni, Rb, V,

Zn, et Sr sont très faibles et varient entre 18 et 145 mg/kg, et sont presque nulles, comme le cas de Pb.

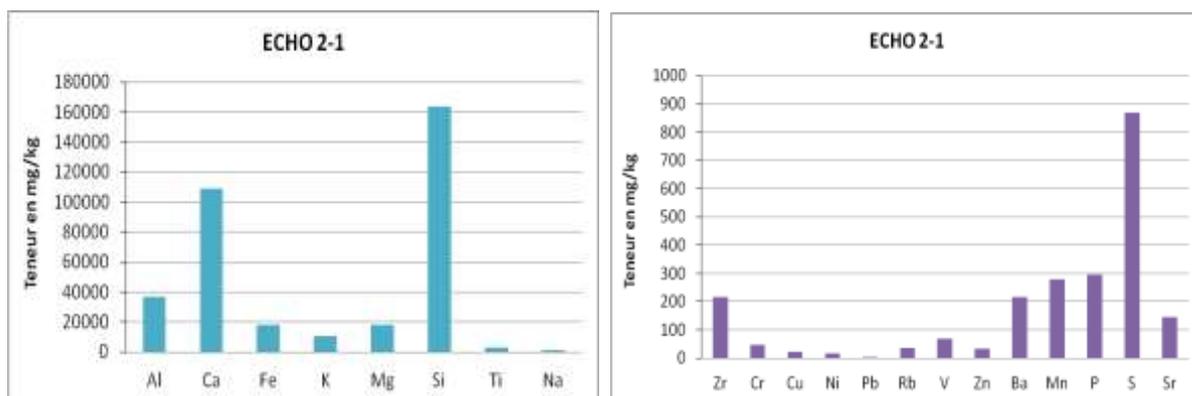


Figure 67 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « ECHO 2-1 ».

4. Échantillon ECHO 2-2 :

De même pour l'échantillon ECHO 2-3, la teneur la plus élevée est celle de Si (138278,1 mg/kg), suivi d'une teneur de Ca de 110592,2 mg/kg. Les teneurs moyennes présentes dans cet échantillon sont par ordre décroissant : Al (42884,79 mg/kg), Fe (16879,55 mg/kg), Mg (12741,89 mg/kg), K (11801,02 mg/kg), et Ti (2807,74 mg/kg). La présence des éléments traces (Zr, Ba, Mn et S) dans cet échantillon, sont faibles (de 215 à 870). Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, P, et Sr sont très faibles, avec des valeurs comprises entre 4 mg/kg et 134 mg/kg.

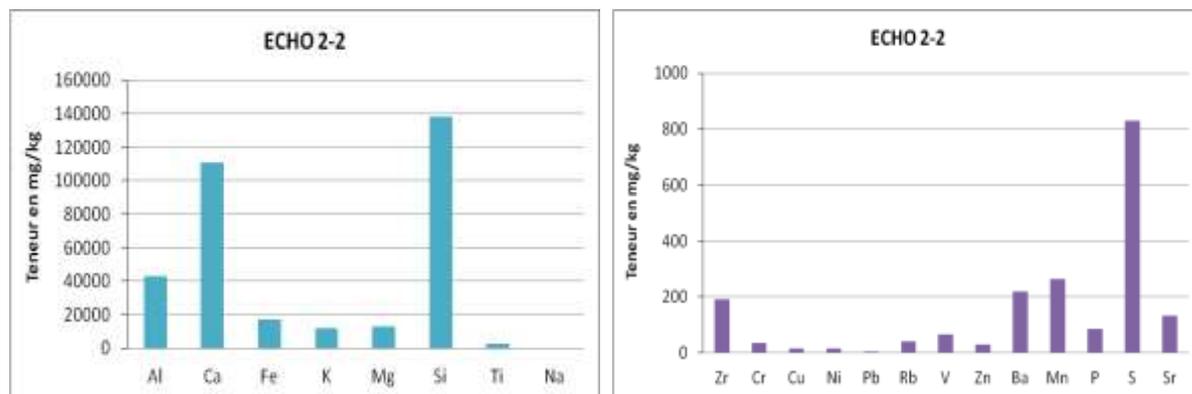


Figure 68 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « ECHO 2-2 ».

5. Échantillon ECHO 2-3 :

On observe dans cet échantillon, une forte teneur en Si (139061,6 mg/kg), par rapport aux autres éléments, suivi par des valeurs moyennes de Ca (128238,7 mg/kg), Al (54592,32 mg/kg), Fe (26799,43 mg/kg), K (18897,86 mg/kg) et Mg (17048,13 mg/kg) et de faibles teneurs de Ti (3194,21 mg/kg), et nulles pour le Na. La distribution des éléments traces dans cet échantillon, présentent des teneurs faibles en S (917mg/kg), Mn (356mg/kg), Ba (282mg/kg), Sr (203mg/kg) et P (177mg/kg). La présence des éléments traces (Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V et Zn) dans cet échantillon, restent très faibles, avec des valeurs variant entre 10 mg/kg et 125 mg/kg.

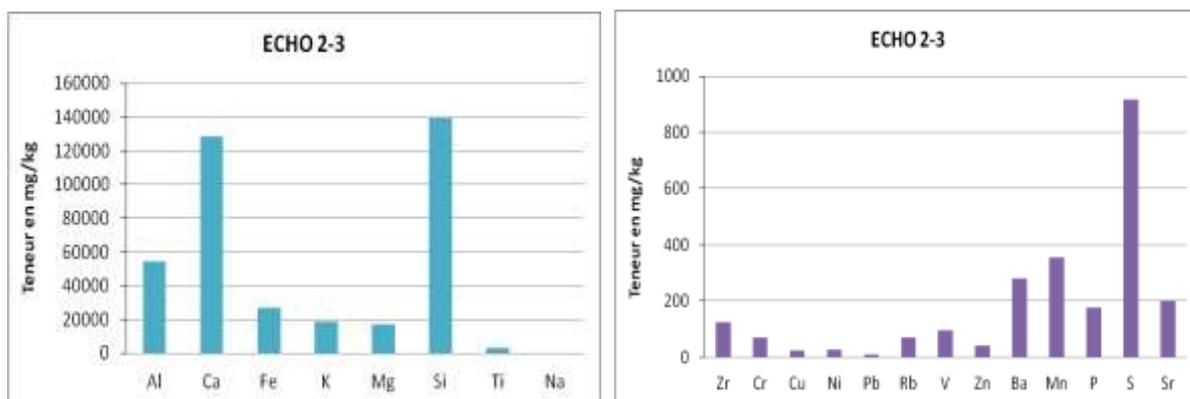


Figure 69 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « ECHO 2-3 ».

6. Échantillon ECHO 2-4 :

L'échantillon « ECHO 2-4 » présente généralement, une forte teneur en Si (156321,6 mg/kg), une teneur importante en Ca (114661,7 mg/kg), avec la présence de teneurs moyennes des éléments, tels que : l'Al (49867,55 mg/kg), Fe (20942,96 mg/kg), K (15673,67 mg/kg), Mg (13195,81 mg/kg) et Ti (3193,83 mg/kg). Les autres éléments traces Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, Ba, Mn, P, S, et Sr sont très faibles dans cet échantillon ; le Ba, Mn, S et Sr dépassent 200 mg/kg, mais les autres éléments traces varient de 5 à 156 mg/kg.

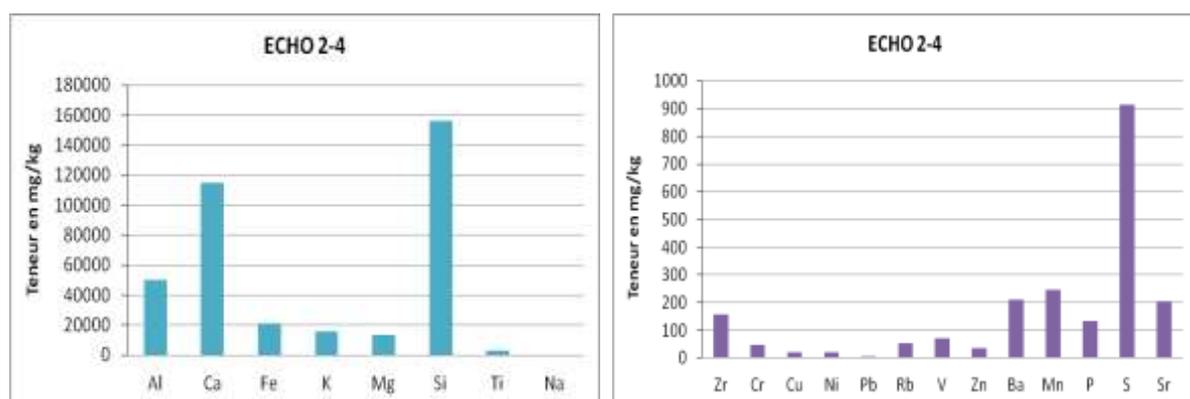


Figure 70 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « ECHO 2-4 ».

7. Échantillon ECHO 3-1 :

Dans l'échantillon « ECHO 3-1 », on trouve une forte teneur en Si, qui atteint des valeurs très élevées 178674,6 mg/kg, suivi par des teneurs plus moins importantes en Ca de 68408,39 mg/kg, par rapport aux autres échantillons. L'Al représente une valeur de 48782,56 mg/kg. Les autres éléments Mg (21974,65 mg/kg), Fr (20856,24 mg/kg) présents dans cet échantillon avec des teneurs modérées. On ne peut pas négliger la présence des autres éléments, comme le Ti (3251 mg/kg) et Na (1067 mg/kg), même si leurs teneurs sont faibles. Alors que, les autres teneurs en éléments traces : Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, Ba, Mn, P, S, et Sr sont généralement très faibles à rares (de 9 à 654 mg/kg).

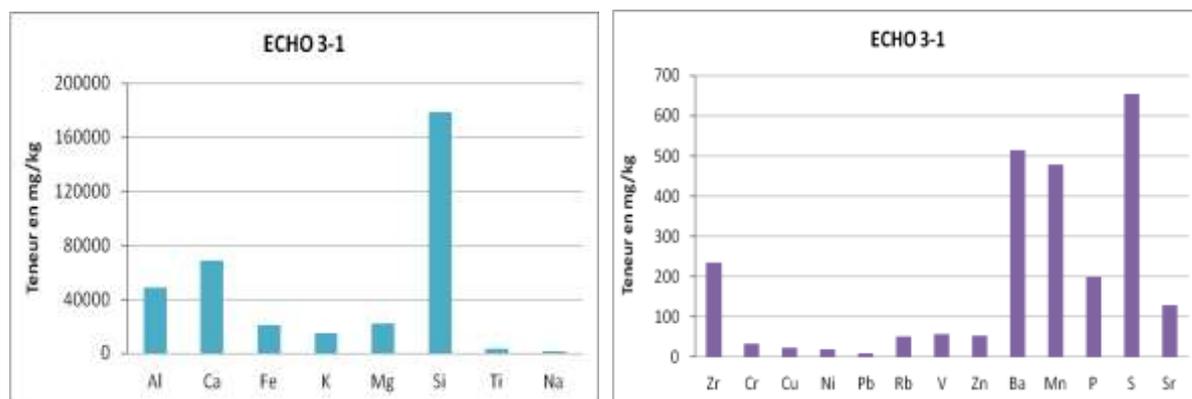


Figure 71 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « ECHO 3-1 ».

8. Échantillon ECHO 3-3 :

L'échantillon « ECHO 3-3 » est relativement similaire à l'échantillon ECHO 2-4. La teneur la plus élevée est celle de Si (157169,6 mg/kg), suivi de la teneur en Ca (107237,5 mg/kg), puis l'Al (42454,75 mg/kg). Les teneurs moyennes des éléments tels que : le Fe, K, Mg et Ti sont représentés avec 19095,57 mg/kg, 13731,93 mg/kg, 15267,36 mg/kg et 2888,96 mg/kg respectivement. Tandis que les teneurs en Zr (208mg/kg), Ba (231mg/kg), Mn (270mg/kg) et S (982 mg/kg) sont très faibles. Les autres éléments : Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, P, et Sr sont présents avec des teneurs très faibles à rares (de 4 à 196 mg/kg).

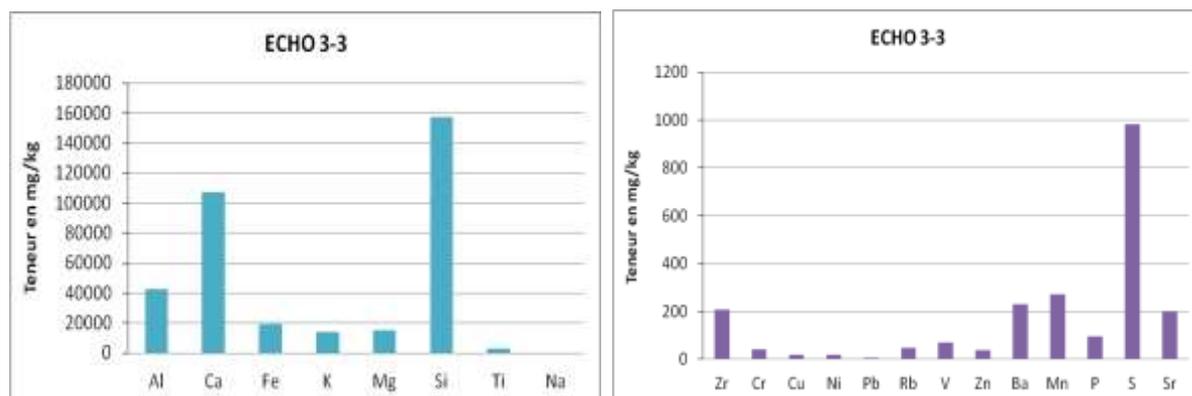


Figure 72 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « ECHO 3-3 ».

9. Échantillon ECHO 3-4 :

Dans l'échantillon « ECHO 3-4 », on trouve une teneur forte en Si qui atteint 149712,4 mg/kg, suivi de la teneur de Ca (132561 mg/kg). Les teneurs moyennes varient de 30858 mg/kg pour l'Al, 14259,78 mg/kg pour le Fe, 12299,49 mg/kg pour le Mg. Les faibles teneurs sont représentées par le K (9548,45 mg/kg) et le Ti (2162,17 mg/kg). Les éléments traces tels que : Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, Ba, Mn, P, S, et Sr présentent des teneurs très faible, fluctuant de 12 à 686 mg/kg, et nulle pour le cas du Pb.

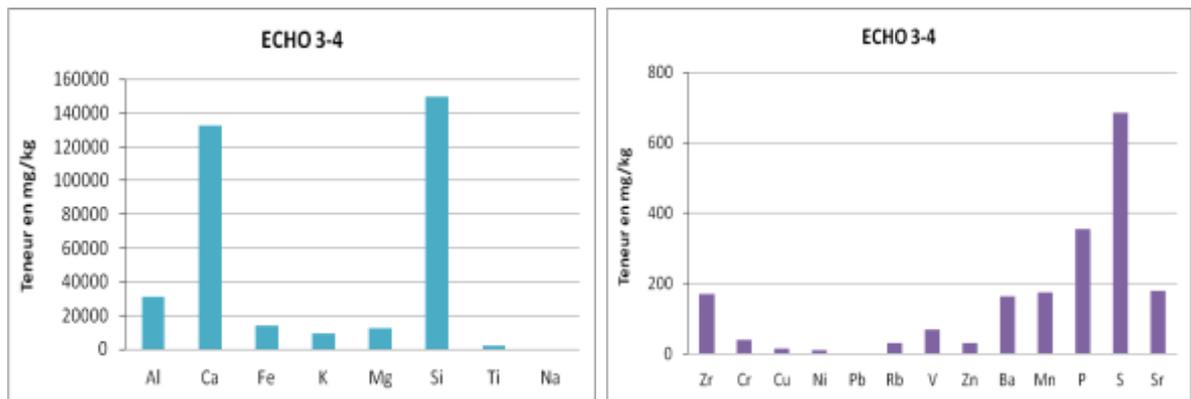
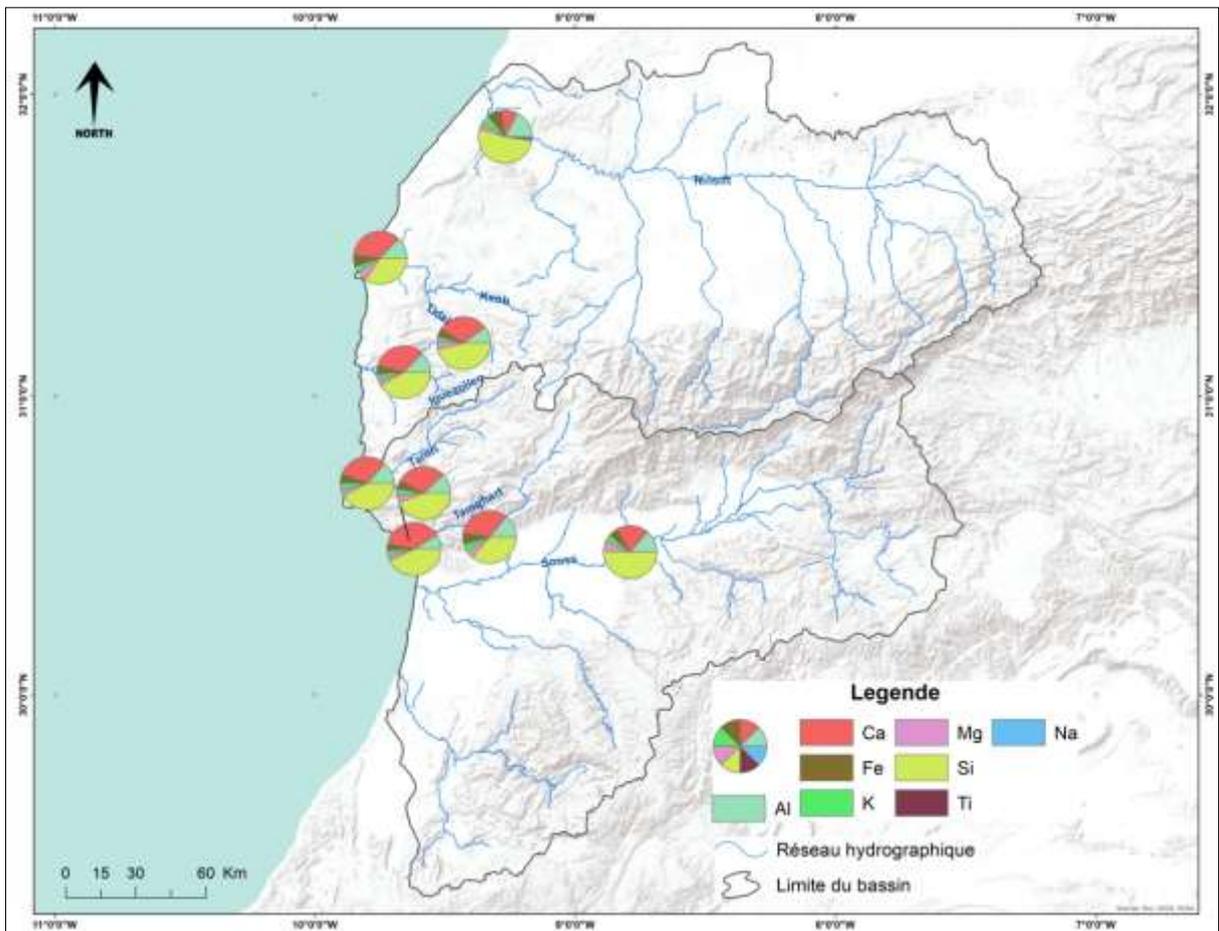
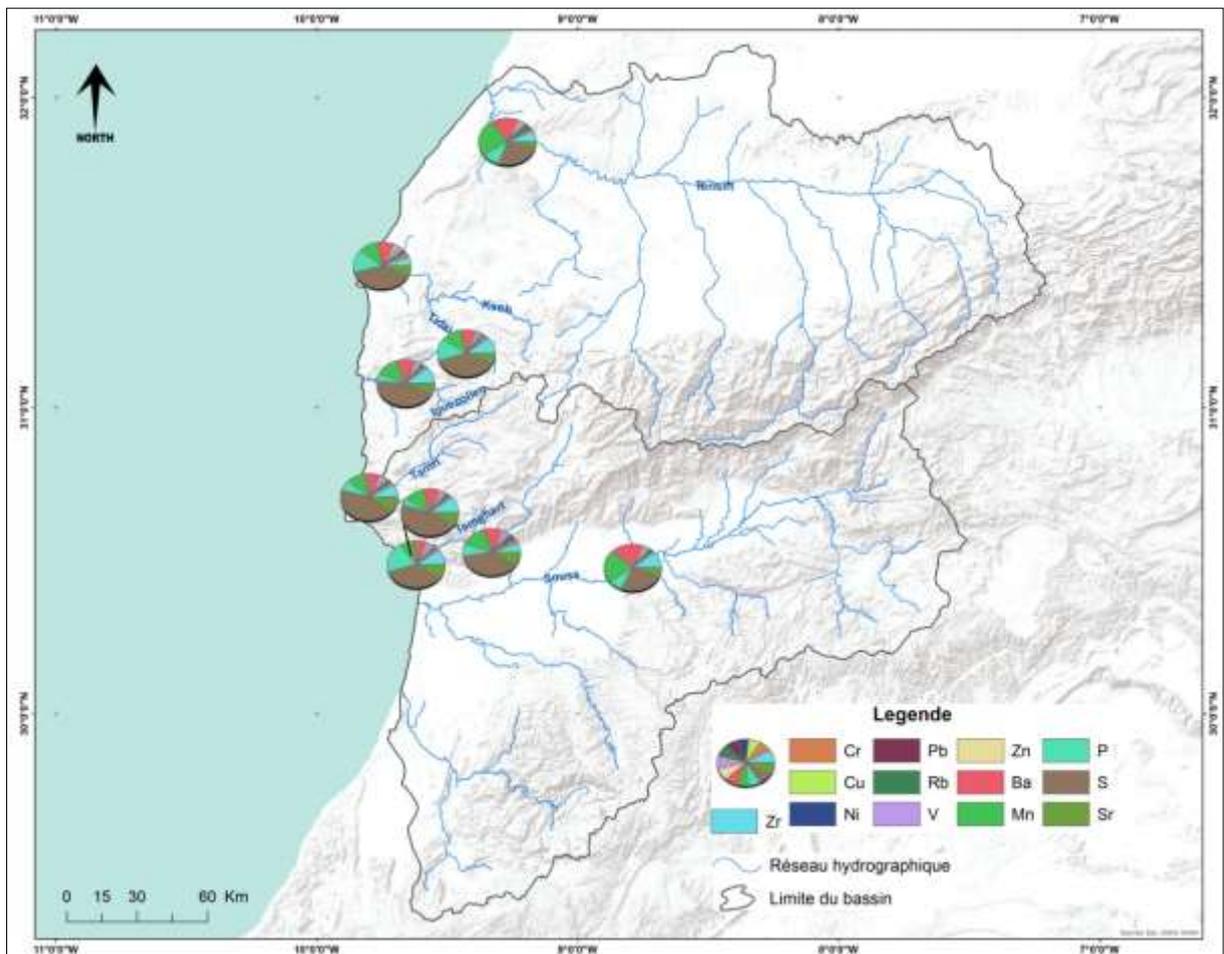


Figure 73 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « ECHO 3-4».



Carte 25 : Répartition spatiale des éléments majeurs (en mg/kg) des échantillons continentaux.



Carte 26 : Répartition spatiale des éléments traces (en mg/kg) des échantillons continentaux.

Axe 2 : La côte atlantique marocaine : analyse de la variation géochimique spatiale et temporelle des sédiments marins de surface

L'échantillonnage marin a été réalisé, lors de la campagne océanographique METEOR : Croisière M45/5, Croisière M 37/1 et Croisière M58/2. Les sites marins étudiés au cours de cette thèse, se situent dans la façade atlantique du Sud-Ouest du Maroc.

Tableau 22 : Informations détaillées sur les prélèvements marins mentionnés dans cette étude.

Cruise	Station	Latitude (N)	Longitude (W)	Profondeur (m)	Type
M58/2	8606-2	31,003	-10,742	1227	MUC
M58/2	8604-3	30,95	-10,522	885	MUC
M58/2	8607-2	30,91	-10,362	1068	MUC
M45/5	6009-1	30,68	-10,275	579	MUC
M58/2	8601-3	30,50	-10,161	921	SL15
M45/5	6011-2	30,31	-10,288	993	MUC
M45/5	6010-1	30,25	-10,083	406	MUC
M37/1	4210-2	30,30	-10,98	1959	MUC

I. La répartition spatiale des éléments majeurs et éléments traces, dans les sédiments marins :

1. Échantillon GéoB8606-2 :

Dans cet échantillon marin, on observe une forte teneur en Si (142893,3 mg/kg), suivi par une teneur importante en Ca (98525,23 mg/kg), avec la présence de teneurs moyennes des éléments, tels que, l'Al (56951 mg/kg), Fe (30126,87 mg/kg), Na (21229,59 mg/kg), K (18277,13 mg/kg), Mg (14704,63 mg/kg) et Ti avec une faible teneur (3099,45 mg/kg). Les teneurs en éléments traces : Ba, Mn, P, S, Zr, Cr, Cu, Sr, Ni, Pb, Rb, V et Zn sont très différents dans cet échantillon : le S (1576 mg/kg), Ba, Mn, P, et Sr varient de 391 à 965 mg/kg, les autres éléments traces ne dépassent pas les 100 mg/kg.

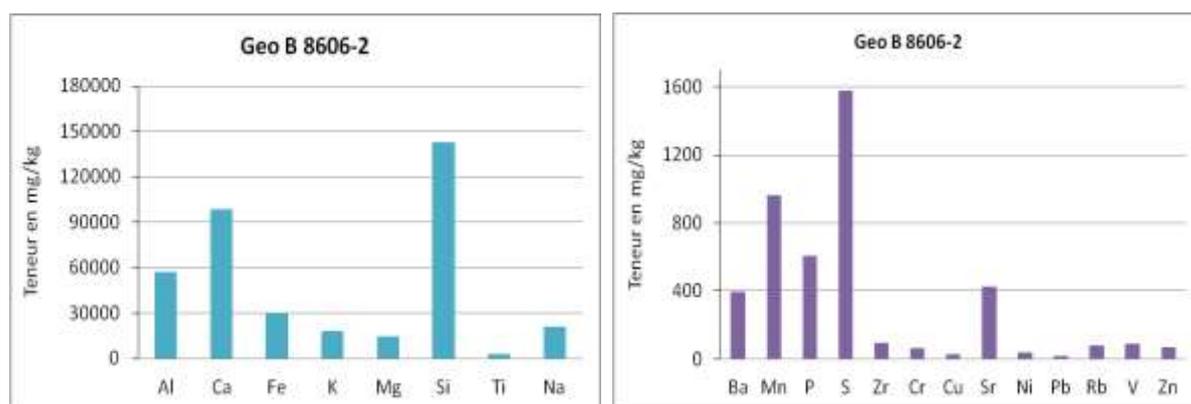


Figure 74 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « GéoB8606-2 ».

2. Échantillon GéoB8607-2 :

L'échantillon GéoB8607-2 est relativement similaire à l'échantillon GéoB8606-2. La teneur la plus forte est celle en Si avec 151647,6 mg/kg, suivi par la teneur en Ca (88518,25 mg/kg), puis Al (58865,67 mg/kg), Fe (31134,78 mg/kg), K (19419,32 mg/kg) et Mg (16527,25 mg/kg) et Ti, avec une teneur de 3360 mg/kg. Cet échantillon est caractérisé par

une teneur très importante en Na, par rapport aux autres échantillons, avec une valeur de 27519,33 mg/kg. Les teneurs des éléments traces S (1956 mg/kg), P (788 mg/kg), Ba (390 mg/kg), Sr (350 mg/kg) et Mn (311 mg/kg) sont faibles. Alors que, les teneurs en Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V et Zn sont très faible et varient entre 20 et 112 mg/kg.

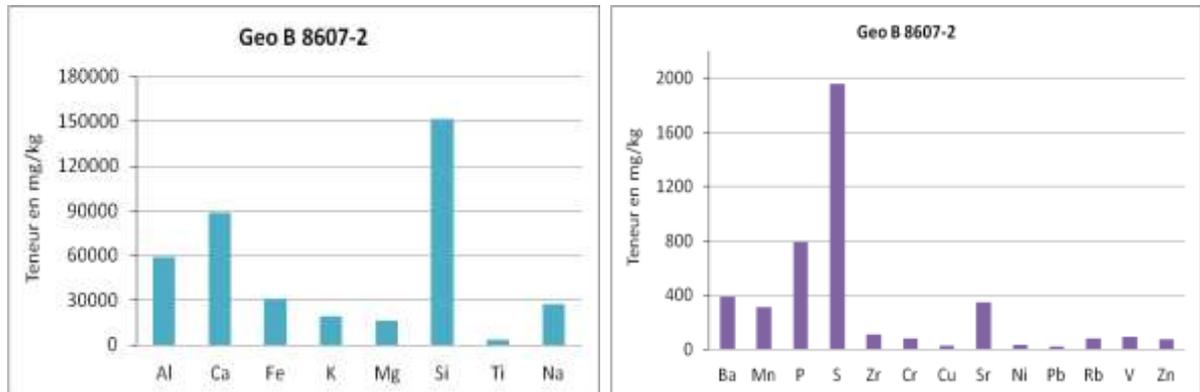


Figure 75 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « GéoB8607-2 ».

3. Échantillon GéoB8604-3 :

Cet échantillon est caractérisé par une teneur très importante en Si (145575,5 mg/kg), suivi par Ca (103585,6 mg/kg), puis Al (54705,38 mg/kg), Fe (28686,46 mg/kg), Na (20033,33 mg/kg). Les teneurs moyennes présentes dans cet échantillon sont : K (17695,59 mg/kg), Mg (15727,34 Mg/kg) et Ti (3173,63 mg/kg). Il existe des éléments traces dans cet échantillon, qui présentent des teneurs faibles comme : S (1666mg/kg), P (788 mg/kg) et Sr (416 mg/kg). Les autres éléments traces : Ba, Mn, Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V et Zn sont très faible et rares, et ne dépassent pas les 390 mg/kg.

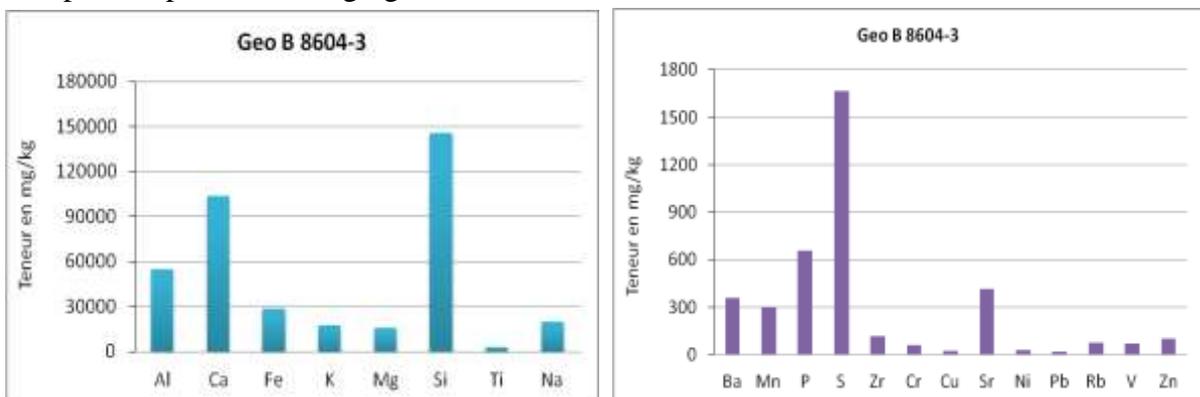


Figure 76 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « GéoB8604-3 ».

4. Échantillon GéoB8601-3 :

Dans l'échantillon marin GéoB8601-3, on trouve une teneur très élevée en Si, qui atteint 157736,9 mg/kg, suivi par la teneur de Ca (81895,51 mg/kg). Les teneurs moyennes varient de 62406 mg/kg pour l'Al, 32518,69 mg/kg pour le Fe, 24258,38 mg/kg pour le Na, 20696,64 mg/kg pour le K et 16749,18 mg/kg pour le Mg. La faible teneur est représentée par le Ti (3456 mg/kg). D'autre part, les éléments traces : S (1948 mg/kg), P (804 mg/kg) et Ba (418 mg/kg) sont présents avec une teneur faible, et une teneur très faible pour les autres éléments : Mn, Zr, Cr, Cu, Sr, Ni, Pb, Rb, V, et Zn (de 26 à 314 mg/kg).

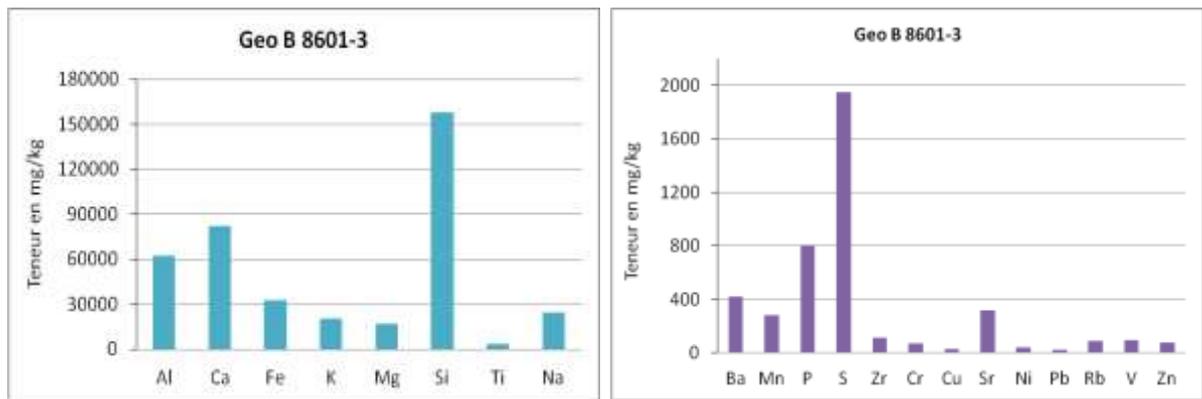


Figure 77 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « GéoB8601-3 ».

5. Échantillon GéoB6009-1 :

Pour l'échantillon GéoB6009-1, la teneur la plus élevée est celle de Si (155063,5 mg/kg), suivi par le Ca (113243,7 mg/kg). Les teneurs moyennes présentes dans cet échantillon sont par ordre décroissant : Al (56807,85 mg/kg), Fe (29284,05 mg/kg), Na (26731,49 mg/kg), K (18933,62 mg/kg), Mg (16752 mg/kg) et Ti (3385 mg/kg). Alors que, les éléments traces tels que : Ba, Mn, P, S, Zr, Cr, Cu, Sr, Ni, Pb, Rb, V et Zn représentent généralement des teneurs faibles à très faibles, variant de 17 mg/kg à 1973 mg/kg.

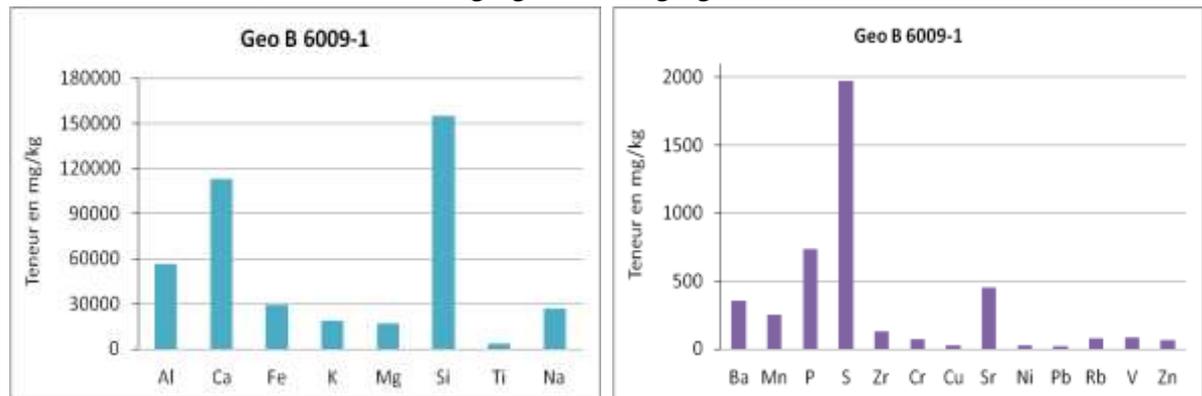


Figure 78 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « GéoB6009-1 ».

6. Échantillon GéoB6011-2 :

Cet échantillon est caractérisé par une teneur très importante en Ca, avec une valeur de 134087,5 mg/kg, contrairement aux autres échantillons, suivi par le Si (126151,2 mg/kg), l'Al avec 46544,73 mg/kg, Na (25456,38 mg/kg), le fer avec 24297,33 mg/kg. Pour les éléments K (14659,27 mg/kg), Mg (14428,79 mg/kg) et Ti (2743 mg/kg), on peut les considérer comme ayant de faibles teneurs, et les très faibles teneurs pour le Mn (510 mg/kg). Tandis que les éléments traces : P (615 mg/kg), S (1825 mg/kg) et Sr (600 mg/kg). Les autres éléments traces : Ba, Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, sont très rares dans cet échantillon, ils ne dépassent pas les 300 mg/kg.

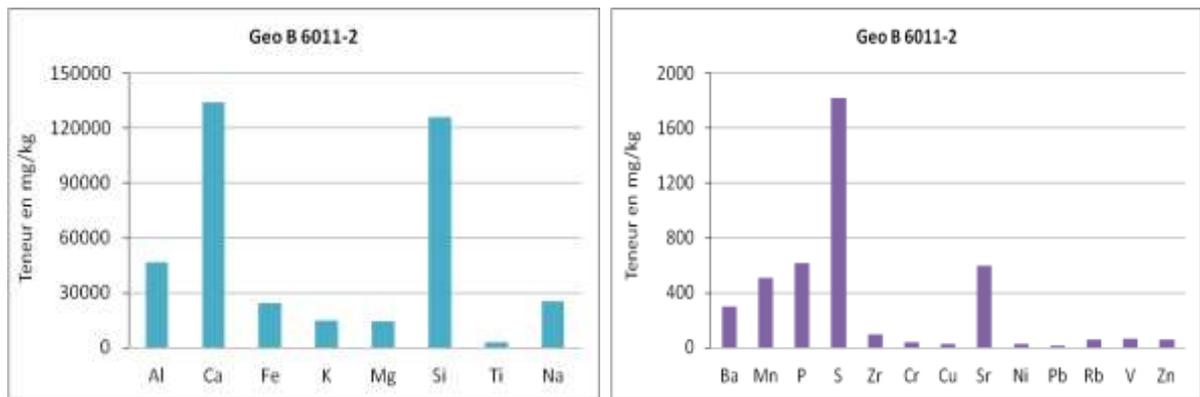


Figure 79 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « GéoB6011-2 ».

7. Échantillon GéoB4210-2 :

L'échantillon GéoB4210-2 est relativement similaire à l'échantillon GéoB6011-2. La teneur la plus élevée est celle de Ca (147631,5 mg/kg), suivi par la teneur en Si (119480,8 mg/kg), puis l'Al (46579,19 mg/kg). Les teneurs moyennes des éléments tels que le Na, Fe, K, Mg et Ti sont représentés avec 14512 mg/kg, 23920,47 mg/kg, 15090,57 mg/kg, 13069,55 mg/kg et 2645 mg/kg respectivement. Les teneurs des éléments traces tels que : S (1300 mg/kg), Sr (732 mg/kg), Mn (667 mg/kg), Ba (431 mg/kg) et P (418 mg/kg) sont faibles à très faibles. Les autres éléments traces : Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, et Zn, avec des teneurs rares (de 3 à 80 mg/kg).

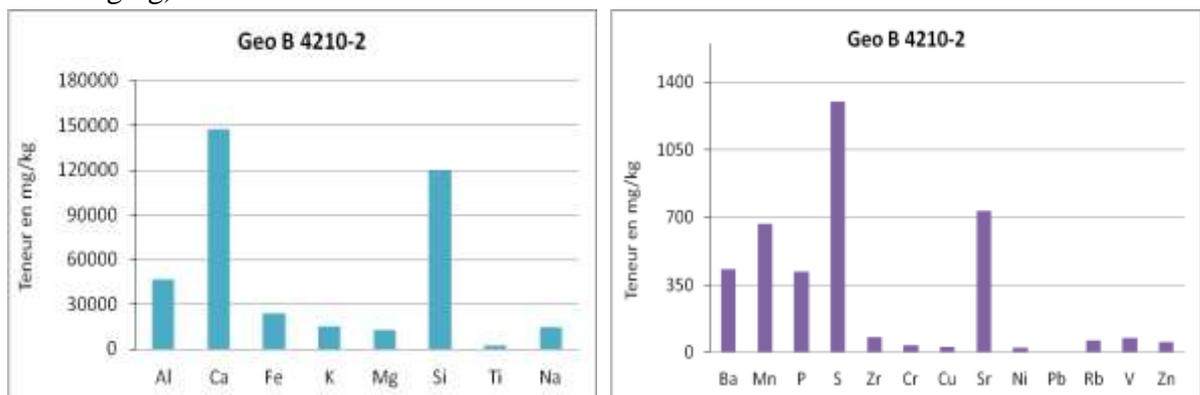


Figure 80 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « GéoB4210-2 ».

8. Échantillon GéoB6010-1 :

L'échantillon GéoB6010-1, présente une très forte teneur en Ca (167944,7 mg/kg), par rapport aux autres échantillons marins, une teneur importante en Si (102813,3 mg/kg), avec la présence de teneurs moyennes des éléments tels que, l'Al (25265,95 mg/kg), Fe (20916,97 mg/kg), Na (17556,91 mg/kg), Mg (10557,44 mg/kg). La faible teneur est représentée par le K (8566 mg/kg) et le Ti (1824 mg/kg). Les éléments traces : Ba, Mn, P, S, Zr, Cr, Cu, Sr, Ni, Pb, Rb, V et Zn sont très faibles dans cet échantillon. Le P, S, et Sr dépassent les 300 mg/kg, bien que les autres éléments traces varient entre 7 et 205 mg/kg, et nulle comme le cas de Pb.

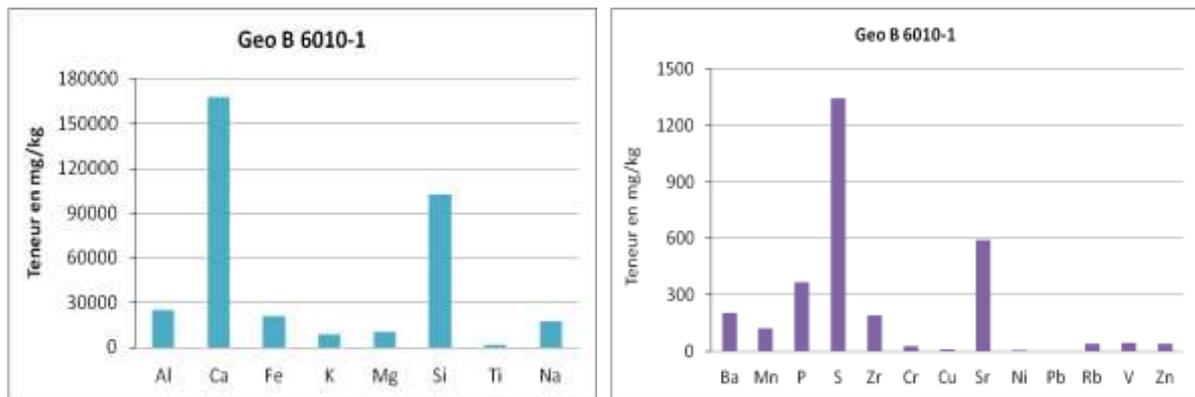
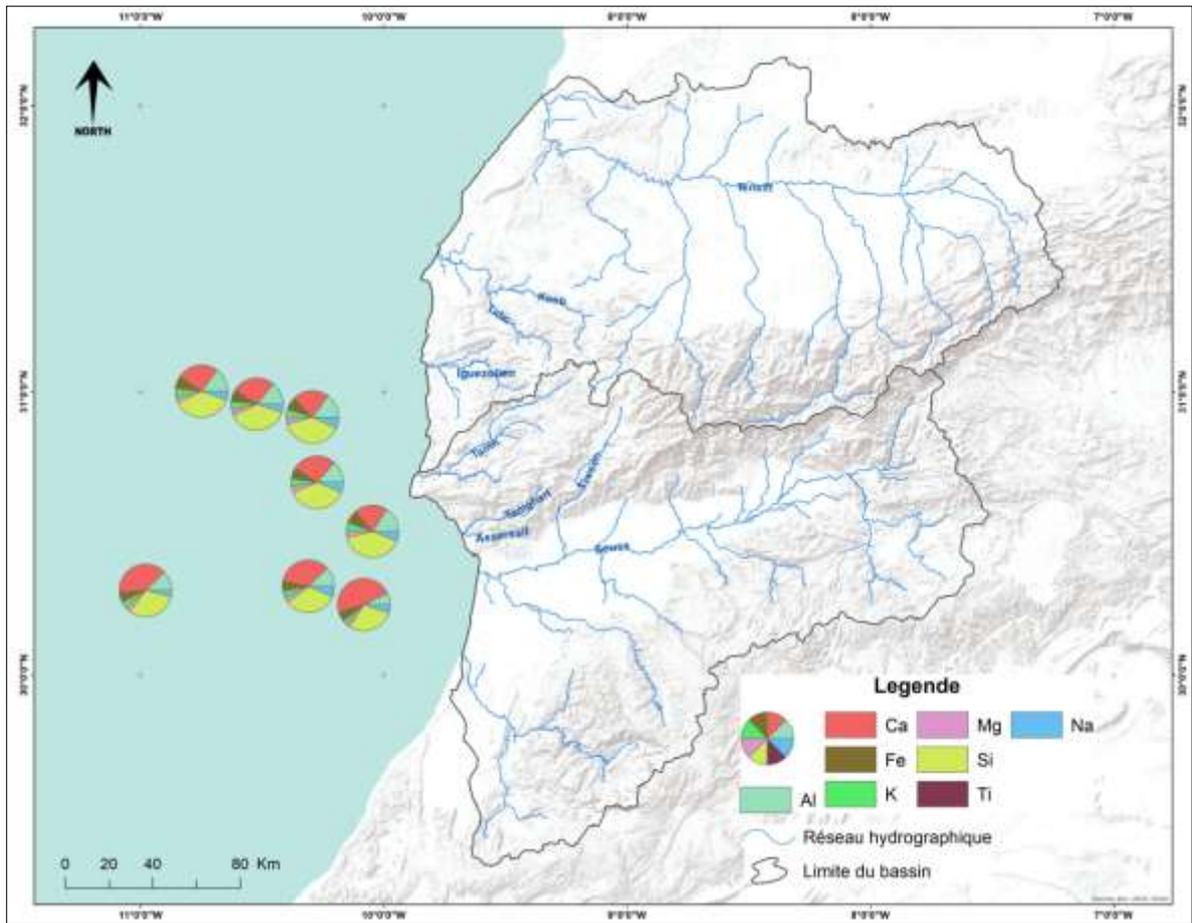


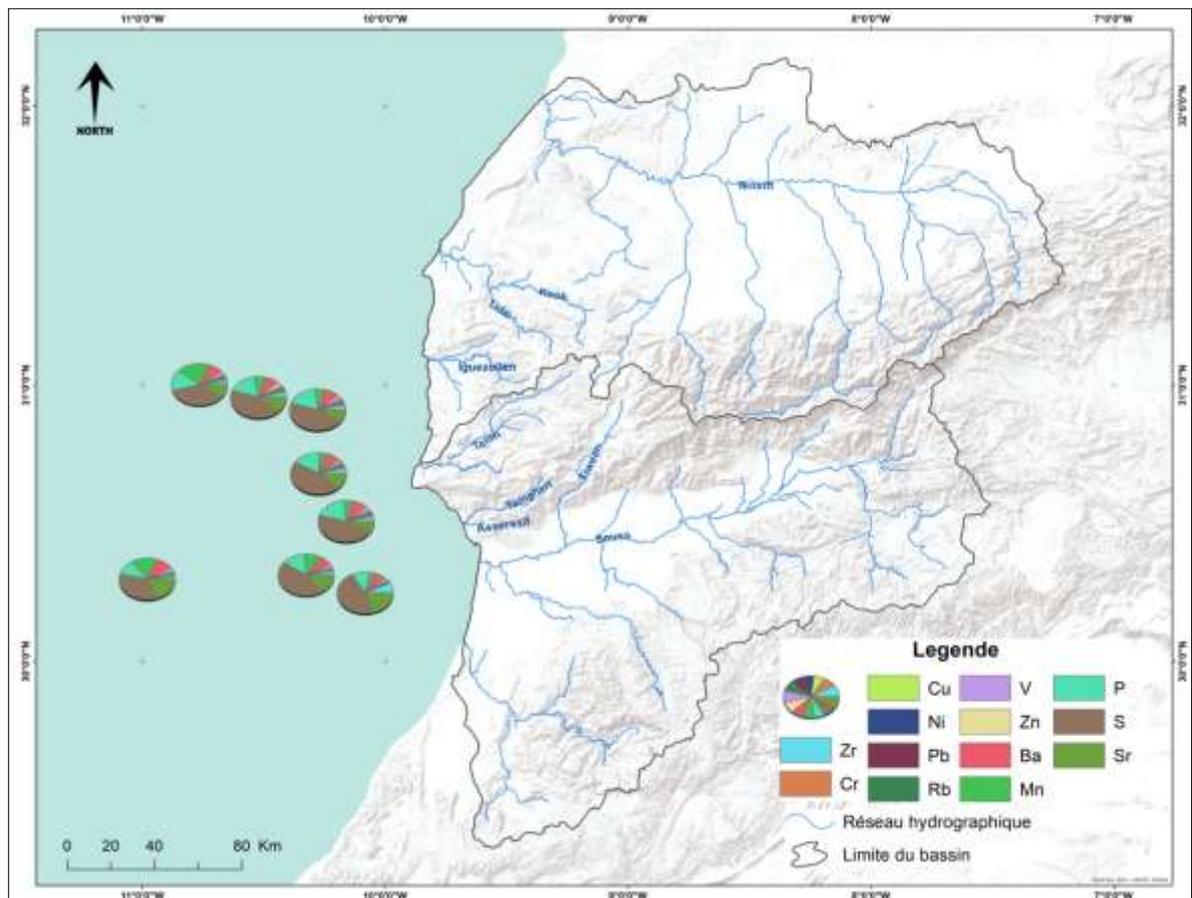
Figure 81 : Distribution des éléments majeurs et éléments traces dans l'échantillon « GéoB6010-1 ».

Au final, la distribution des composants en éléments majeurs et traces des sédiments marins et continentaux indiquent, en premier lieu, une distribution relativement identique des éléments terrigènes (Ca, Si, Al, Fe, Mg), au niveau de chaque échantillon, avec des valeurs généralement élevées de ces éléments, par rapport aux autres éléments, puis une distribution clairement variée de Ca, mais avec des valeurs élevées. En effet, le Ca présente des teneurs relativement faibles, près de la marge continentale et des teneurs élevées plus loin de la marge continentale. Les teneurs sont faibles en Ca, parallèlement à de fortes teneurs d'éléments terrigènes, en particulier près de la marge continentale (à l'embouchure des Oueds). Les teneurs des éléments terrigènes sont généralement élevées dans le continent et près de la marge continentale marocaine. Donc, ces résultats peuvent indiquer une empreinte claire des apports terrigènes, sur les composants chimiques des sédiments marins de surface.

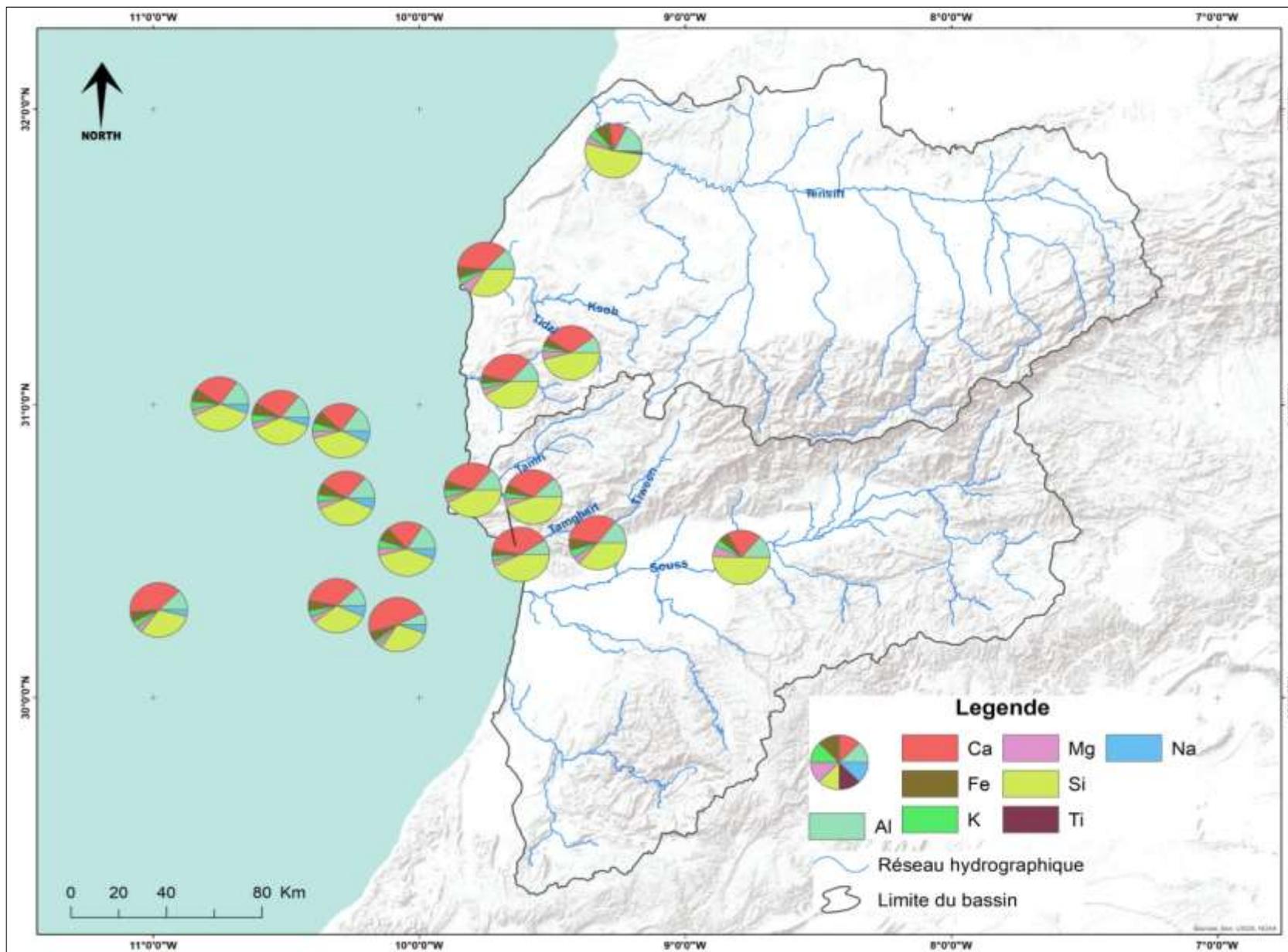
Les autres éléments traces : Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, Ba, Mn, P, S, et Sr sont généralement faibles dans ces échantillons, avec des teneurs élevées de S, P, Mn et Ba, mais les autres éléments traces sont très faibles et/ou nuls comme le Pb et le Ni.



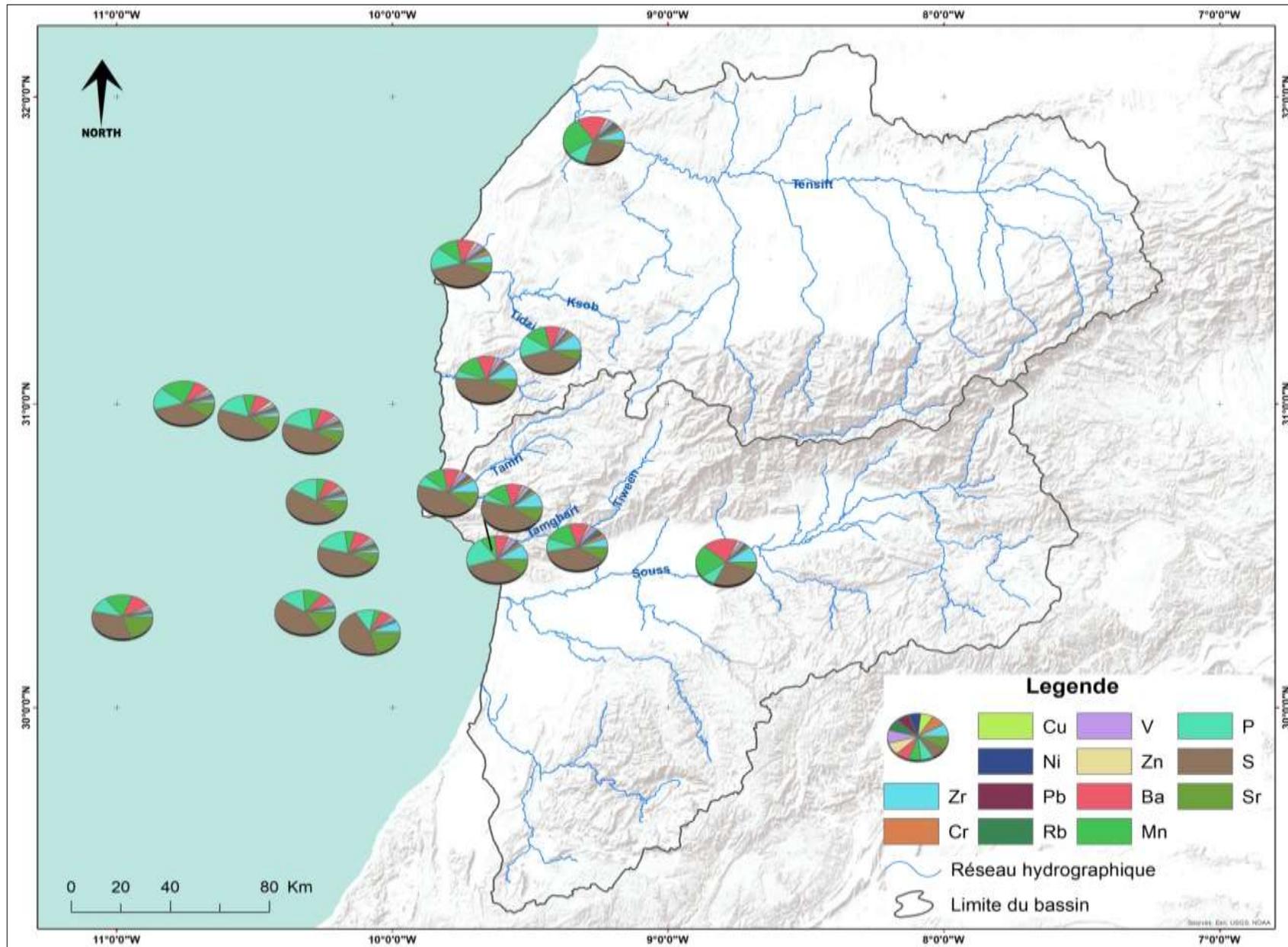
Carte 27 : Répartition spatiale des éléments majeurs (en mg/kg) des échantillons marins.



Carte 28 : Répartition spatiale des éléments traces (en mg/kg) des échantillons marins.



Carte 29 : Synthèse sur la répartition spatiale des éléments majeurs des sédiments continentaux et marins.



Carte 30 : Synthèse sur la répartition spatiale des éléments en traces des sédiments continentaux et marins.

CONCLUSION

En conclusion, l'analyse spatiale des composants chimiques des sédiments continentaux et marins révèle une cohérence relative dans leurs compositions terrigènes. La concentration des éléments majeurs et en traces dans les sédiments marins est influencée par les apports continentaux, que ce soit par voie fluviale ou éolienne. L'ensemble des composants chimiques étudiés met en évidence des variations dans la composition élémentaire des sédiments continentaux et marins en surface, en fonction des latitudes. Cela reflète la diversité à petite échelle des sites d'échantillonnage ainsi que des environnements associés, tels que les sédiments des rives, les dépôts de crue, les charges en suspension et les sols. De nombreux facteurs influencent la répartition de ces composants, notamment la géologie, la topographie et les processus diagénétiques.

Cette étude des composants chimiques des sédiments terrestres et marins revêt une grande importance pour comprendre la dynamique géochimique de la région étudiée. Elle offre des informations précieuses sur les transferts de matière entre les milieux continentaux et marins, ainsi que sur les facteurs géologiques et environnementaux qui façonnent la composition des sédiments. Ces données contribuent à éclairer la relation complexe entre les processus terrestres et océaniques, ce qui est essentiel pour appréhender les variations climatiques et environnementales passées et actuelles dans la région du Sud-Ouest du Maroc.

CHAPITRE N° 2 :

EXPLICATION ET INTERPRÉTATION DES ÉLÉMENTS GÉOCHIMIQUES DES SÉDIMENTS MARINS DE SURFACE AU SUD-OUEST DU MAROC : SIGNIFICATIONS CLIMATIQUES

INTRODUCTION

La concentration des éléments majeurs et des éléments traces dans les sédiments marins peut varier en raison de divers facteurs, tels que les apports anthropiques directs, le transfert continental par le biais de sources fluviales et éoliennes, le transport par les courants marins, les dépôts atmosphériques, etc. Ces sédiments terrigènes transportés vers les océans jouent le rôle d'archives précieuses des conditions paléoclimatiques sur le continent. Les données obtenues à partir de ces sédiments fournissent des informations essentielles sur les conditions environnementales et reflètent les mécanismes de transport ainsi que les variations des apports fluviaux et éoliens.

Dans notre zone d'étude, qui se situe le long de la côte atlantique au Sud-Ouest du Maroc, les sédiments terrigènes sont acheminés vers la mer par des processus fluviaux et éoliens. Ces processus sont sensibles aux changements climatiques, notamment les variations de l'aridité, des vents et des précipitations continentales. Ces changements influent sur la quantité et la trajectoire des sédiments transportés vers l'océan.

Les composants chimiques terrestres ont été largement utilisés, pour identifier la source de matière terrestre dans l'océan. Par exemple, selon Peterson et al. (2000) et Haug et al. (2001) les concentrations accrues de Titane (Ti) et de Fer (Fe) ont été interprétées, comme une augmentation d'apports en matière siliciclastique d'origine fluviale. Parallèlement, Yarincik et al, 2000 et Kuhlmann et al, (2004) ont utilisé le potassium (K), comme indicateur des apports fluviaux marocains, qui reflètent les conditions terrestres humides. En effet, dans la plupart des sédiments marins, les fractions de sédiments grossiers sont enrichies en Ti (Shiller, 1982), qui est lié à l'altération chimique intensive dans des conditions humides (Bonatti et al, 1973), dans les sédiments marins, Ti caractérise les fractions de sédiments grossiers, tandis que l'Al est plus enrichi en minéraux argileux à fines particules (Govin et al, 2012). Alors que le Si est contenu dans tous les minéraux argileux, en particulier, dans les grains de quartz (Moreno et al, 2001) qui ont considéré les variations du rapport Si/Al, comme des changements dans les apports en quartz terrigène liés aux fluctuations de la force du vent.

D'autres études suggèrent que, les rapports des éléments chimiques sont plus utiles que les éléments individuels (Weltje et al, 2008). Les rapports tels que Ti/Al, Si/Al, Ti/Ca, Fe/Ca, Zr/Al, Al/Ti, Mg/Al, K/Al, K/Ca et Rb/Al sont les plus couramment utilisés, pour la reconstruction des apports terrigènes. Par exemple, les rapports Ti/Al, Si/Al et Zr/Al ont été utilisés, comme traceurs de poussières éoliennes (Govin et al, 2012). Alors que, Fe/Ca, Fe/K, Ti/Ca, Mg/Al, K/Al, K/Ca et Rb/Al, en tant qu'indicateurs d'humidité relative (Zabel et al, 2001 ; Yarincik et al, 2000 ; Mülitz et al, 2008 ; Govin et al, 2012). Cependant, des études antérieures considèrent que, la distinction entre les sources éoliennes et les sources fluviales de certains rapports d'éléments est difficile, car les deux sources, peuvent fournir les mêmes minéraux détritiques et présentent donc des apports similaires. Or, les informations sur les processus de transport, la roche-mère et la composition minérale des sédiments sont essentielles, pour une interprétation précise des apports de sédiments. Ces propriétés sédimentaires pourraient aider, à distinguer les apports fluviaux et éoliens.

Les variations des concentrations d'éléments terrigènes le long de la côte atlantique au Sud-Ouest du Maroc, qu'elles soient élevées ou faibles, reflètent la diversité des apports de ces éléments dans cette région. Ces concentrations offrent la possibilité de retracer les fluctuations climatiques dans les terres bordant la côte atlantique au Sud-Ouest du Maroc. En

conséquence, les rapports élémentaires traduisent la composition du matériau terrigène et sont également indicatifs des conditions climatiques dans les bassins versants continentaux. L'analyse de la distribution spatiale des rapports chimiques s'avère particulièrement utile pour identifier les apports terrigènes spécifiques dans la zone d'étude. Dans cette optique, des rapports tels que Si/Al et Ti/Al ont été employés dans cette étude en tant qu'indicateurs des apports de poussières éoliennes, tandis que les rapports Fe/Ca, K/Ca, K/Al ont servi à déceler les signes de l'humidité relative.

Cette étude nous permettra de retracer les évolutions liées au climat, à l'océan (notamment la variabilité climatique et la température de la surface marine) et à l'environnement. Enfin, l'utilisation de l'analyse en composantes principales nous permettra d'examiner les diverses corrélations potentielles entre les éléments analysés, dans le but d'identifier les signatures géochimiques qui pourraient être enregistrées dans cette région.

Axe 1 : Généralités sur la distribution des sédiments marins : présentation et explication

Les sédiments terrigènes déposés dans les océans, consistent en un mélange de composants sédimentaires provenant de différentes sources, qui sont transportés au site du dépôt, par différents mécanismes de transport des sédiments (Weltje et al, 2003). Au large des côtes du désert du Sahara, on trouve principalement deux types de matières terrigènes : le premier, et le plus dominant, l'apport éolien, et transporté par différents systèmes éoliens, et la deuxième source fluvial, qui peut être dominant près de l'embouchure des fleuves (par exemple Tensift et Souss).

I. Les sources des sédiments terrigènes, au large des côtes du Sud-Ouest du Maroc :

1. Les apports fluviaux :

Les rivières et les cours d'eau sont les principaux fournisseurs de matériaux, car ce sont les agents de transport privilégiés des sédiments arrachés aux continents par les phénomènes d'érosion, particulièrement vigoureux dans l'arrière-pays de ce littoral. Ils sont essentiellement contrôlés, par les facteurs climatiques et la superficie des bassins versants.

Compte tenu du manque de données précises sur tous les apports des Oueds à la zone côtière au Sud-Ouest du Maroc, il nous est impossible de tenter d'établir un bilan du flux solide. Des informations éparses, permettent de considérer, que l'essentiel des apports solides est constitué de sédiments fins, qui sont aisément évacués en mer et dispersés par les courants marins sur le plateau continental.

La décharge fluviale du matériel détritique, est une autre source importante de matière terrigène. Dans la zone d'étude, un certain nombre de rivières (par exemple, Tensift 32 °N, Souss 30 °N) transportent des sédiments provenant de l'arrière-pays de l'Atlas et de l'Anti-Atlas vers le plateau continental (Wynn et al, 2000). Le débit total des sédiments des rivières du nord-ouest de l'Afrique est estimé à 110 millions de tonnes par an (Milliman et al, 1983). Aujourd'hui, la majeure partie de ces sédiments fluviaux est déposée sur le plateau continental. Cependant, de nombreux canyons, disséquant la rupture du plateau, fournissent des conduits pour le matériel, qui contourne le talus continental et se dépose sur la plaine abyssale de la Seine, le bassin d'Agadir et la plaine abyssale de Madère (Weaver et al, 2000 ; Wynn et al, 2000). Les systèmes de canyon dans la partie Nord du continent africain et du Nord-Ouest sont encore influencés par le drainage fluvial (Wynn et al, 2000), tandis que plus au Sud, sur la marge saharienne occidentale 28°N, l'offre fluviale est significativement réduite par rapport à la zone située au Nord de 29°N. Ici, les oueds supplémentaires atteignent l'océan Atlantique, uniquement de façon saisonnière (Wynn et al, 2000).

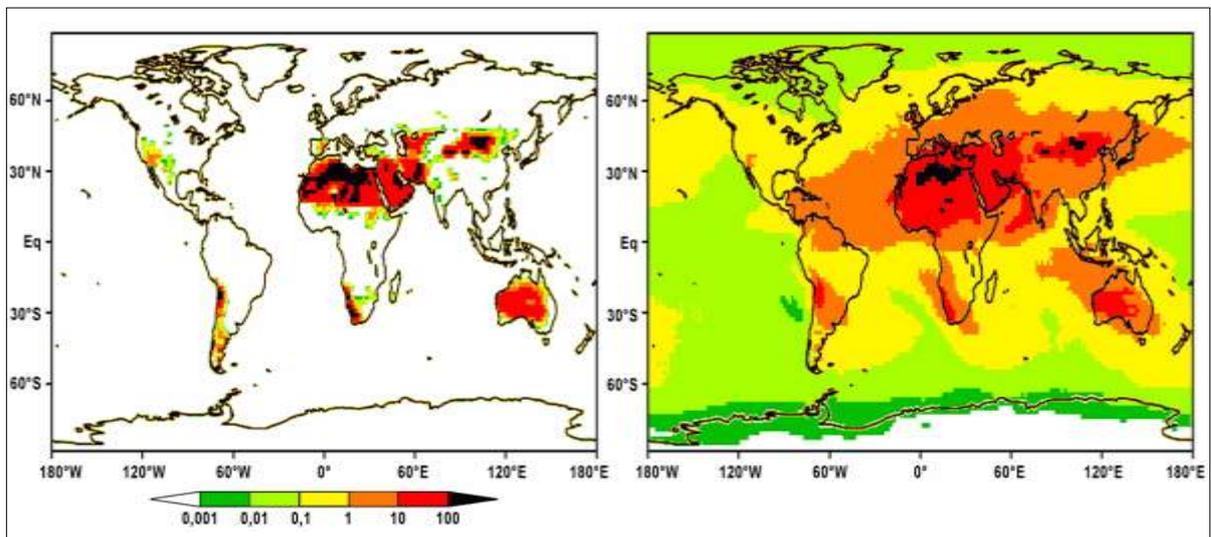
L'apport fluvial de matériel terrigène est limité dans la zone d'étude, principalement entre 29 °N et 32 °N. Dans le Nord, lorsque la neige fond sur les montagnes de l'Atlas et de l'Anti-Atlas et pendant les saisons pluvieuses, la rivière alimente en intensité. Ceci a une influence significative sur la sédimentation. En général, le profil des précipitations est causé par les vents d'ouest des latitudes moyennes (c'est-à-dire avec leurs systèmes frontaux) et la zone de convergence intertropicale (ZCIT) (Nicholson, 2000). Par conséquent, les apports fluviaux induits par les précipitations sont intensifiés au Nord du Sahara, en particulier, pendant l'hiver boréal, la saison des précipitations les plus intenses (Nicholson, 2000).

2. Les apports éoliens :

À côté de l'apport fluvial, le transport de sédiments par les vents est un facteur sédimentaire, qui joue un rôle notable dans les zones marines. En effet, tous les éléments chimiques sont apportés à l'océan sous forme dissoute et sous forme particulaire, par des processus atmosphériques, en particulier, le transport éolien. La majeure partie des apports particuliers concerne des particules dont la taille est inférieure à $10 \mu\text{m}$: les aérosols (Libes, 2009). Le transport éolien se produit, lorsque les vents entraînent ces petites particules de la surface continentale et les transportent au-dessus des océans.

L'apport de poussières représente une contribution importante aux sédiments marins. Le désert du Sahara est la source la plus importante de matériel éolien du monde. Engelstaedter et al, (2006) ont estimé que les particules de poussières émises en provenance du Nord-Ouest de l'Afrique, variaient entre 120 et 180 Tg-an. La poussière des régions sahariennes et sahéliennes est transportée par les alizés du Nord-Est, à une altitude de 500-1500m et est exportée vers l'océan Atlantique proximal (Chiapello et al, 1995). De plus, la poussière est transportée dans la couche d'air saharienne plus élevée jusqu'à 3 km (Sarnthein et al, 1981) et peut potentiellement être transportée par-delà l'océan Atlantique jusqu'aux Caraïbes (Prospero et al, 1972).

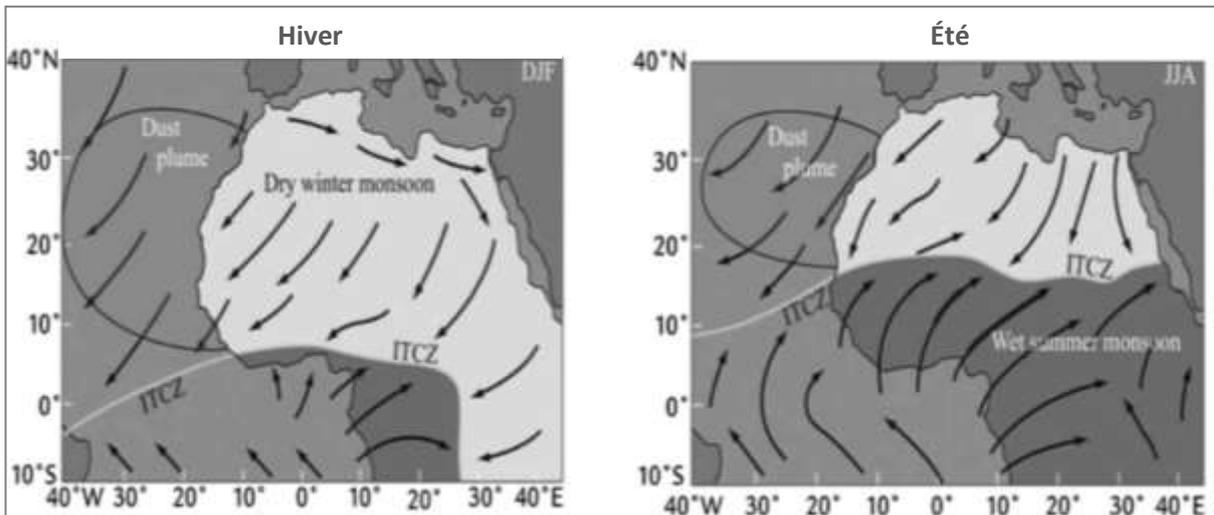
Dans le continent aride du Nord-Ouest de l'Afrique, le dépôt de poussières minérales est responsable d'une grande partie de la sédimentation en eau profonde (Chester et al, 1972 ; Rea, 1994) et fournit des nutriments aux eaux de surface de la mer (Jickells et al, 2005). Par conséquent, la poussière saharienne, consiste principalement, en un mélange de phases d'aluminosilicates contenant toutes, des quantités variables de Silicium (Si), d'Aluminium (Al), de Fer (Fe) et de Potassium (K) (Caquineau et al, 1998) et en Titane (Ti) (Schutz et al, 1982).



Carte 31 : Simulation à l'aide d'un modèle global d'émission du flux annuel moyen d'émissions de poussières (à gauche) et du flux annuel total de dépôt (à droite), unités : $\text{g poids sec m}^{-2} \text{an}^{-1}$ (d'après Tanaka et al, 2006).

La répartition de la poussière saharienne est contrôlée, par deux scénarios météorologiques. Le premier en hiver, dans lequel la poussière a été favorisée par le déplacement vers le Sud, de la zone de convergence intertropicale (ITCZ) et l'affaiblissement des Açores (Bergametti et al, 1989). Les alizés sont alors bien développés, entre la latitude 10°N et 25°N (Martinez et al, 1999), tandis que les vents très secs et chauds (Harmattan) soufflent occasionnellement au large du Sahara, à des latitudes comprises entre 15°N et 28°N .

Ces vents peuvent transporter la poussière du désert dans l'océan et au-dessus de l'océan, bien que la plupart du temps, la frontière entre l'Harmattan et les zones maritimes, se situe sur le continent parallèle à la côte (Van Camp et al, 1991). Dans le deuxième scénario, la poussière en Été est transportée depuis une source septentrionale (Torres et al, 2002). En raison de la migration vers le Nord de la ZCIT vers 19°N (Nicholson, 2000), les alizés soufflent plus au Nord 32°N (Martinez et al, 1999). Cette poussière est transportée vers l'Ouest, au-dessus de l'océan Atlantique Nord-Est, des îles Canaries et d'une branche ouest transportant les aérosols loin au large.



Carte 32 : Les régimes des vents, pendant les saisons estivales et hivernales, au-dessus de l'Atlantique Nord tropical (d'après Stuu et al, 2005).

La poussière éolienne a permis de reconstituer les changements paléoclimatiques, en particulier, les fluctuations de phase humides et arides, qui se traduisent par des augmentations ou des diminutions correspondantes de la concentration des éléments dérivés de la poussière (Cole et al, 2009). Des données indirectes géochimiques, tels que les rapports Si/Al, Zr/Al et Ti/Al (Calvert et al, 2007) ont été largement utilisés, pour reconstruire les variations des apports éoliennes.

II. Généralités sur la distribution des sédiments marins :

Les sédiments marins ne sont plus en équilibre, avec les conditions de dépôt actuel et correspondent à une sédimentation ancienne, quand le niveau de la mer était plus bas. En effet, la distribution des sédiments marins dépend principalement, de trois paramètres :

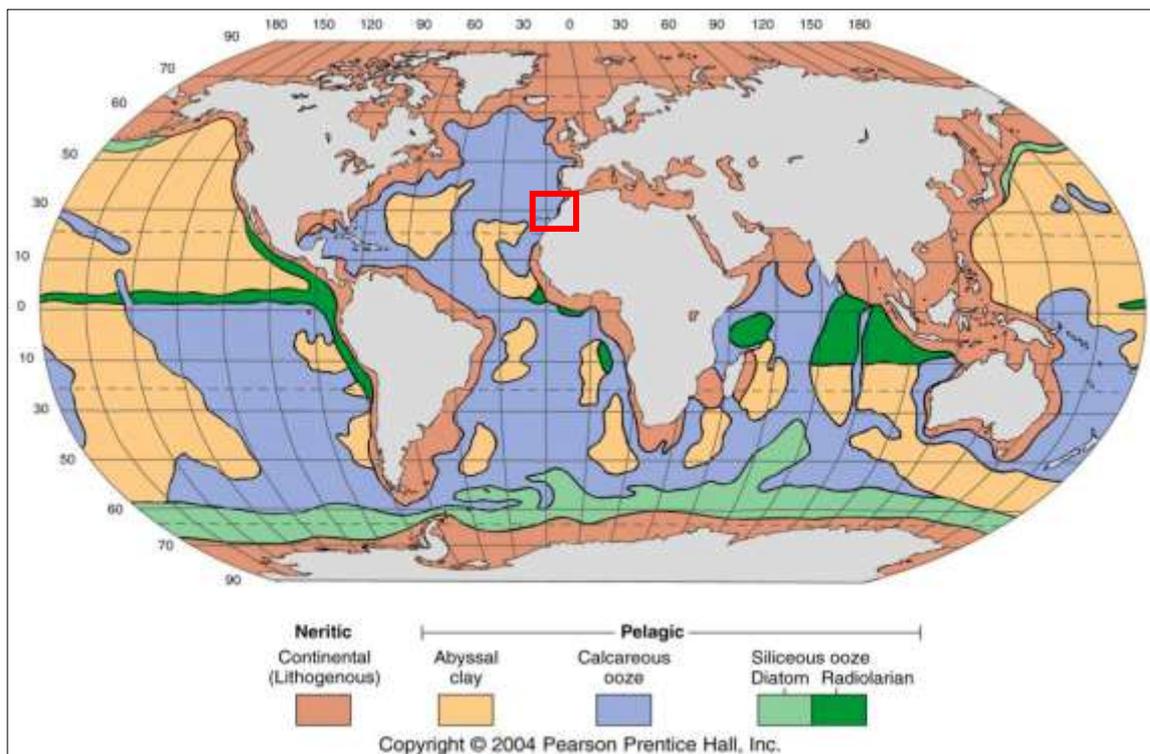
- ❖ La distance aux continents ;
- ❖ La productivité primaire ;
- ❖ La colonne d'eau.

Sur les plateformes continentales, l'épaisseur des sédiments est plus importante, que dans les fonds marins, car celles-ci sont proches de la source de la fraction détritique des sédiments. Ainsi, il est aussi évident que, devant les embouchures des grands fleuves, l'accumulation de sédiments soit très importante. Ces endroits correspondent donc, en général, aux taux d'accumulation sédimentaire les plus élevés. La contribution des particules détritiques diminue, avec l'augmentation de la distance aux continents et ne correspond plus, qu'aux particules argileuses à la limite de la plateforme (Thurman et al, 2002).

La productivité primaire, représentée principalement par le phytoplancton et donc la chlorophylle, est une des plus grandes sources de sédiments. Cet apport sédimentaire, dit

biogénique, est donc localisé aux régions de plus grande productivité primaire, qu'elle soit carbonatée ou siliceuse. La distribution de la chlorophylle à la surface des océans, dépend surtout, de la disponibilité en nutriments et se développe donc, dans les zones d'upwellings (Ouest des continents), dans les eaux de hautes latitudes et dans les contre-courants équatoriaux qui s'écoulent d'Est en Ouest (Wynn et al, 2000).

La distribution des sédiments marins reflète donc l'influence de ces trois paramètres. Les régions les plus profondes, qui se situent en dessous de la ligne de compensation des carbonates, sont caractérisées par des dépôts de type argiles rouges et des nodules polymétalliques. Les régions de productivité primaire élevée sont caractérisées, par des sédiments biogéniques carbonatés ou siliceux et les régions proches des continents par des sédiments terrigènes ou détritiques (Thurman et al, 2002).



Carte 33: Distribution globale des sédiments types sur les fonds océaniques (d'après Thurman et al, 2002).

Axe 2 : Analyse et interprétation des composants géochimiques en tant qu'indicateurs du climat terrestre au Sud-Ouest du Maroc

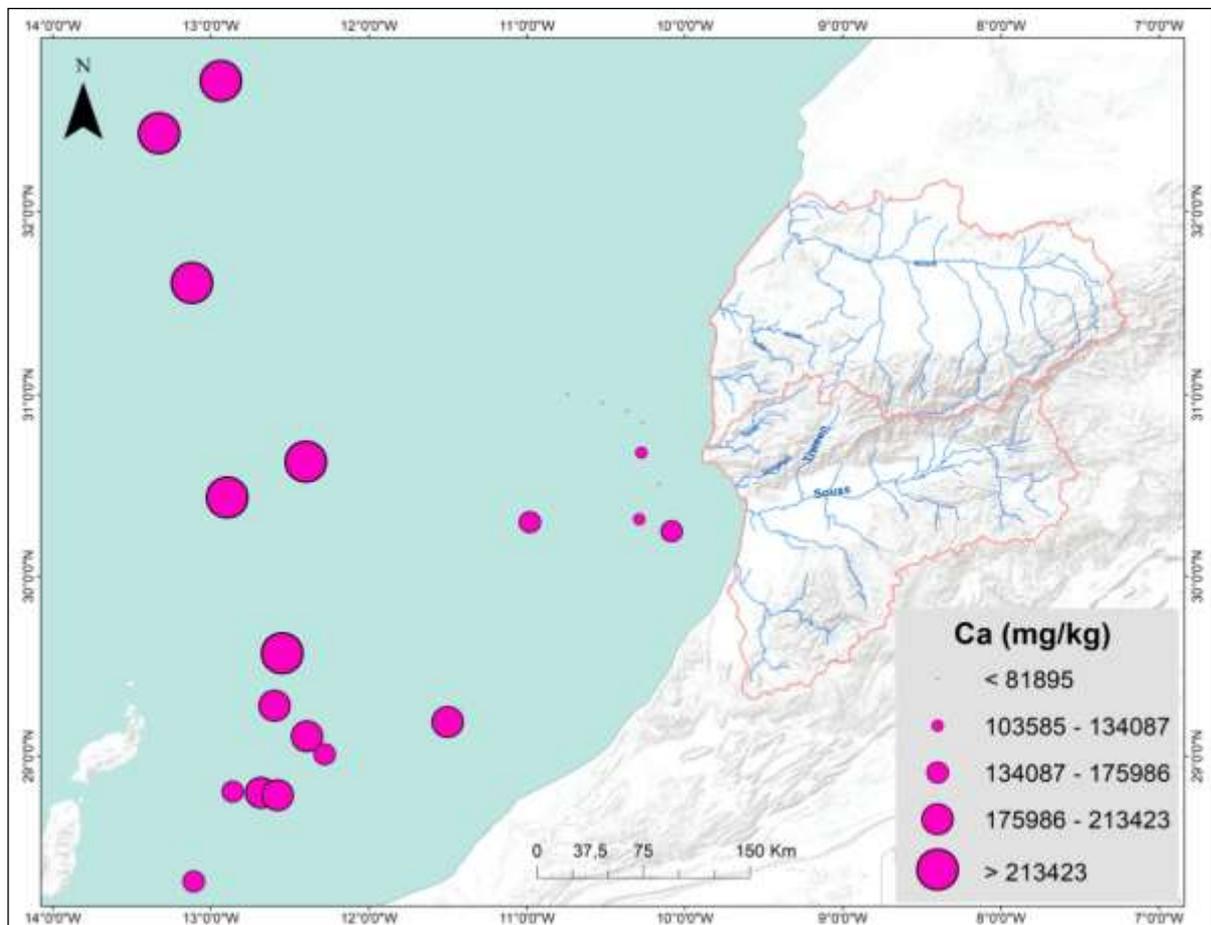
Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur sept éléments chimiques suivants : Ca, Fe, K, Mg, Al, Ti et Si qui sont liés aux composants siliciclastiques du sédiment, variant avec la fraction terrigène du sédiment, tandis que le Ca est souvent interprété, comme représentant le carbonate marin composant déposé sur le site.

I. Distribution des éléments géochimiques, en tant que données indirectes du climat terrestre au Sud-Ouest du Maroc :

Les figures ci-dessous, montrent la distribution des concentrations en éléments majeurs (mg/kg) des sédiments marins de surface à la côte atlantique au Sud-Ouest du Maroc. Nous observons en premier lieu, des distributions très similaires des éléments terrigènes Al, Fe, K, Mg, Ti et Si, puis une distribution clairement opposée de Ca. Le Ca présente des valeurs

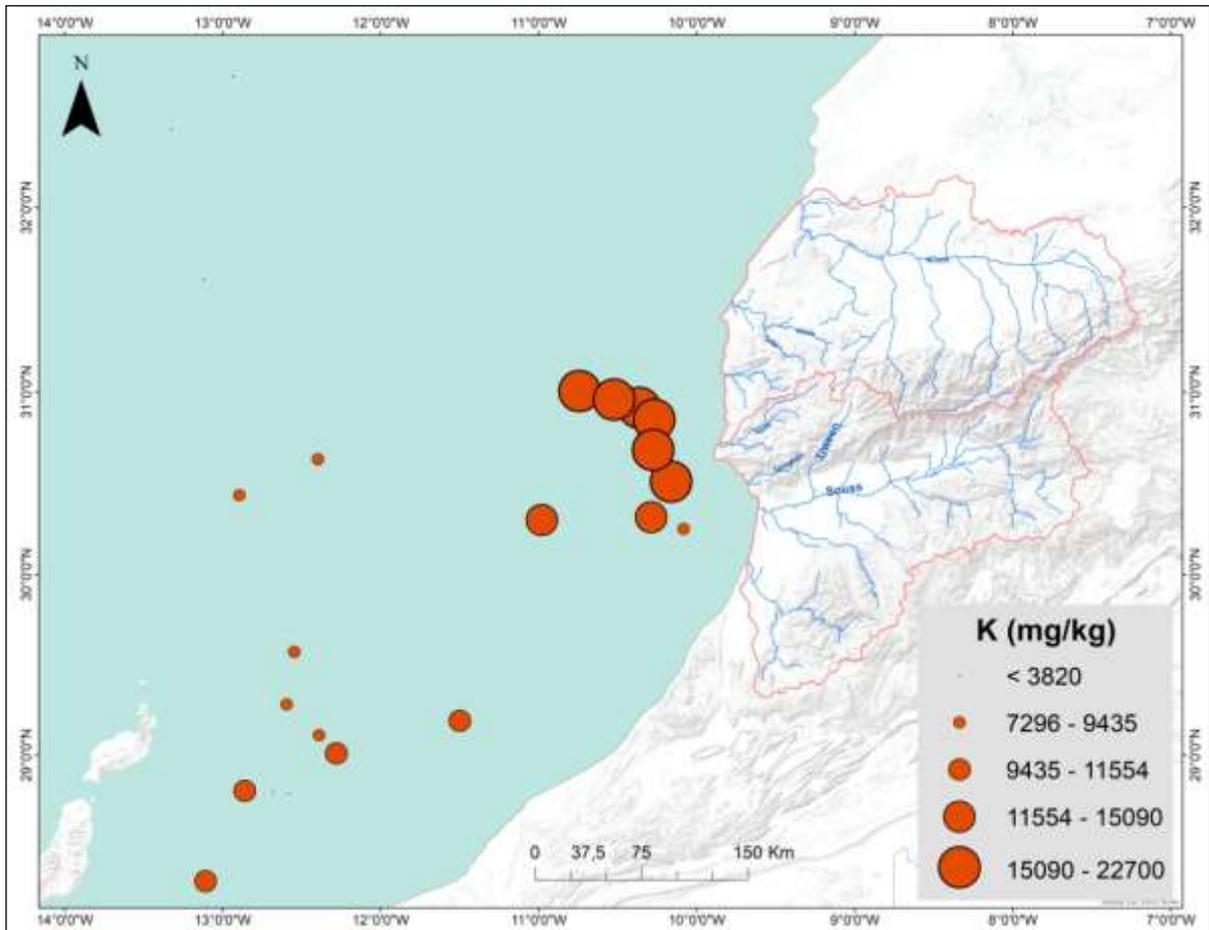
faibles près de la marge continentale, en particulier, dans les zones de l'embouchure des Oueds de bassin versant de Tensift et de Souss-Massa, et des valeurs élevées, plus loin du continent. La majeure partie du Ca contenu dans les sédiments de surface de l'Atlantique, peut donc être attribuée aux carbonates, probablement d'origine marine, comme l'ont montré des études antérieures (Richter et al, 2006 ; Jullien et al, 2007 ; Itambi et al, 2010). Alors que les teneurs des autres éléments terrigènes sont plus élevées aux marges continentales marocaines, que dans l'océan ouvert. Par conséquent, ces résultats indiquent clairement, l'effet des apports terrigènes sur la composition élémentaire des sédiments de surface, situés au long des marges continentales. De plus, nous pouvons distinguer entre deux régions. Nous observons (i) des valeurs de Ca les plus élevées avec des faibles valeurs d'éléments terrigènes (Al, Fe, Ti, K, Si, Mg), très loin de la marge continentale, (ii) des concentrations de Ca faibles parallèlement à de fortes concentrations d'éléments terrigènes (Al, Fe, Ti, K, Si, Mg), proche de la marge continentale au Sud-Ouest du Maroc, en particulier, à l'embouchure des Oueds des bassins versants de Tensift et de Souss-Massa (Souss, Tamri, Tamghart, Tensift, Ksob et Tidzi ...).

Globalement, tous les sites situés au long des marges continentales marocaines, présentent des teneurs relativement élevées d'éléments terrigènes, avec une teneur faible en Ca (carte 34). Les teneurs de Ca sont interprétées, en tant que représentant de la composante carbonatée déposée, étant donné que les faibles valeurs sont situées près la zone d'upwelling du Cap Ghir hautement productif, elles représentent probablement la productivité marine (Kuhlmann et al, 2004). On note ici que, le Ca ne reflète pas clairement la quantité de matière terrigène déposée sur le fond marin, il reflète plutôt une quantité importante des apports terrigènes, par rapport au contenu marin. Parce que, la concentration de Ca dans les sédiments dépend de la productivité et la dissolution des carbonates marins (Goven et al, 2012).



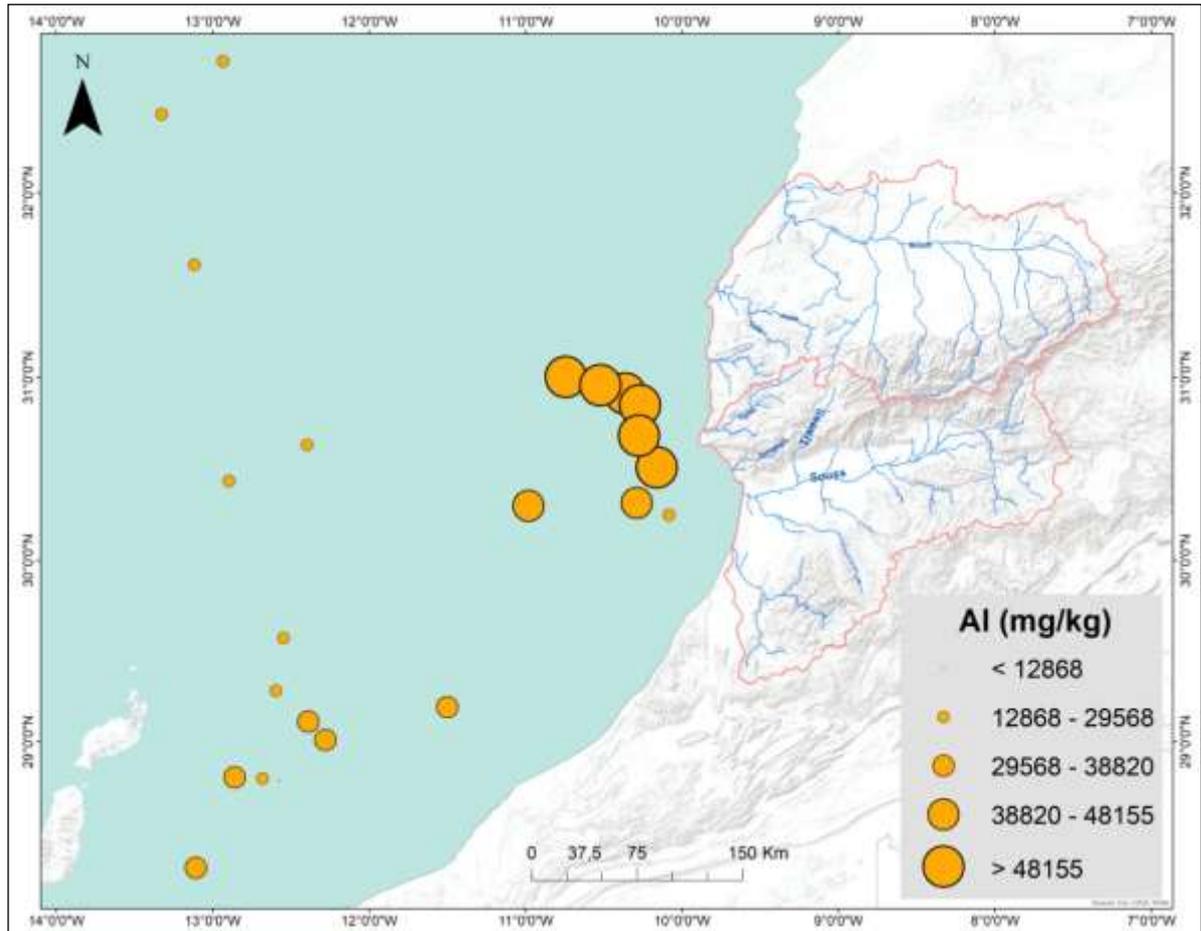
Carte 34 : Distribution spatiale d'élément de Ca (en mg/kg).

Le K est généralement associé à des siliciclastiques terrestres, tels que les argiles (illites) et le feldspath potassique (Yarincik et al, 2000). D'une part, le potassium est fréquemment utilisé pour étudier les changements climatiques (arides/humides), dans une région source (Kuhlmann et al, 2004) et d'autre part, pour identifier les régions d'origine des poussières éoliennes. Il existe des valeurs élevées de Potassium dans la région d'upwelling de Cap Ghir, car cette région est située à l'embouchure de plusieurs rivières du Sud Marocain.



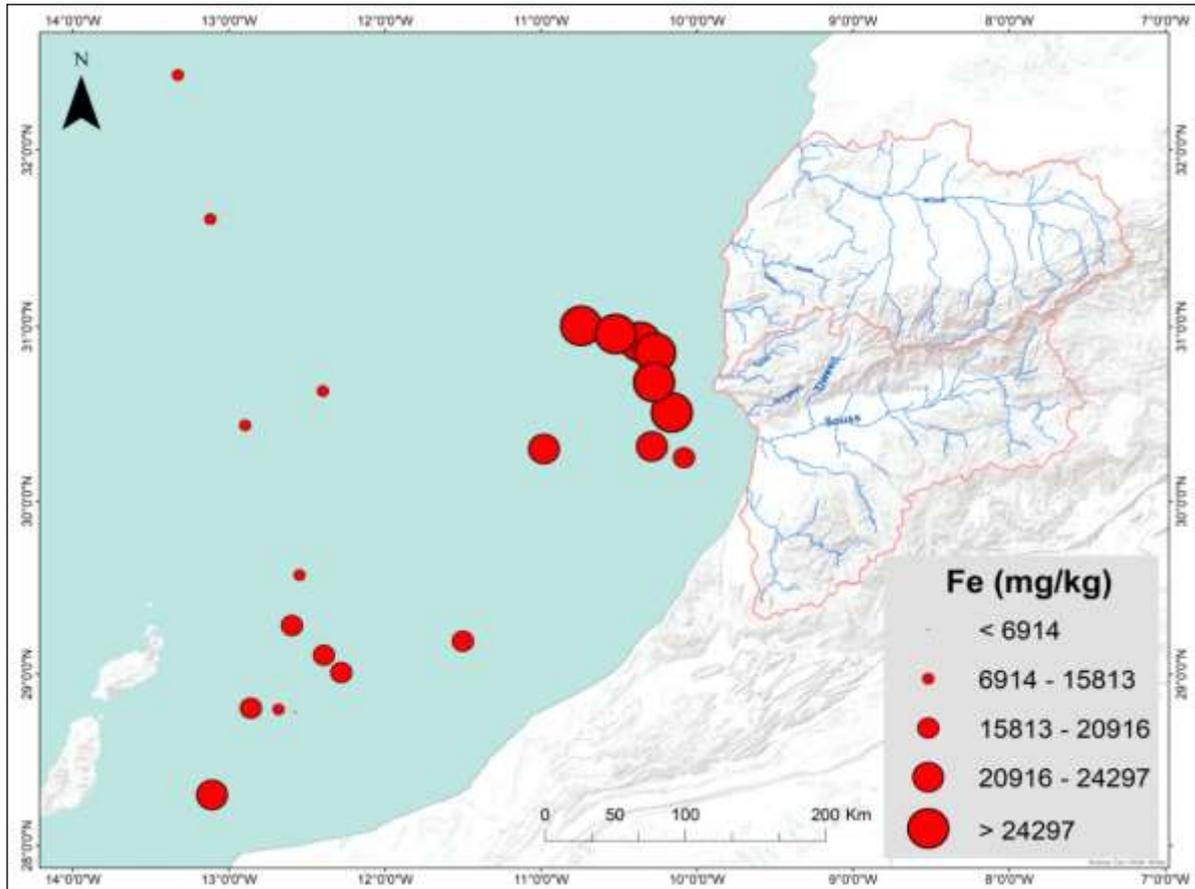
Carte 35 : Distribution spatiale d'élément de K (en mg/kg).

La distribution des teneurs en Al montre des valeurs élevées au Cap Ghir et relativement élevées au cap Yubi, ainsi qu'au large des îles Canaries. Les valeurs les plus basses sont enregistrées dans l'océan ouvert loin du continent. De nombreuses études antérieures ont lié l'Al à l'altération chimique intense, produisant de la kaolinite et des argiles smectites (Zabel et al, 2001). Le Potassium (K) et l'Aluminium (Al) sont tous prolifiques dans les minéraux argileux, avec une contribution moindre des Feldspaths et des Zéolithes, et le Potassium est principalement présent dans l'Illite tandis que l'Aluminium est abondant dans tous les minéraux argileux (Boyle, 1983). L'Illite est généralement un produit d'altération dans des climats arides, où l'altération physique est forte, puisque l'altération chimique est faible, la Kaolinite est généralement un produit de l'altération chimique, dans les climats tropicaux et humides (Yarincik et al, 2000).

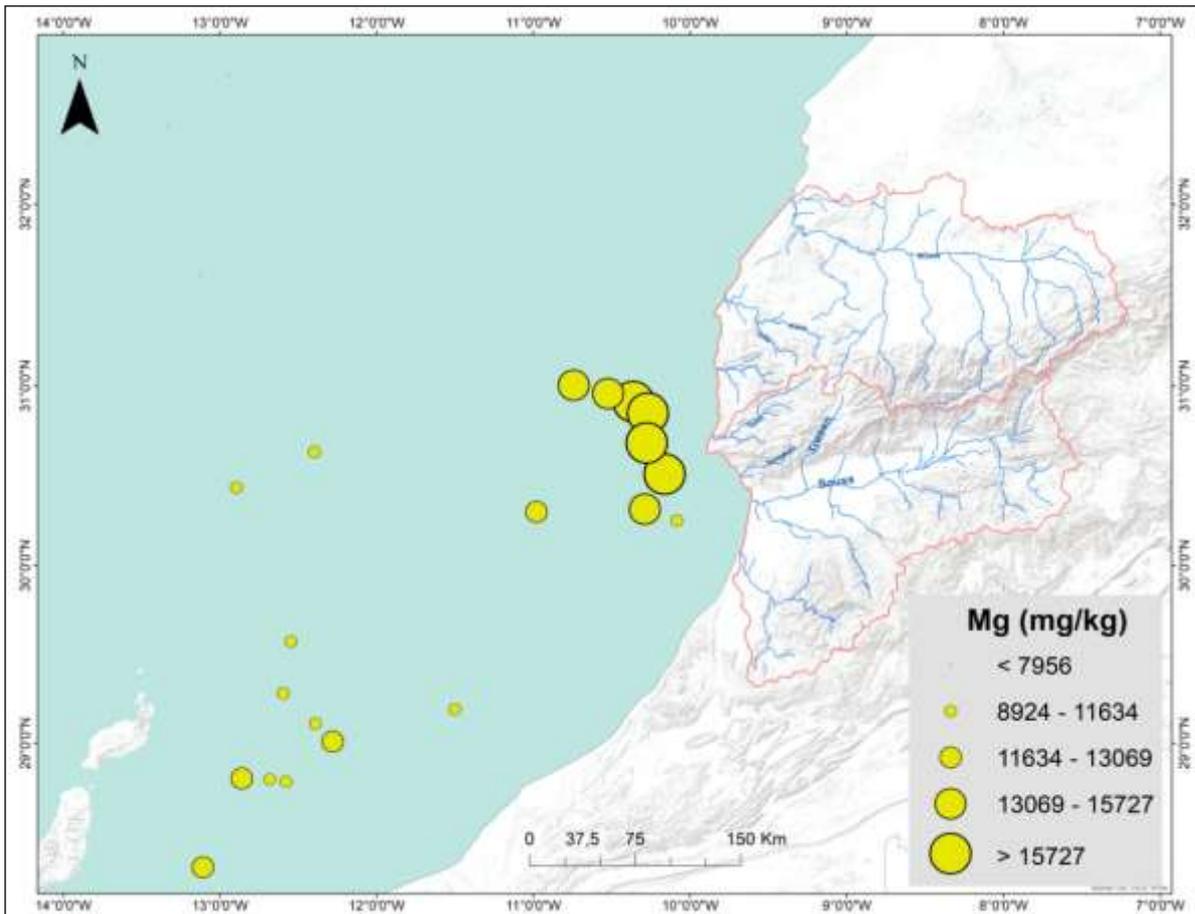


Carte 36 : Distribution spatiale d'éléments de Al (en mg/kg).

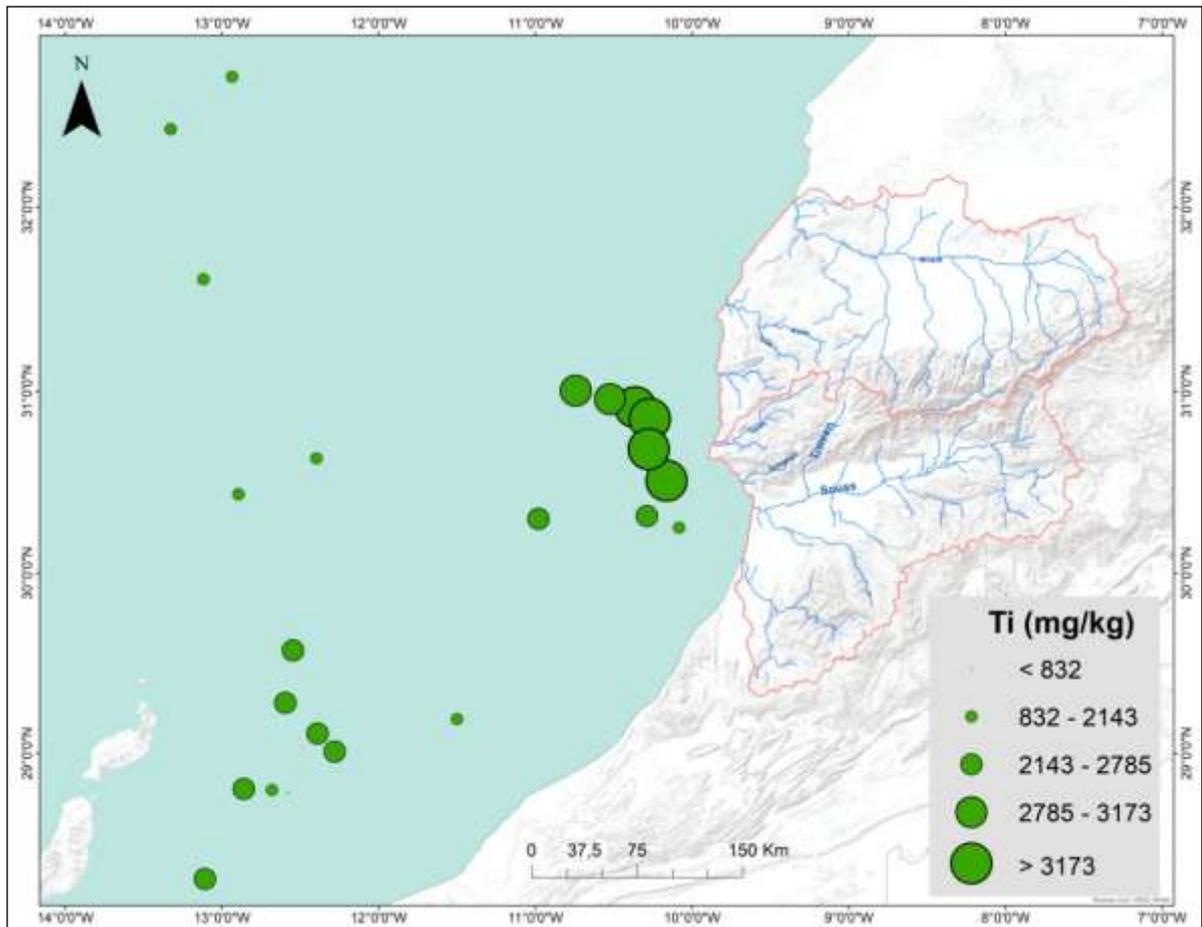
Les concentrations de Fe représentent également, des valeurs élevées dans la même région (Cap Ghir) pour la distribution de K et Al. Dans ce cas, ce pourrait être sous forme d'oxyhydroxydes de fer. De plus, le Ti reflète des valeurs élevées, le long des marges continentales et des valeurs faibles loin d'elles, le Ti étant beaucoup moins sensible à la diagenèse que le Fe. En outre, le Mg a enregistré des valeurs élevées, en particulier au site de Cap Ghir, cette région recevant des matériaux provenant principalement des fleuves du Sud-Ouest du Maroc (Souss, Tamri, Tamghart, Tensift, Ksob et Tidzi), ce qui explique l'augmentation du Mg dans cette région.



Carte 37 : Distribution spatiale d'élément de Fe (en mg/kg).

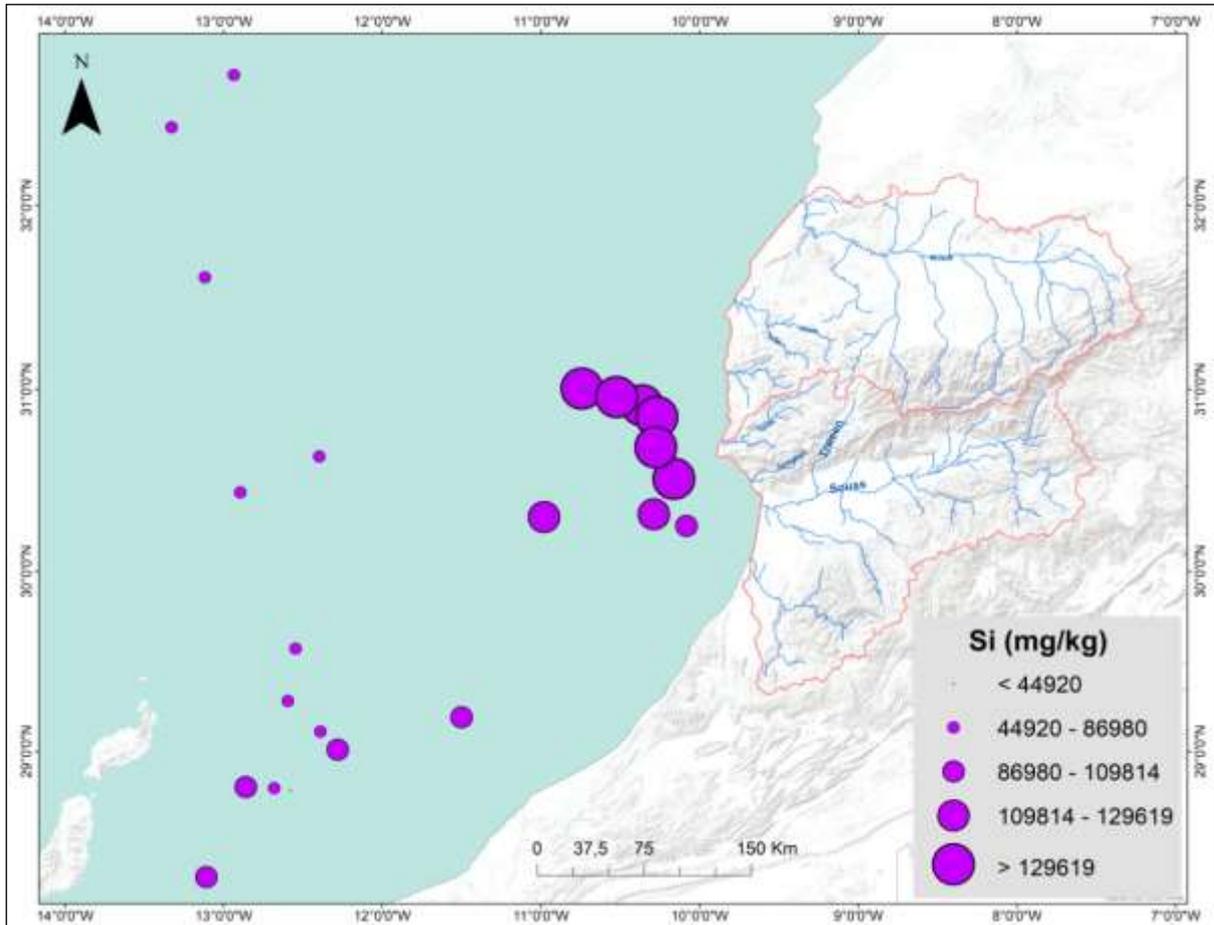


Carte 38 : Distribution spatiale d'élément de Mg (en mg/kg).



Carte 39 : Distribution spatiale d'élément de Ti (en mg/kg).

Enfin, les valeurs élevées de Si sont enregistrées, aux sites situés le long de la marge continentale marocaine, notamment, près de l'embouchure des fleuves et relativement aux marges des Canaries. Ces zones sont caractérisées par une productivité marine élevée (McGregor et al, 2007 ; Kuhlmann et al, 2004), ce qui explique les concentrations élevées de Si dans ces sédiments. Ils sont donc situés dans une région à forte productivité siliceuse et reçoivent des apports importants.



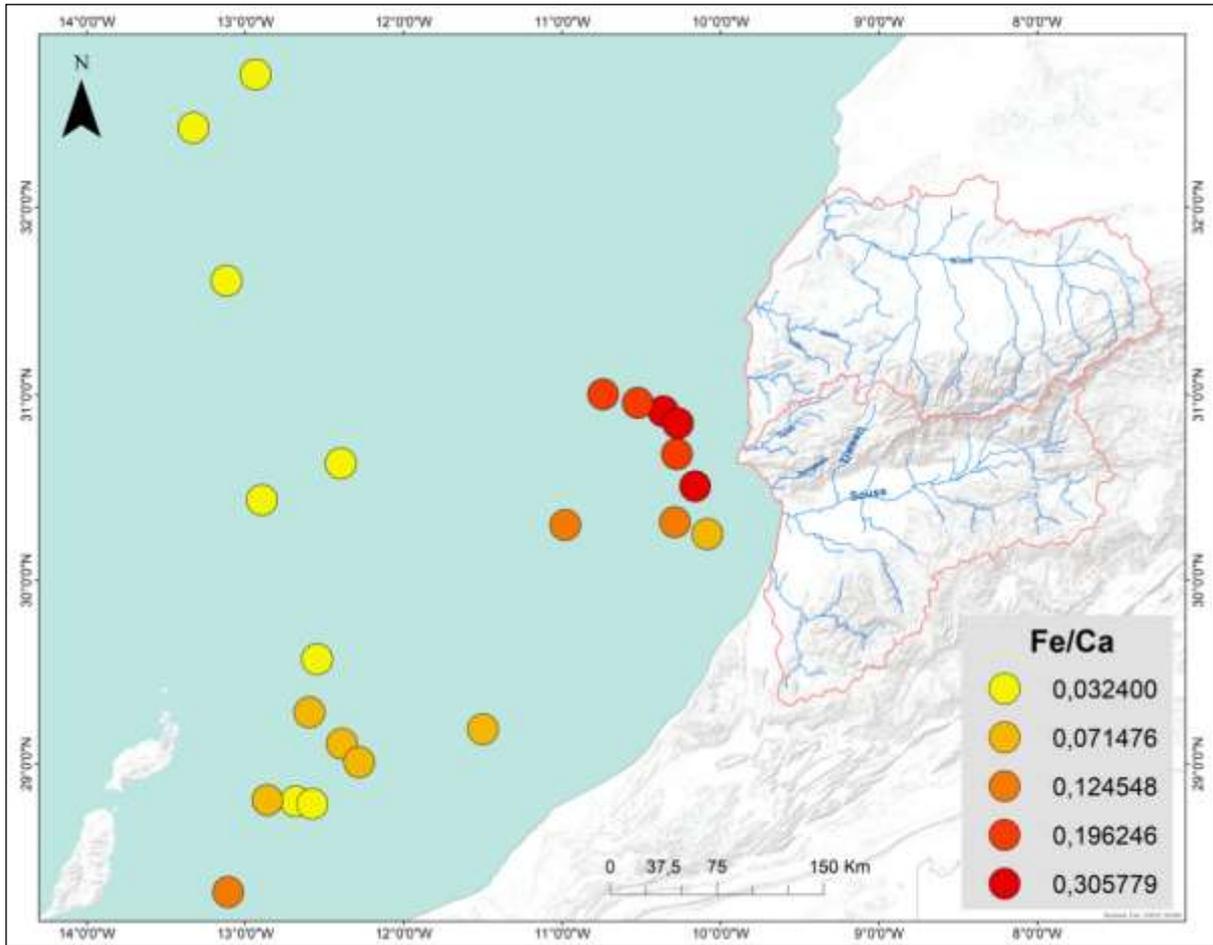
Carte 40 : Distribution spatiale d'élément de Si (en mg/kg).

II. Les rapports chimiques des sédiments marins, représentent un autre traceur des apports terrestres :

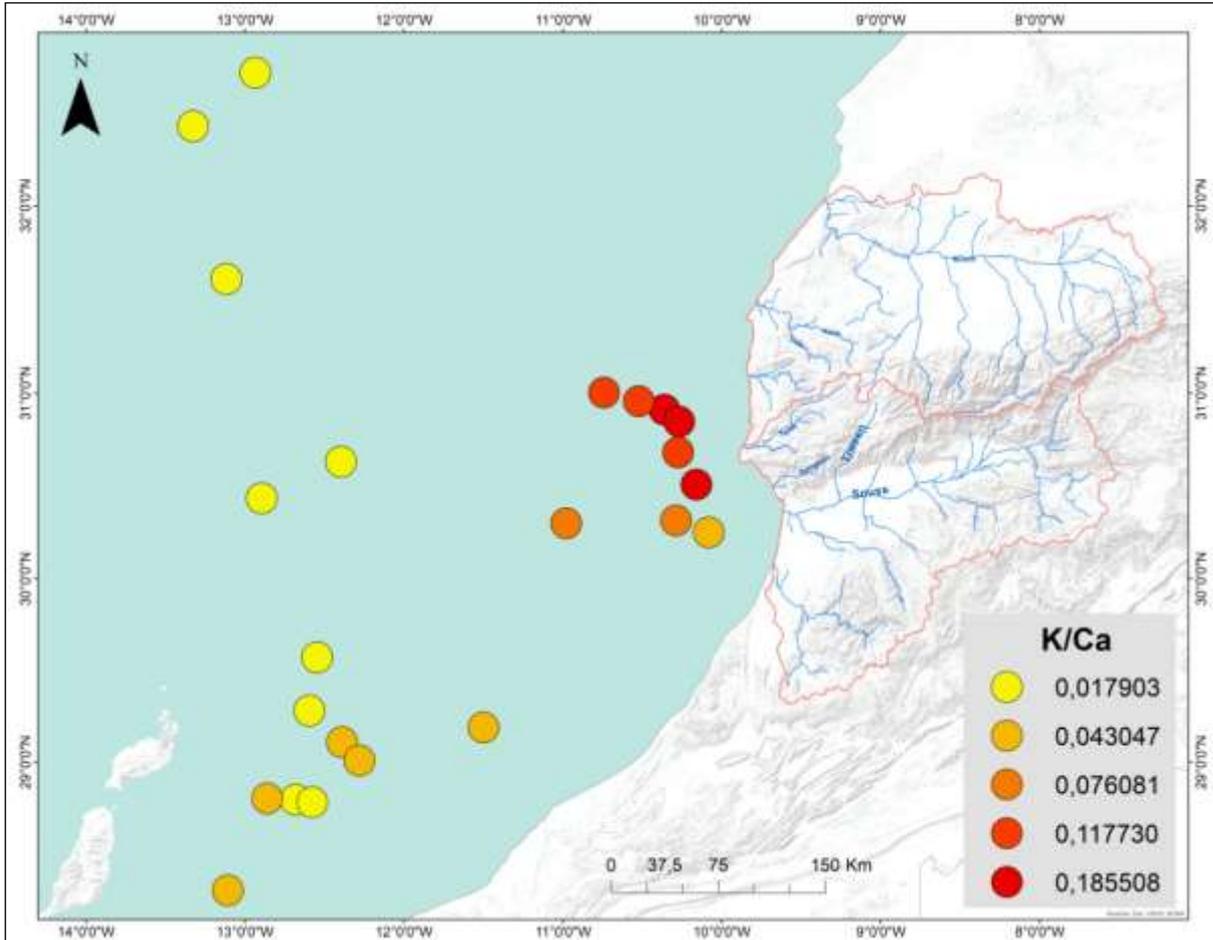
Nous présentons dans cette étude, les rapports chimiques suivants : K/Ca, K/Al, Fe/Ca, en tant qu'indicateurs de l'humidité relative, et Si/Al et Ti/Al, comme traceurs de poussières sahariennes.

1. Distribution du Fer/Calcium (Fe/Ca) et Potassium/Calcium (K/Ca)

La figure ci-dessous, montre que les rapports Fe/Ca et K/Ca, présentent des valeurs relativement similaires. Les valeurs de Fe/Ca et de K/Ca sont très élevées, en particulier dans les régions à forte densité fluviale des Oueds au Sud-Ouest du Maroc (Souss, Tamri, Tamghart, Ksob et Tidzi ...), et au sud des îles Canaries sur les sites GeoB8613-7 et GeoB8614-2 (28 °N, 14 °O). En revanche, il existe des valeurs faibles, loin des marges du continent.



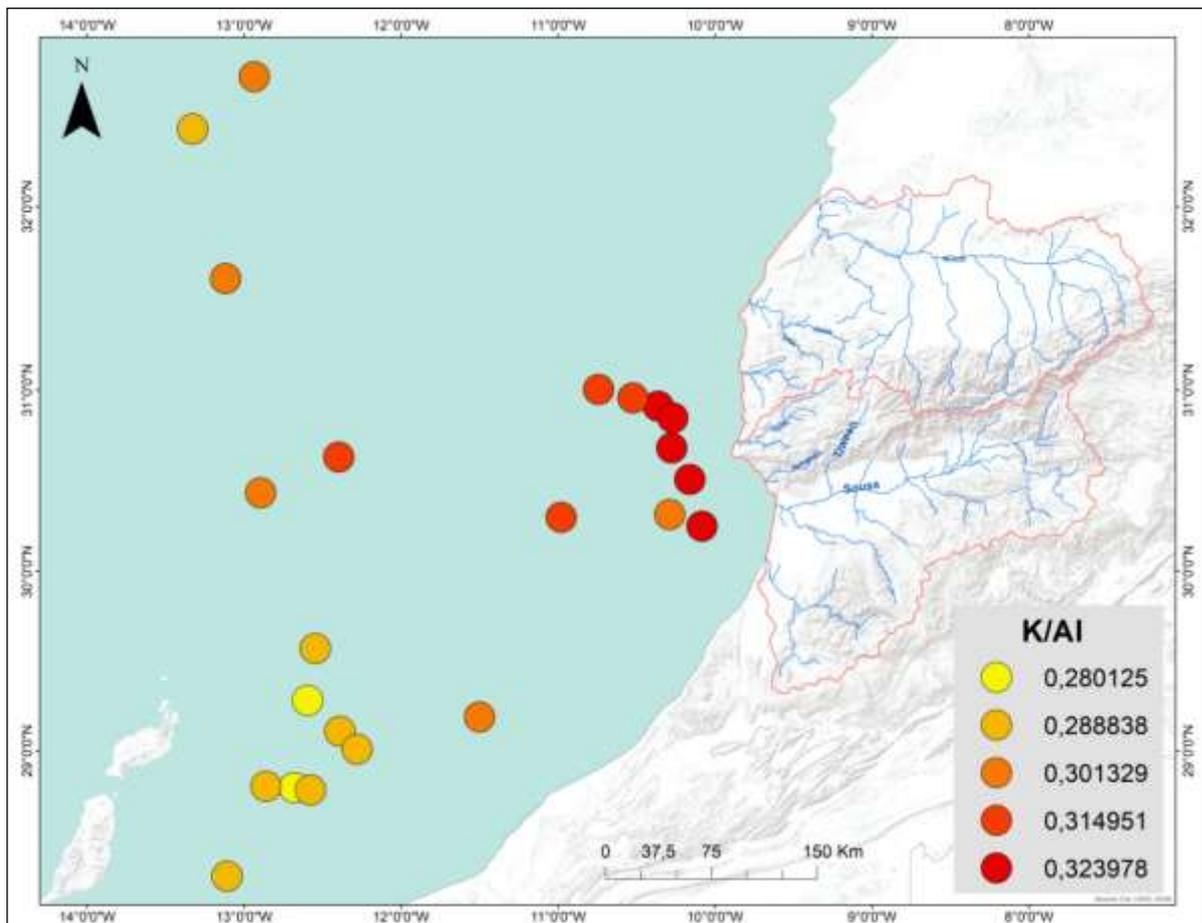
Carte 41 : Distribution spatiale du rapport Fe/Ca (en mg/kg).



Carte 42 : Distribution spatiale du rapport K/Ca (en mg/kg).

2. Distribution du Potassium/Aluminium (K/Al) :

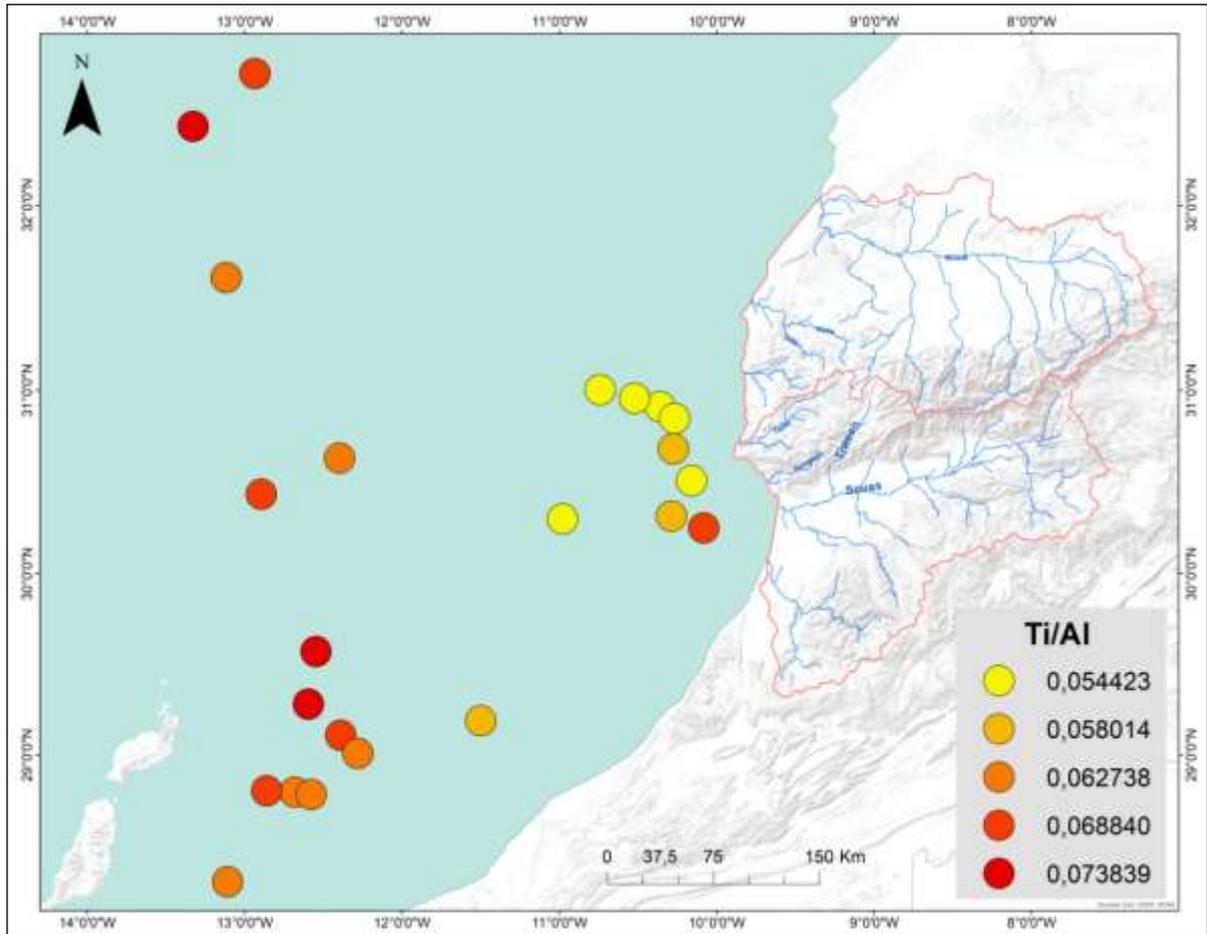
La figure ci-dessous, montre la distribution du rapport K/Al, dans lequel les valeurs K/Al sont très élevées, en particulier, au site de Cape Ghir où la région des fleuves marocains (Tensift, Asserssif, Tamghart, Temri et Igouezollen...). Par conséquent, les valeurs moyennes de K/Al sont enregistrées aux sites GeoB8606-2 (31,00 °N, 10,74 °O), GeoB6011-2 (30,31 °N, 10,28 °O), GeoB4210-2 (30,3 °N, 10,98 °O), GeoB4216-2 (30,63 °N, 12,39 °O), GeoB4217-1 (30,43 °N, 12,89 °O) et GeoB5561-1 (32,70 °N, 12,93 °O). Par contre, Les faibles valeurs sont enregistrées aux sites situés entre les îles Canaries et les côtes marocaines (29,57 °N et 27,53 °N).



Carte 43 : Distribution spatiale du rapport K/Al (en mg/kg).

3. Distribution du Titane/Aluminium (Ti/Al)

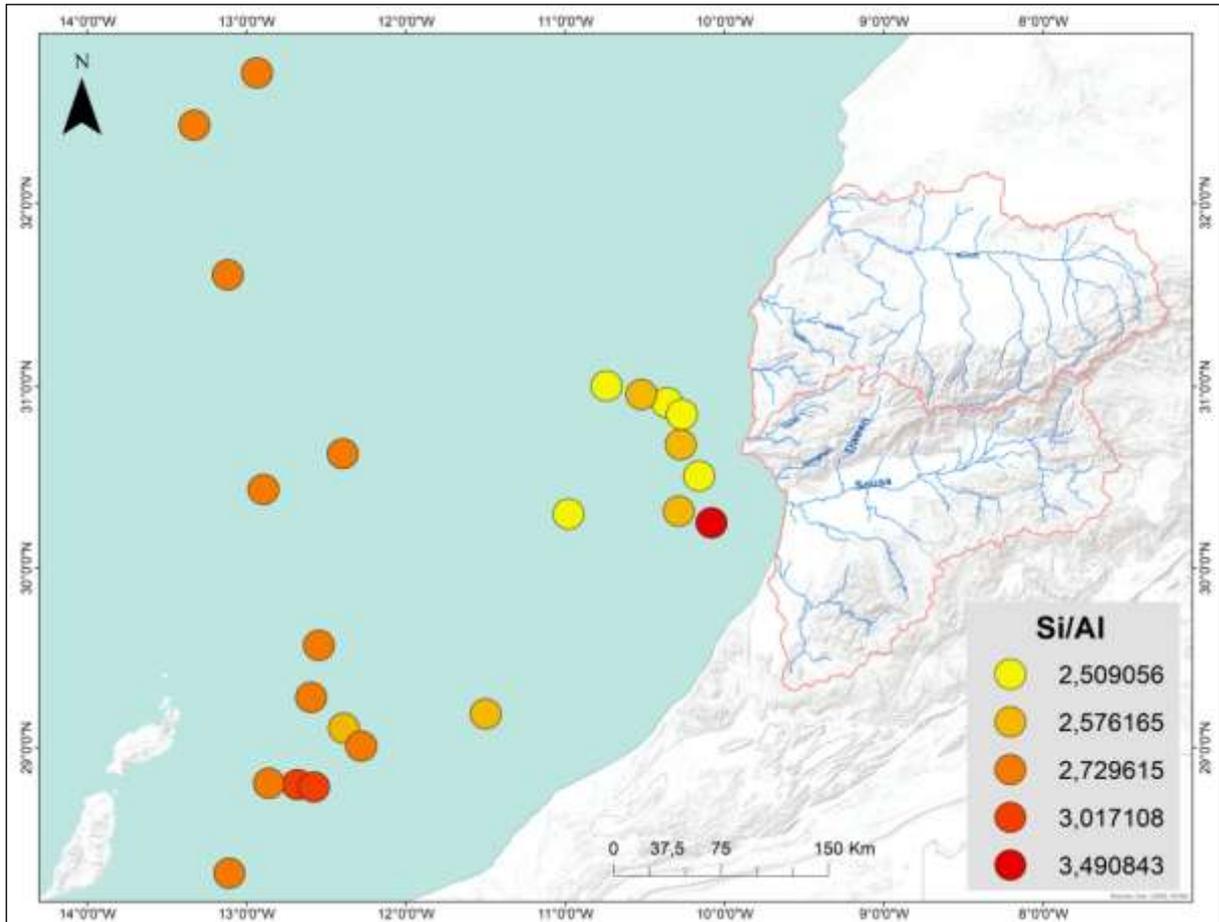
Deux sites situés près des îles Canaries, présentent des valeurs élevées en Ti/Al : (i) site GeoB4218-1 (29,57 °N, 12,54 °O), GeoB4228-2 (29,28 °N, 12,59 °O) et GeoB4229-1 (29,11 °N, 12,39 °O) situés au nord des îles Canaries. (ii) site GeoB4201-2 (32,42 °N, 13,32 °O) et GeoB5561-1 (32,7 °N, 12,93 °O). De plus, les faibles valeurs du rapport Ti/Al sont observées le long des marges continentales marocaines, en particulier, proche de la région de Cap Ghir entre 32 °N et 30 °N. Cette région reçoit principalement des apports terrigènes d'origine fluviale, provenant des Oueds Souss, Tamri, Tamghart, Ksob et Tidzi.



Carte 44 : Distribution spatiale du rapport Ti/Al (en mg/kg).

4. Distribution de Silicium/Aluminium (Si/Al) :

Deux sites de l'étude montrent (i) des valeurs relativement élevées de Si/Al, principalement au site GeoB6010-1 (30,25 °N, 10,08 °O), situé au sud du cap Ghir. (ii) De faibles valeurs de Si/Al ont été enregistrées dans la majeure partie de la région, en particulier, le long des marges continentales du Maroc, près de l'embouchure d'Oueds de Souss, Tamri, Tamghart, Ksob et Tidzi.



Carte 45 : Distribution spatiale du rapport Si/Al (en mg/kg).

La distribution spatiale de K/Ca montre des valeurs élevées, dans la région du Cap Ghir. On suppose que, l'augmentation des apports fluviaux de matières terrigènes joue un rôle important dans cette région. Cette interprétation est appuyée par des études montrant que les sédiments sont déversés dans l'océan Atlantique Nord-Est subtropical, par la rivière du Souss (Wynn et al, 2000). De plus, les analyses granulométriques d'échantillons de surface dans cette région (Holz et al, 2004), sont en accord avec ces résultats. Ces auteurs ont montré que la fraction à grains fins de source fluviale est piégée à la zone située au large du cap Ghir, où elle constitue jusqu'à 90% de la composition relative des sédiments. La teneur en Illite des sédiments marins reflète avec une manière impressionnante, le pourcentage et la distribution des particules terrigènes transportées par le transport fluvial (Futterer, 2000).

Les valeurs du rapport K/Al des sédiments de surface, augmentent significativement. Les valeurs du K/Al les plus élevées sont trouvés proches de la marge continentale (en particulier entre 31°N et 30,5°N). Il est suggéré que, deux mécanismes de transport différents (éolien et/ou fluvial), peuvent être responsables de la manière de distribution observée. Les caractéristiques géologiques dans la zone d'étude, jouent également un rôle important dans l'interprétation des résultats de K/Al. Par conséquent, le signal du vent transportant du matériel terrigène dans les sédiments du fond marin dans la partie Nord de la zone d'étude (32 °N et ~29,5 °N) est caractérisé par des matières terrigènes riveraines du Sud-Ouest du Maroc et le drainage des montagnes de l'Atlas et de l'Anti-Atlas. En outre, les valeurs trouvées dans les sédiments peu profonds le long de la côte sont supposées être également un produit de détritux fluviaux épisodiques, car on sait que les matières transportées par les rivières sont efficacement piégées sur les plateaux et les pentes continentaux (Sarnthein et al, 1982). En revanche, au Sud du 30 °N, les conditions climatiques sont peut-être plus arides, par

conséquent, les apports en terrigènes se produisent principalement, sous forme de poussière éolienne. Ceci peut être principalement influencé par l'apport éolien de matériaux détritiques (Sarnthein et al, 1982). Les faibles valeurs de K/Al observés dans les sédiments de surface du Cap Yubi et des îles Canaries, indiquent l'influence de la poussière, provenant des déserts pauvres en Illite (Petschick et al, 1996).

Alors que, les valeurs du rapport Fe/Ca les plus élevées se trouvent à la marge continentale au Sud-Ouest du Maroc, avec des valeurs relativement faibles près des côtes des îles Canaries. En effet, les valeurs élevées de Fe/Ca apparaissent aux sites du sud du cap Ghir (31-30°N et 10-12°O). Une faible valeur Fe/Ca concorde avec celles enregistrées dans les sédiments de surface de la marge africaine située au Nord de 17 °N et au Sud de 10 °S, à partir des régions relativement sèches (Goven et al, 2012). De plus, ces faibles valeurs de Fe/Ca pourraient indiquer, que le dépôt dominant des particules peu altérées, peuvent être provenir des zones relativement sèches. Par contre, les matières en suspension transportées par les Oueds du Sud-Ouest du Maroc, en particulier, les Oueds Souss, Tensift, Tamri, Tamghart, Ksob et Tidzi, présentent des valeurs élevées par rapport aux autres zones. Ces valeurs sont similaires à celles mesurées, dans les sédiments tropicaux africains situés entre 17 °N et 10 °S dans les régions de haut débit de sédiments fluviaux (Goven et al, 2012). Ainsi, ces valeurs élevées de Fe/Ca enregistrées, à la marge continentale au Sud du Maroc pourraient être associées à la présence de sols fortement et intensément altérés enrichis en Fe. Enfin, l'application de ces résultats aux reconstructions paléoclimatiques, suggère que l'augmentation des valeurs de Fe/Ca dans les sédiments marins, indiquent la présence de conditions climatiques plus humides dans le bassin versant (Mulitza et al, 2008). La remobilisation de Fe diagenétique peut cependant, se produire pendant les processus d'oxydoréduction dans les sédiments (Zwolsman et al, 1999).

Les valeurs élevées du rapport Ti/Al observées dans certains échantillons, indiquent l'influence de la poussière provenant des déserts, pouvant être pauvres en Illite (Petschick et al, 1996). La distribution du rapport Ti/Al dans la zone d'étude montre des valeurs faibles. Ces régions sont dominées par l'apport de matières en suspension, le long de la zone côtière où le drainage des montagnes de l'Atlas (Oueds Tamri, Tamraght, Souss ...). La distribution de Ti/Al représente en général, des valeurs faibles au large du Cap Ghir et des valeurs relativement élevées au Nord et l'Est des îles Canaries. Des valeurs élevées de Ti/Al indiquent une contribution accrue de l'apport de poussière, par rapport à l'apport de matières en suspension. On suppose que le modèle de distribution observé, peut être lié à la différence entre l'assemblage minéral provenant des basaltes volcaniques et des gabbros des îles (Kuss et al, 1999) et des sources sahariennes potentielles (principalement minéraux argileux, calcite et quartz). Par conséquent, les échantillons de surface des îles proches de la côte du Cap Ghir sont caractérisés par des valeurs inférieures. En effet, les valeurs du rapport Ti/Al des échantillons de surface assez relativement élevés, cette distance croissante conduisant à la prédominance de la poussière saharienne, le matériel lithogène du continent africain augmente proportionnellement avec la distance à la zone côtière. Ainsi, l'advection latérale doit être prise en compte peut être à il est possible que les courants de fond entraînent un transport des grains les plus lourds vers les océans plus profonds (Plewa et al, 2012). Il est important de noter que, la distribution du rapport Ti/Al pourrait révéler les différentes régions sources. De plus, le schéma de distribution de ces rapports, représente les différents mécanismes de transport, les types du climat, la géologie et les compositions du sol (Plewa et al, 2012).

Le Silicium et l'Aluminium sont présents dans les minéraux argileux détritiques, les Zéolithes et les Feldspaths (Windom, 1976). En ce qui concerne la distribution du rapport Si/Al, ce dernier représente en général, des valeurs faibles, le long de la côte atlantique marocaine et des valeurs relativement élevées au Nord et l'Est des îles Canaries. En effet, le Si dans les sédiments marins est principalement dérivé des aluminosilicates et du quartz. Le rapport Si/Al indique la proportion relative de quartz dans les aluminosilicates et a été largement utilisé dans l'étude des paléo-enregistrements côtiers du sud marocain (Sarnthein et al, 1982). Ainsi, les phases arides se caractérisent, par une augmentation de la quantité de quartz éolien.

CONCLUSION

L'analyse spatiale des composants chimiques des sédiments marins et continentaux révèle des compositions terrigènes relativement cohérentes. La concentration en éléments majeurs et traces dans les sédiments marins est influencée par le transfert continental, qu'il s'agisse de l'apport fluvial ou éolien.

Les données chimiques obtenues mettent en évidence des variations significatives dans la composition élémentaire des sols terrestres et des sédiments marins de surface en fonction des latitudes. Ces variations reflètent la diversité à petite échelle des sites d'échantillonnage et des environnements associés, tels que les sédiments des rives, les dépôts de crue, les charges en suspension, et les sols, parmi d'autres.

Cette étude nous a permis de caractériser les sédiments de surface situés à l'embouchure des Oueds du bassin versant de Tensift et de Souss-Massa, ainsi que dans la zone s'étendant entre les îles Canaries et la côte atlantique du Sud-Ouest du Maroc.

La distribution spatiale des éléments géochimiques dans les sédiments marins de surface au Sud-Ouest du Maroc montre une cohérence relative des compositions terrigènes d'un site à l'autre. Cette cohérence est attribuable à une interaction complexe entre les apports éoliens et les apports fluviaux, provenant principalement de deux sources : la zone Saharienne et les Oueds de l'Atlas.

Dans cette thèse, nous avons réalisé pour la première fois une cartographie des concentrations d'éléments majeurs tels que le Ca, Al, Fe, K, Mg, Ti et Si dans les sédiments de surface de la côte atlantique du Sud-Ouest marocain. Nos données révèlent des concentrations élevées en éléments terrigènes le long des marges sud du Maroc, ainsi que des concentrations plus faibles en calcium, en particulier en haute mer, loin des marges continentales. Cette caractéristique traduit l'influence des apports terrigènes le long des marges sud marocaines. Toutefois, l'impact de ces apports de matières terrigènes se manifeste dans la composition géochimique des sédiments de surface. En effet, la distribution des éléments chimiques le long de la côte atlantique sud marocaine révèle que la dilution des éléments terrigènes par les carbonates et l'opale biogénique est plus prononcée dans les régions de forte productivité biologique, notamment au site d'upwelling de Cap Ghir. Cette dilution affecte également les concentrations individuelles des éléments.

La composition géochimique des matériaux terrigènes déposés sur la côte atlantique marocaine détermine les rapports élémentaires tels que Fe/Ca, K/Ca, K/Al, Si/Al, Ti/Al, dans les sédiments de surface. Cette composition dépend de la source des matériaux terrigènes, notamment le type de roches, de sols, et de leur degré d'altération chimique. De plus, elle reflète les conditions climatiques dans les bassins versants. Dans cette étude, les distributions des rapports Ti/Ca et Si/Al ont été utilisées comme indicateurs des apports éoliens de matériau terrigène, tandis que les distributions des rapports Fe/Ca, K/Al, K/Ca et Fe/Ca sur la côte atlantique sud marocaine ont été utilisées pour identifier les apports fluviaux de matériau terrigène. Il convient de noter que plusieurs facteurs géologiques, topographiques et diagénétiques influencent la répartition des éléments chimiques dans les sédiments marins, ce qui nécessite une prise en compte de ces facteurs lors de l'application de ces ratios à des reconstructions climatiques.

En conclusion, les résultats de cette étude démontrent que la distribution spatiale des éléments géochimiques permet d'identifier les sites ayant principalement reçu des apports de matières terrigènes, et de discerner les différentes conditions climatiques dans la région. Ces

observations résultent des différentes voies de transport, notamment les apports fluviaux dans les régions humides et les apports éoliens dans les régions arides, ainsi que des variations des matériaux lithogéniques.

CHAPITRE N° 3 :
CONTRIBUTION À LA RECONSTITUTION DU
CLIMAT DES DEUX DERNIERS MILLÉNAIRES AU
SUD-OUEST DU MAROC

INTRODUCTION

Comprendre les mécanismes et les causes des changements climatiques brusques constitue l'un des défis majeurs de la recherche en paléoclimatologie aujourd'hui. Les résultats des carottes de sédiments prélevées dans l'océan Atlantique indiquent une forte sensibilité de ces régions aux changements climatiques et océanographiques millénaires (Moreno et al., 2002).

La reconstitution du climat passé et de l'environnement océanographique repose sur plusieurs indicateurs, appelés proxies, qui sont établis pour diverses propriétés physiques, chimiques et biologiques de l'environnement (Calvert et al., 2007). À l'échelle mondiale, ces proxies sont obtenus à partir de cernes d'arbres, de registres de pollen, de coraux, de spéléothèmes, de tourbières, de carottes de glace, ainsi que de sédiments marins et lacustres. La résolution des données paléoclimatiques et paléoenvironnementales dépend de la qualité de ces archives naturelles. Cette synthèse sur le paléoclimat de la région Nord-Ouest de l'Afrique au cours des derniers 2000 ans est basée sur de nombreux enregistrements de sédiments marins disponibles dans cette région. Les sédiments marins offrent une continuité des enregistrements sur l'ensemble de la période considérée, avec des résolutions à l'échelle du millénaire, du siècle, voire de la décennie dans certaines régions où la vitesse de sédimentation est élevée.

Pour élucider les propriétés complexes et interconnectées enregistrées dans les sédiments marins, de multiples méthodes géochimiques ont été utilisées pour développer des proxies pour les études paléoclimatiques et paléoenvironnementales. Ces méthodes comprennent l'utilisation d'isotopes stables (Wit et al., 2013), de biomarqueurs moléculaires (Rampen et al., 2012 ; Weijers et al., 2014) et d'assemblages microfossiles (Garzanti et al., 2009), entre autres.

La composition chimique et les rapports élémentaires des sédiments sont des indicateurs adaptés pour identifier la source des sédiments, la paléo-circulation, la paléo-productivité, les conditions d'oxydo-réduction des dépôts et la diagenèse, ainsi que pour reconstruire les variations climatiques passées et les mécanismes de forçage associés à ces variations à différentes échelles. De nombreuses études paléoclimatiques ont fourni des informations importantes sur les tendances régionales et mondiales de la variabilité du climat dans la région Nord-Ouest de l'Afrique (Malanotte et al., 2014), qui est considérée comme un laboratoire naturel exceptionnel pour les études paléoenvironnementales (Picotti et al., 2014). Sa position latitudinale, où les régimes climatiques du Sud et du Nord interagissent, rend cette région très sensible aux changements climatiques (Lionello et al., 2006).

Les excellentes archives paléoclimatiques des sédiments marins ont fourni une vaste base de données sur la géochimie des sédiments. Les taux de sédimentation élevés dans certaines régions ont permis d'obtenir des enregistrements à très haute résolution. Les variations climatiques de l'Holocène supérieur ont fourni des indications précieuses sur les variations actuelles (Schmittner et al., 2011). Dans cette perspective, un accent particulier a été mis sur la reconstitution paléoclimatique au cours des derniers 2000 ans.

L'objectif principal de ce chapitre est de comparer et d'appliquer des analyses géochimiques et sédimentologiques des sédiments marins afin de reconstruire les changements climatiques et océanographiques survenus au cours des derniers 2000 ans dans le Sud-Ouest du Maroc. Cette étude se concentre principalement sur la relation entre les processus terrestres et océaniques.

Axe 1 : La reconstitution des caractéristiques paléoclimatiques au Sud-Ouest du Maroc

La fiabilité des études géochimiques dépend étroitement de la qualité des enregistrements sédimentaires (McCave, 2007). Une chronologie détaillée est également cruciale pour les reconstructions paléo-climatiques et paléo-environnementales. Les procédures analytiques appropriées jouent également un rôle essentiel dans la réalisation de paléoreconstructions fiables, en particulier lorsqu'il s'agit de l'analyse des rapports élémentaires, notamment lorsque les échantillons de sédiments sont digérés. De plus, des méthodes adéquates sont nécessaires pour assurer la dissolution des minéraux, ce qui revêt une importance majeure pour l'interprétation fiable des données indirectes, telles que les proxies des matières détritiques.

Les avancées technologiques ont grandement contribué au développement de nouvelles approches géochimiques, en améliorant les limites de détection, la précision et l'étalonnage. En ce qui concerne les sédiments marins au cours de la dernière décennie, les analyses géochimiques ont été profondément transformées grâce au développement d'outils analytiques de pointe.

Les sédiments marins enregistrent les changements paléoclimatiques au fil du temps à travers les variations des concentrations d'éléments chimiques. L'objectif principal de ce travail est d'identifier ces changements survenus au Sud-Ouest du Maroc au cours des derniers 2000 ans en se basant sur les composants géochimiques des enregistrements des sédiments marins en tant qu'indicateurs, ou proxies, paléoclimatiques. Nous examinerons en détail tous les éléments chimiques et rapports élémentaires qui sont les plus fiables et couramment utilisés dans notre domaine d'étude, tout en évaluant les incertitudes liées à leur utilisation pour les reconstructions paléoclimatiques.

Les études portant sur le paléoclimat au Sud-Ouest du Maroc à partir de la composition élémentaire des sédiments marins sont généralement basées sur l'interprétation d'éléments spécifiques et de rapports spécifiques. Cependant, ces éléments dépendent de la géologie, de la topographie et des caractéristiques climatiques des régions sources des matériaux terrigènes, ce qui rend leur interprétation dans un contexte climatique complexe (Govin et al., 2012).

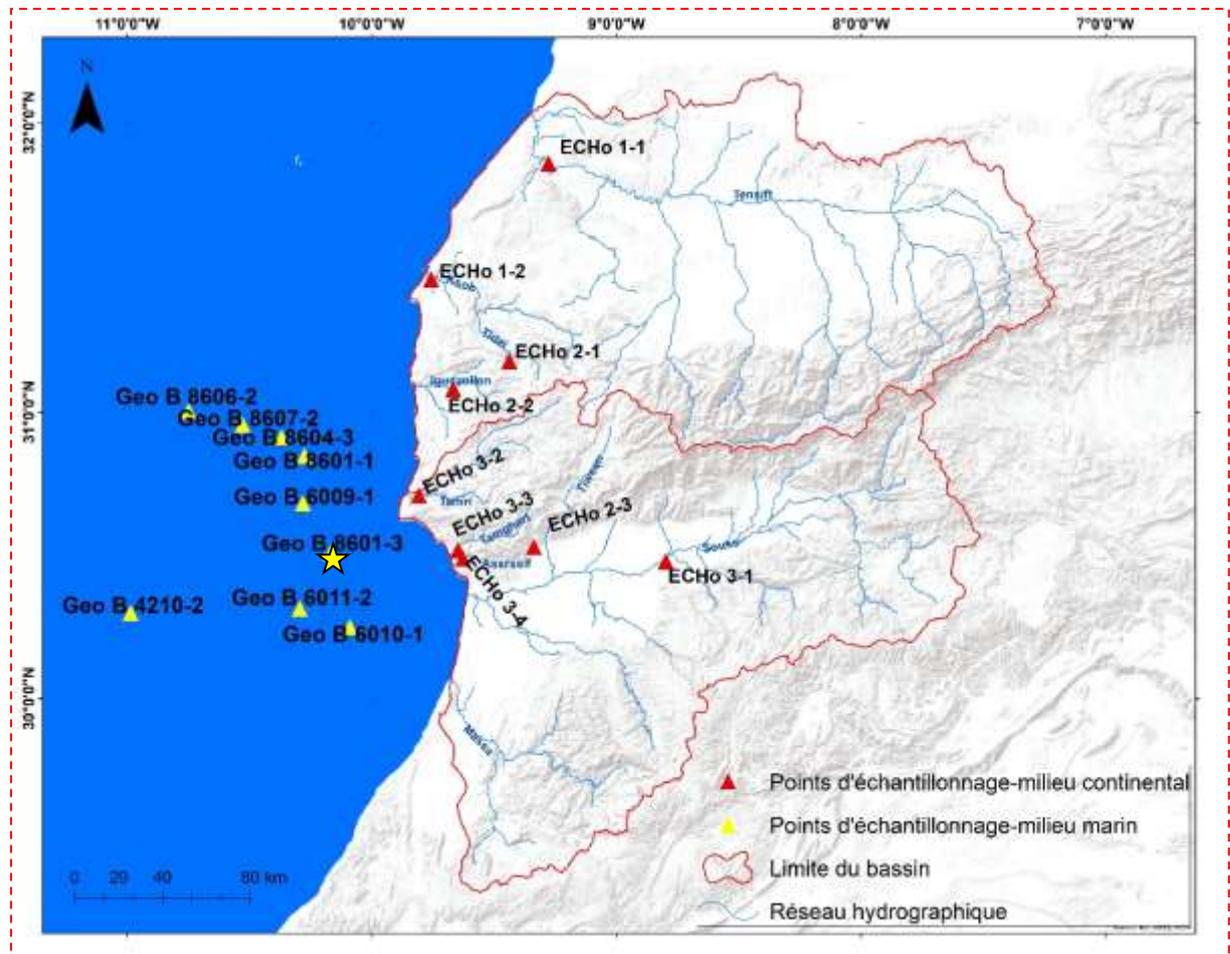
Dans cette thèse, l'accent est mis sur la région du Sud-Ouest du Maroc en raison de sa grande sensibilité aux changements climatiques. Les éléments qui se sont avérés particulièrement utiles pour caractériser le climat passé au Sud-Ouest du Maroc au cours des derniers 2000 ans sont le K, Fe, Al, Ca, Ti et Si. Les rapports élémentaires retenus pour cette étude sont le Ti/Al et Si/Al en tant que traceurs des apports de poussières éoliennes, ainsi que les rapports Fe/Ca et K/Ca en tant que traceurs des apports fluviaux. L'utilisation de ces méthodes a récemment augmenté en raison des progrès technologiques, notamment l'utilisation de scanners à fluorescence X (XRF).

I. Matériels et méthodes de travail :

Pour remonter dans le temps, nous nous sommes focalisés sur l'analyse des sédiments marins de la carotte GeoB8601-3 (30°50.90 N, 10°16.1 O), à 921m de profondeur d'eau, qui a été récupérée au Sud-Ouest du cap Ghir, près de l'embouchure d'un grand fleuve du Sud-Ouest du Maroc (Souss), lors de la croisière METEOR M 58/2 (Bleil et al, 2004).

Le modèle d'âge de la carotte GeoB8601-3 est basé sur trois dates AMS ¹⁴C mesurées sur des foraminifères planctoniques dans la carotte GeoB8601-3 à 20,5, 60,5 et 85,5 cm de

profondeur. Les enregistrements de susceptibilité magnétique ont été utilisés pour corrélérer la carotte GeoB8601-3 avec la proche carotte GeoB6007-2 bien datée (Kuhlmann et al, 2004b), ce qui a permis d'utiliser en plus, les cinq AMS ^{14}C de cette dernière carotte. Le modèle d'âge confirme la chronologie obtenue par AMS ^{14}C de la carotte GeoB8601-3, sauf pour un âge à 49,5 cm qui est légèrement plus âgé que celui à 60,5 cm. Le modèle d'âge final de la carotte GeoB8601-3 est donc basé sur sept dates AMS ^{14}C et une modélisation bayésienne utilisant le modèle « Bacon » (Blaauw et al, 2011). Pour plus d'informations sur la carotte GeoB8601-3 voir le détail au chapitre 2.



Carte 46 : Situation géographique de la carotte 8601-3 (l'étoile jaune)

II. Les éléments géochimiques, en tant qu'indicateurs « proxy » du changement paléoclimatique au Sud-Ouest du Maroc :

De manière générale, 24 éléments ont été analysés et nous retiendrons pour cette étude les mesures effectuées sur le Potassium(K), le Calcium(Ca), le Fer(Fe), l'Aluminium(Al), le Titane(Ti) et le silicium(Si).

La figure ci-dessous n°82, montre que les valeurs de concentration les plus élevées des éléments chimiques en fonction de la profondeur est celle de Si (144×10^3 - 170×10^3 mg/kg), suivi par le Ca (95×10^3 - 125×10^3 mg/kg), l'Al (50×10^3 - 67×10^3 mg/kg), puis le Fe (27×10^3 - 34×10^3 mg/kg) et le K (18×10^3 - 24×10^3 mg/kg) respectivement.

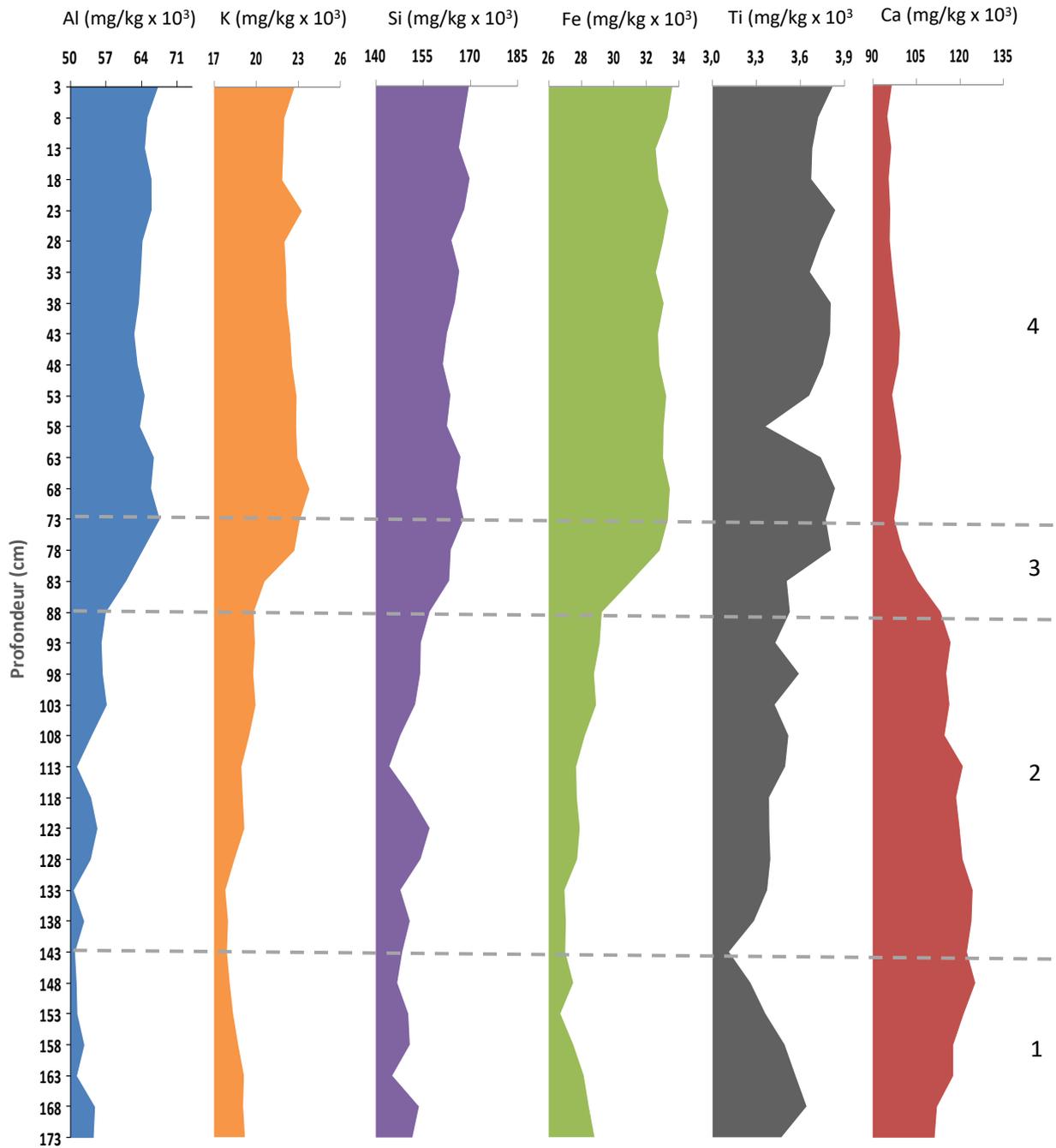


Figure 82 : Distribution des teneurs des éléments chimiques en fonction de la profondeur.

Globalement, les éléments de type terrigène tels que l'Al, K, Fe, Si et Ti provenant du continent et ont été transportés principalement, par les Oueds du Sud-Ouest du Maroc. En effet, ces éléments ayant des valeurs généralement faibles des teneurs entre ± 143 cm et la base de la carotte, en fonction de la profondeur, une baisse, suivie par une tendance légèrement croissante entre la profondeur ± 143 cm et 88cm, puis d'un pic d'augmentation de leur teneur entre 88cm et ± 73 cm de profondeur, enfin, d'une tendance vers l'augmentation, entre la profondeur ± 73 cm et le sommet de la carotte. Alors que, le calcium (Ca), montre une basse quantité, lorsque les éléments terrigènes augmentent abondamment. Or, la distribution du Ca en fonction de la profondeur, montre des valeurs fortes entre ± 143 cm et la base de la carotte, par rapport aux autres éléments, suivie d'une augmentation relativement constante de leur quantité entre ± 143 cm et 88cm de profondeur, ensuite, par une chute assez notable des teneurs de Ca entre 88cm et ± 73 cm, avec une autre observation intéressante qui est la diminution importante entre 73cm et le sommet de la carotte. Ceci peut être lié aux

carbonates, aux sulfates de calcium et aux phosphates de calcium. Nous pouvons considérer, qu'il reflète le taux de CaCO_3 (carbonates), correspondant à la fraction biogène du sédiment. Le fait que son taux semble baisser ou augmenter est dû à un effet de dilution. En effet, si les éléments terrigènes par exemple sont importants, sa quantité sera « masquée » par cette augmentation, sans pour autant qu'il subisse une diminution réelle.

En termes de résultats, la distribution des éléments chimiques livrés par les sédiments de la carotte GeoB8601-3, permettent de la subdiviser en quatre unités distinctes :

- **L'unité 1** : comprise entre $\pm 143\text{cm}$ et la base de la carotte : l'analyse des résultats permet de constater une tendance vers l'augmentation, pour tous les éléments à l'exception du Ca qui enregistre une diminution au niveau de cette profondeur.
- **L'unité 2** : comprise entre $\pm 143\text{cm}$ et 88cm , montre un décroissement assez notable des concentrations de K, Fe, Al, Ti et Si, avec une tendance vers l'augmentation pour le Ca.
- **L'unité 3** : comprise entre 88cm et $\pm 73\text{cm}$ est caractérisée par une augmentation remarquable au niveau de la distribution de K, Fe, Al, Ti et Si, par contre, on note une réduction notable pour le Ca.
- **L'unité 4** : comprise entre $\pm 73\text{cm}$ et le sommet de la carotte est caractérisée par un accroissement assez notable des concentrations, avec une tendance vers l'augmentation, par opposition au Ca qui a connu une diminution à ce niveau.

Par ailleurs, les distributions des rapports d'éléments Fe/Ca, K/Ca, K/Al, Ti/Al et Si/Al, en fonction de la profondeur sont illustrés par la figure n°83. La distribution du rapport Fe/Ca et K/Ca, montre des tendances similaires aux profils élémentaires, avec une tendance à l'augmentation. Il est important de distinguer, quatre types majeurs de comportements, le long du profil, (i) une tendance vers l'augmentation entre 73cm et le sommet de la carotte, (ii) ensuite une chute remarquable entre 73cm et 88cm de profondeur, (iii) une tendance à la baisse entre 88cm et $\pm 151\text{cm}$, (iiii) une ré-augmentation du rapport Fe/Ca et K/Ca entre la profondeur $\pm 151\text{cm}$ et la base de la carotte.

La distribution du rapport Ti/Al, en fonction de la profondeur montre une fluctuation remarquable, avec une tendance décroissante entre 73cm et le sommet de la carotte, puis une augmentation remarquable à partir la profondeur de 73cm jusqu'à 88cm . En bas du profil, on note une tendance vers l'augmentation, entre 88cm et 163cm , avec une chute entre la profondeur de 163cm et la base de la carotte. Aussi, la distribution du rapport Si/Al en fonction de la profondeur montre une tendance décroissante de 73cm et le sommet de la carotte, suivie d'un pic d'augmentation de sa quantité entre 73cm et 88cm de profondeur, avec une tendance vers l'augmentation poursuit jusqu'à $\pm 151\text{cm}$ de profondeur. On peut également noter, une nouvelle diminution à partir $\pm 151\text{cm}$ vers la base de la carotte.

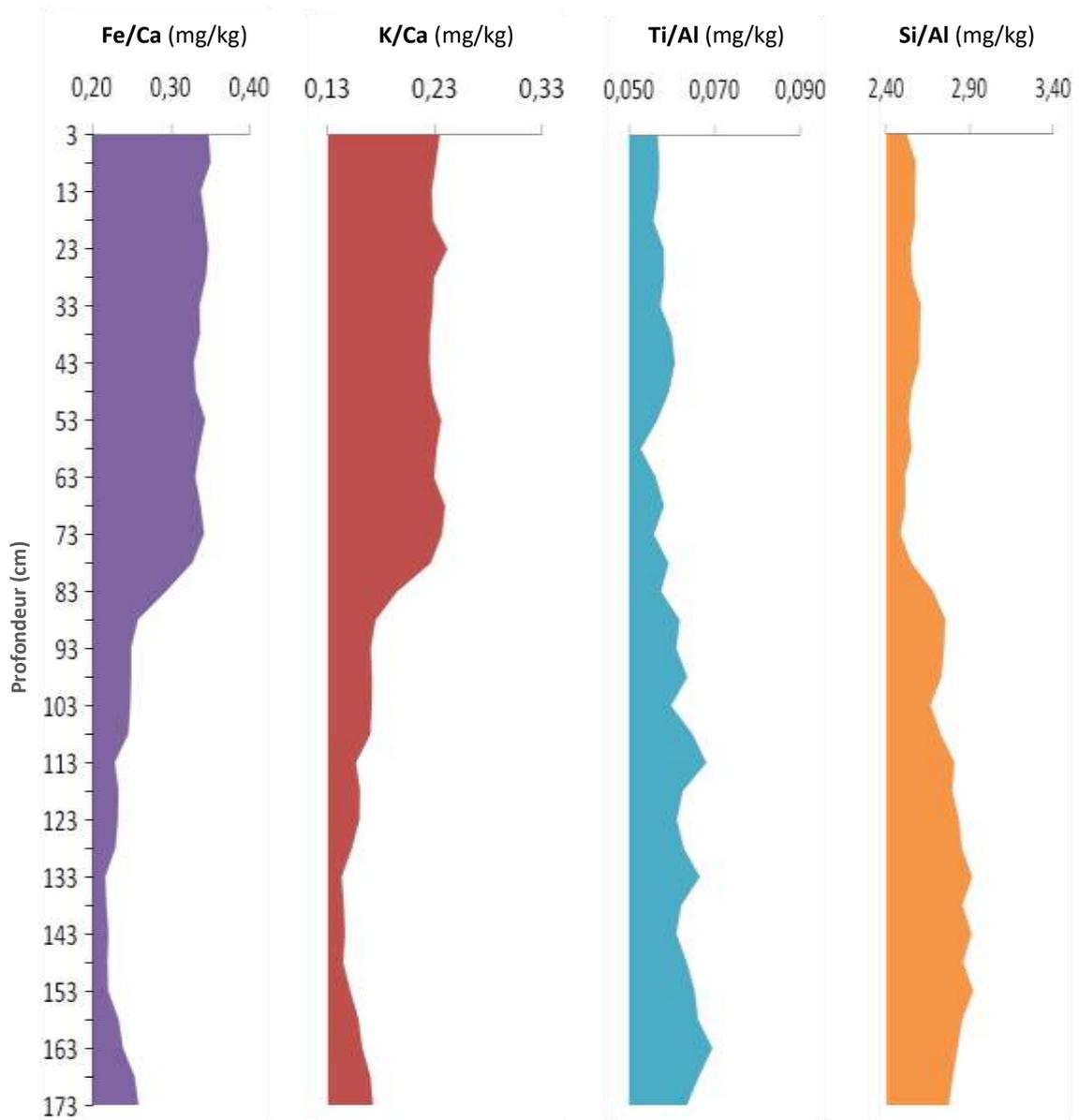


Figure 83 : Distribution des teneurs des rapports chimiques en fonction de la profondeur.

Les principaux résultats obtenus sont reportés sur les figures ci-dessus (82 et 83), et peuvent être maintenant discutés en fonction de l'âge. En effet, au cours des derniers 2000 ans, les données chimiques étudiées montrent, des variations importantes dans les compositions des sédiments conduits par les changements climatiques.

Les teneurs en Ca, bien que clairement les plus intenses dans la carotte GeoB8601-3, montrent une réduction de plus ou moins 20% entre les années 1191 et 1034 ans avant le présent (BP) et cette réduction s'est poursuivie jusqu'à présent. Dans le même temps, K, Fe et Al montrent une augmentation rapide, à un niveau toujours plus élevé. Ce décalage brusque est mis en évidence, par les rapports K/Ca et Fe/Ca, et généralement, par les caractéristiques vigoureuses des résultats de « XRF » de cette carotte. La variabilité des éléments K, Fe, Al et les rapports K/Ca et Fe/Ca au cours des années 1034 ans avant le présent (BP), montre une tendance vers l'augmentation. En effet, il s'agit très probablement, de l'augmentation de la résolution (vitesse de sédimentation plus élevée) des sédiments de la carotte GeoB8601-3, après les années 1034 ans avant le présent (BP).

Le Ca présente des valeurs faibles à partir des années 1191 ans BP, jusqu'au présent et des valeurs élevées, après les années 1034 ans BP. Néanmoins, les teneurs des autres éléments terrigènes sont plus élevées avant les années 1034 ans BP. Les teneurs de Ca sont interprétées,

comme représentant des composantes carbonatés déposées dans ce site, et étant donné que la carotte étudiée est située au centre de phénomène d'upwelling très productif proche de la région du Cap Ghir au Sud-Ouest du Maroc (McGregor et al, 2007), il représente probablement la productivité marine (Kuhlmann et al, 2004). Le K dans les carottes de sédiments marins est généralement associé aux siliciclastiques terrestres, tels que les argiles illites et le feldspath potassique (Yarincik et al, 2000). D'ailleurs, le Potassium est fréquemment utilisé, pour d'étudier les changements climatiques (arides/humides) dans une région source (Kuhlmann et al, 2004). Les teneurs de Fe représentent également l'apport terrestre, dans ce cas peut-être, sous forme d'oxyhydroxydes de fer. De nombreuses études ont lié Al dans les carottes de sédiments, à une altération chimique intense sur les terres produisant des argiles de kaolinite et de smectite (Zabel et al, 2001). Les teneurs de Ti sont beaucoup moins sensibles à la diagenèse que Fe, de sorte que la similitude entre les enregistrements de Fe et Ti suggère qu'il est improbable que l'enregistrement de Fe soit le résultat de la diagenèse. En effet, dans la plupart des sédiments marins, les fractions de sédiments grossiers sont enrichies en Ti (Schütz et al, 1982), qui sont liées à l'altération chimique intensive, dans des conditions humides (Bonatti et al, 1973). Enfin, le Si est présent dans les minéraux argileux détritiques, les Zéolithes et les Feldspaths (Windom, 1976). Le Si dans les sédiments marins est largement dérivé via des aluminosilicates et du quartz (Grousset et al, 1989). D'ailleurs, le rapport Si/Al indique la proportion relative de quartz dans les aluminosilicates, et il a été largement utilisé, dans les études paléo-enregistrements côtiers du Sud marocain (Sarnthein et al, 1982).

Généralement, le changement de concentration de Ca, Fe, K et Al entre les années 1191 et 1034 ans BP, représente très probablement une diminution relative de la productivité marine, ou/et une augmentation relative du matériel terrestre atteignant ce site. En fait, l'intervalle correspond également à des quantités moins importantes de calcium, au contraire, l'augmentation des apports terrigènes entre les années 1034 et 1191 ans BP pourraient avoir « masqué » les quantités de calcium observées à cette période.

Les enregistrements à haute résolution de la carotte GeoB8601-3, ont également indiqué une forte variabilité des apports chimiques, aux différentes échelles de temps étudiées.

1. La période entre les années 1191 et 2752 ans avant le présent (BP) :

Cette période fait apparaître, deux phases distinctes :

- ❖ Entre les années 1191 et 2381 ans BP : cette phase correspond à une longue période de faible teneur pour le K/Ca, Fe/Ca et de forte teneur pour le Si/Al et Ti/Al, cela explique que cette période probablement est caractérisée par une alimentation par voie atmosphérique notable des apports éoliens que fluviaux, suite à une forte action éolienne, c'est-à-dire la dominance du climat aride dans la région.
- ❖ Entre les années 2381 et 2752 ans BP : cette phase se caractérise par une ré-augmentation de la concentration des apports fluviaux (K/Ca, Fe/Ca), en contraste, une diminution des rapports Si/Al et Ti/Al (traceurs des apports éoliens), elle serait alors contrôlée, par d'alimentation fluviale et donc par le climat humide.

2. La période entre les années 1034 et 1191 ans avant le présent (BP) :

Les résultats montrent une rupture entre 1034 et 1191 ans BP, qui marque une modification des régimes climatiques. Cette rupture s'accompagne d'une diminution de tous les éléments chimiques à l'exception du calcium (Ca). L'augmentation des teneurs de Si/Al et Ti/Al serait liée probablement, à une alimentation par voie atmosphérique, suite à une forte action éolienne. Cet effet semble fortement influencé par les apports éoliens que fluviaux. En effet, les faibles teneurs de K/Ca, Fe/Ca de cette période, correspondrait probablement à la diminution des conditions climatiques dites humides (précipitation) dans la région, elle serait alors, contrôlée par la faible alimentation fluviale et engendrée par le climat aride.

3. Les derniers 1000 ans avant le présent (BP) :

Montre une forte valeur des teneurs du rapport K/Ca, Fe/Ca par rapport à Si/Al et Ti/Al, ceci témoigne d'une très forte alimentation fluviale (écoulement) qu'éolien. Cette unité peut être déposée, lors d'une période instable, marquée par l'installation d'un climat humide. L'abondance des éléments détritiques serait liée probablement à une alimentation fluviale qu'éolienne suite à une forte action de l'écoulement d'eau vers l'océan. Les faibles valeurs de Si/Al et Ti/Al de cette période, peuvent correspondre donc à l'absence d'action éolienne.

Au terme de ces résultats, on peut conclure que, le Sud-Ouest du Maroc a subi des changements climatiques, au cours de la période d'étude (derniers 2000 ans), le plus notable étant le changement rapide des années entre 1034 et 1191 ans BP. Nous avons basé principalement, sur les changements au niveau de la concentration d'éléments chimiques en fonction de la profondeur, en tant qu'indicateurs « proxy » de la variabilité paléoclimatique.

Tout d'abord, les rapports de Fe/Ca et K/Ca varient d'une valeur élevée à une valeur basse, avant les années 1034 ans BP, suivi d'une diminution brutale des valeurs entre les années 1034 et 1191 ans BP. Après les années 1351 ans BP, les rapports de Fe/Ca et K/Ca ont poursuivi la diminution, pour atteindre les valeurs les plus basses autour des années 2381 ans BP, suivie d'une faible ré-augmentation entre les années 2381 et 2752 ans BP. En revanche, les rapports de Si/Al et Ti/Al diminuent de valeurs relativement élevées à des valeurs plus faibles avant des années 1034 ans BP. Ensuite, ils augmentent rapidement entre les années 1034 et 1191 ans BP, puis une augmentation jusqu'à la fin du record, à l'exception de la période autour des années ± 2565 ans BP où les rapports Si/Al et Ti/Al, diminuent légèrement après les années ± 2565 ans BP.

La distribution du rapport K/Ca et Fe/Ca, en fonction de la profondeur, montre des valeurs très élevées entre les années 1034 et 32 ans BP et des valeurs faibles après les années 1034 ans BP. On suppose que l'augmentation des apports fluviaux de matières terrigènes, joue un rôle important dans cette période. Cette interprétation est basée sur des études montrant que, les sédiments sont déversés dans l'océan, via les dépôts fluviaux (Wynn et al, 2000). Plusieurs études ont montré que, les fractions à grains fins d'une source fluviale sont piégées à la zone située proche de la région de Cap Ghir, cela signifie que la teneur en Illite des sédiments marins, reflète avec une manière impressionnante, le pourcentage et la distribution des particules terrigènes transportées par le transport fluvial (Futterer, 2000). Généralement, les valeurs faibles de K/Ca et Fe/Ca, pourraient indiquer que le dépôt de matériels terrigènes est faible, c'est à dire des valeurs faibles des matières en suspension transportées par les Oueds du Sud-Ouest du Maroc (Tensift, Souss, Tamri, Tamghart, etc.). On suppose que, l'augmentation de K/Ca et Fe/Ca dans les sédiments marins indique des conditions

climatiques plus humides dans cette période. Ainsi, nous suggérons que les rapports Fe/Ca et K/Ca sont également, principalement contrôlés par les précipitations des montagnes de l'Atlas. En fait, les rapports Fe/Ca et K/Ca ont déjà été utilisés, pour les reconstructions paléoclimatiques, autour des marges continentales au Nord de l'Afrique (Revel et al, 2015).

D'abord, en termes des résultats de la carotte GeoB8601-3, obtenus par XRF, on peut détecter quelques changements du régime du climat au Sud-Ouest du Maroc, durant les derniers 2000 ans. En effet, on distingue généralement trois phases majeures au cours de la période étudiée : les années entre 2752 et 1191 ans BP : une période aride intense au Sud-Ouest du Maroc ; les années entre 1191 et 1034 ans BP (transition) : une période de transition progressive de l'état aride à l'état humide ; les années de 1034 ans BP jusqu'au présent : une période humide peut être intense au Sud-Ouest du Maroc jusqu'à 32 ans BP.

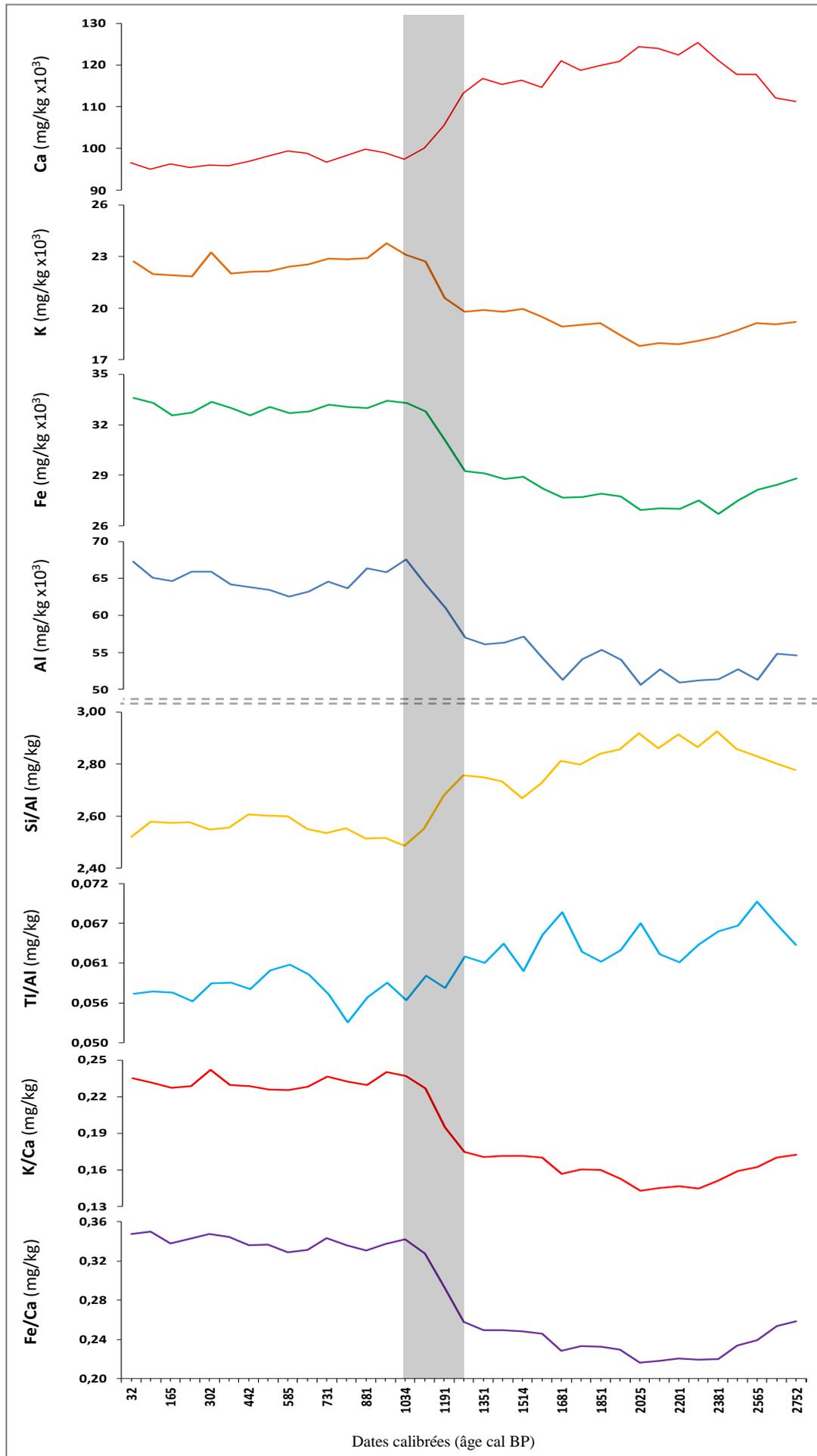


Figure 84 : Distribution des teneurs d'élément du K, Fe, Al, Ca et des rapports du Fe/Ca, K/Ca, Si/Al et Ti/Al de la carotte Geob8601-3 en fonction de l'âge (BP).

La composition des sédiments marins transportés par les Oueds de l'Atlas, vers la façade atlantique marocaine est très variable. Actuellement, la principale source d'alimentation provient des Oueds de Tensift et de Souss-Massa. Les argiles détritiques représentent principalement, la contribution des apports fluviaux aux eaux marines, même si d'autres minéraux sont également abondants, en particulier, dans les fractions grossières (Roumzeilles et al, 2007).

Au fil du temps, les changements dans les assemblages de minéraux argileux reflètent les fluctuations des endroits, d'où viennent les matériaux terrigènes et les modes de distribution/transport, qui sont influencés par les conditions climatiques dominantes (Fagel, 2007). En fait, les périodes humides, peuvent être indiquées par des précipitations plus importantes et de ruissellement d'eau douce. Cela signifie l'abondance des matériaux fluviaux riches en argile qui peut donc influencer la composition en éléments majeurs et traces des sédiments marins. En outre, le Sud-Ouest du Maroc dans la période entre les années 1034 et 32 ans BP a connu des valeurs élevées des apports fluviaux plutôt l'augmentation des teneurs de K/Ca et Fe/Ca. Par conséquent, les concentrations de certains d'éléments terrigènes (p.ex. K, Fe) ont servi généralement, à caractériser les fluctuations climatiques et le dépôt de matériaux causés par les courants d'eau (les Oueds) (Blanchet et al, 2013). Ainsi, l'apport de ces éléments reflète principalement, l'intensité des précipitations et des processus d'érosion liés aux conditions climatiques. Étant donné que les régions du Sud-Ouest du Maroc sont une source majeure d'Illite, à cause de l'augmentation des apports des Oueds (p.ex. Tensift et Souss), c'est ce qui explique l'augmentation des rapports K/Ca et Fe/Ca dans les sédiments marins, en particulier, les zones proches de leurs embouchures. D'ailleurs, les phases qui se caractérisent par des teneurs très élevées des rapports K/Ca et Fe/Ca largement dérivées de l'augmentation des teneurs en Illite (Wehausen et al, 2000). De plus, ces rapports ont également été utilisés dans les études des paléo-enregistrements du Nord Atlantique, pour identifier les périodes humides (Rodrigo et al, 2011). Cependant, il est important de noter qu'en plus de l'illite, le rapport K/Ca est également influencé par la contribution du K-feldspath détritique qui peut être importante, en particulier, dans les fractions grossières (Dypvik et al, 2001).

La poussière saharienne a été étudiée de manière approfondie, en particulier, les émissions actuelles, en raison de son impact sur le système climatique global (GIEC, 2007, 2013). Elle est principalement composée de Silicates (Argiles, Feldspaths et Quartz) avec des quantités moindres de Carbonates, Sulfates, Oxydes et Hydroxydes (Caquineau et al, 1998). Les zones sources d'émissions de poussières en Afrique du Nord, sont substantiellement variables, elles sont hétérogènes en termes de composition à l'échelle régionale et cette hétérogénéité a été utilisée, pour distinguer les zones sources (Scheuvsens et al, 2013). L'apport de poussière représente, une contribution importante aux sédiments marins. La quantité fournie et sa minéralogie se reflètent, au niveau de la composition des sédiments. En fait, les fractions de sédiments éoliens ont été généralement reconnues dans les sédiments d'eau profonde, par leur granulométrie plus grossière que celle des argiles, qui est l'un des paramètres utilisés pour identifier les apports éoliens. Les fractions éoliennes ont permis de reconstituer les changements paléoclimatiques, en particulier, les fluctuations des phases arides et humides, qui se reflètent par l'augmentation ou la diminution correspondantes de la concentration des éléments dérivés de la poussière (Cole et al, 2009).

En ce qui concerne les reconstitutions paléoclimatiques, les indicateurs géochimiques « proxys », tels que les rapports Si/Al et Ti/Al ont été largement utilisés, pour reconstruire les

variations des apports éoliens dans la zone d'étude au fil du temps (Calvert et al, 2007). En effet, les rapports de Si/Al et Ti/Al diminuent de valeurs relativement élevées, à des valeurs plus faibles avant les années 1034 ans BP. Ensuite, ils augmentent rapidement entre les années 1034 et 1191 ans BP, puis une augmentation jusqu'à la fin des enregistrements, à l'exception de la période autour des années ± 2565 ans BP, où les rapports Si/Al et Ti/Al diminuent légèrement après les années ± 2565 ans BP. En effet, les valeurs des rapports Ti/Al et Si/Al sont assez relativement élevées entre les années 2752 et 1191 ans BP. On pense que l'augmentation de Si/Al et de Ti/Al, reflètent l'importance des apports éoliens transportés par la voie atmosphérique vers les eaux marines (Yarincik et al, 2000). Cette augmentation peut aussi, conduire à la prédominance de la poussière saharienne, pendant cette période, ainsi qu'il est possible que, les courants de fond entraînent un transport des grains les plus lourds vers les océans plus profonds (Plewa et al, 2012). Alors que, les rapports de Ti/Al et Si/Al montrent une diminution rapide entre les années 1191 et 1034 ans BP, il est important de noter que, la distribution du rapport Ti/Al et Si/Al peut révéler les différentes régions sources. De plus, le schéma de distribution de ces rapports représente les différents mécanismes de transport, les types du climat dominant, la géologie et les compositions du sol (Plewa et al, 2012). Ainsi, on pense que le Si dans les sédiments marins, est principalement dérivé des aluminosilicates et du quartz. Étant donné que la contribution de Si biogénique est en général très faible (Masque et al, 2002), le rapport Si/Al est indiqué par la proportion relative de quartz par rapport aux aluminosilicates et a été largement utilisé dans l'étude des paléo-enregistrements, car les phases arides se caractérisent par une augmentation de l'apport de quartz éolien, ce rapport a été utilisé pour identifier l'apport éolien pendant des intervalles donnés (p.exe. Wehausen et al, 2000 ; Calvert et al, 2001), et pour reconstruire les fluctuations de l'aridité (p.exe. Jimenez et al, 2008 ; Rodrigo et al, 2011). Dans notre cas, les résultats obtenus montrent une augmentation rapide du rapport Si/Al entre les années 2752 et 1191 ans BP, en accord avec d'autres indicateurs paléoclimatiques, indiquant l'aridité à ce moment-là. La figure ci-dessus (n°84), a également montré une diminution du rapport Si/Al à partir des années 1034 ans BP jusqu'au présent. L'augmentation des flux de poussière dans la région d'Afrique du Nord, particulièrement au Sud-Ouest du Maroc pendant cette période est bien documentée dans les enregistrements de la marge Nord-Ouest Africaine (McGee et al, 2013).

De ce fait, le Ti réside dans les deux aluminosilicates, se substituant à certains éléments majeurs, est sous forme d'oxyde de Ti et de phases minérales de Silicate, principalement du Sphène et de l'Ilménite. D'ailleurs, du fait de leur densité plus élevée, ils sont également transportés avec les grains de quartz éolien légèrement plus grossiers. Cela signifie que les rapports Ti/Al et Si/Al ont été utilisés, pour identifier les changements dans l'apport de poussières soufflées par le vent, car la concentration accrue des particules éoliennes dans les sédiments marins conduit à des teneurs élevées de ces éléments, par rapport aux sédiments hémipélagiques (Harrison et al, 2001). En général, la diminution significative des apports éoliens et l'augmentation simultanée des apports fluviaux au Sud-Ouest du Maroc pendant la période entre les années 1191 et 1034 ans BP est largement reconnue par des valeurs faibles de Ti/Al et Si/Al, par opposition aux valeurs plus élevées de Fe/Ca et K/Ca. Nous suggérons que cette période est influencée, en particulier, par une augmentation substantielle des teneurs des apports fluviaux, confirmés par l'augmentation rapide des rapports K/Ca et Fe/Ca, Cela signifie que l'apport fluvial, aurait principalement contribué aux argiles des régions riches en Illite et en Chlorite, conduisant à ces teneurs élevées. D'ailleurs, au cours de la période entre 1034 et 32 ans BP, les teneurs de K/Ca, Fe/Ca ont également augmenté, d'une manière assez

stable, ce qui suggère que l'apport fluvial et/ou les variations de l'intensité de la circulation, peuvent avoir conduit à une plus grande teneur en K et Fe, au cours de cette période. En revanche, avec une diminution assez notable du rapport Si/Al et Ti/Al jusqu'à nos jours.

Pour conclure, on note ici que, la base de données fournie par l'utilisation des éléments chimiques (Fe, K, AL, Ca) est très utile, pour l'analyse paléoclimatique. D'autre part, comme discuté ci-dessus, les rapports, tels que Fe/Ca, K/Ca, Ti/Al et Si/Al ont également fourni des informations utiles, pour reconstruire la variabilité paléoclimatique au Sud-Ouest du Maroc particulièrement les derniers 2000 ans. Cependant, on note aussi, qu'il est important d'abord de souligner que la distinction entre les apports fluviaux et éoliens, basée uniquement sur des éléments chimiques concentrés dans les sédiments marins, peut être difficile, car parfois les mêmes minéraux terrigènes, peuvent également être fournis par les rivières ou par voie atmosphérique (la poussière). Ce qui suggère que, l'apport éolien dans une région dépend également de la direction du vent, les caractéristiques atmosphériques et de l'agent de transport, par conséquent, ces facteurs doivent être pris en compte, pour les reconstitutions paléo-climatiques (Bout et al, 2007). De plus, l'interprétation des résultats obtenus au sein de cette étude, peuvent également, être affectés par plusieurs facteurs et cela pourrait parfois compliquer l'interprétation de la source de ces matériaux. Pour cela, il est également nécessaire de s'appuyer sur d'autres indicateurs, pour valider et confirmer les résultats obtenus, tels que la taille des grains, les isotopes radiogéniques, la palynologie, etc.

Axe 2 : Contribution à la détermination des paléo-températures de l'océan au Sud-Ouest du Maroc, à partir du rapport Mg/Ca des foraminifères

La recherche en paléo-océanographie vise principalement à quantifier la variabilité climatique et chimique de l'océan à différentes échelles de temps, à évaluer sa sensibilité aux forçages internes et externes, ainsi qu'à comprendre son rôle dans la régulation de la concentration atmosphérique de CO₂. L'océan joue en effet un rôle essentiel dans les échanges de chaleur avec l'atmosphère, dans le transport de gaz tels que le CO₂, et il est donc nécessaire de mieux comprendre ses propriétés physiques, tant en surface qu'en profondeur, ainsi que son influence sur les écosystèmes marins pour appréhender sa contribution à la variabilité climatique. Les interactions entre le cycle du carbone et le climat demeurent encore incomprises (Lea, 2004).

L'un des défis majeurs de la paléo-océanographie est de développer des outils permettant de déterminer la température passée des eaux océaniques de surface et de profondeur, afin de mieux comprendre les changements climatiques. Récemment, l'analyse du rapport Mg/Ca dans les tests de foraminifères s'est révélée prometteuse à cet égard.

L'utilisation du rapport Mg/Ca dans les tests de foraminifères marins en tant que proxy de la température a connu des avancées significatives au cours des dernières années. La relation entre le rapport Mg/Ca des tests de foraminifères et la température de l'eau de mer a conduit à son utilisation comme indicateur de la température, tant en surface qu'en profondeur.

Les foraminifères sont couramment utilisés dans les reconstructions paléoclimatiques en raison de leur ubiquité dans les océans du monde et de leur préservation dans les sédiments. Traditionnellement, les proxies, tels que les isotopes stables de l'oxygène et le rapport Mg/Ca, sont analysés sur des échantillons regroupant de nombreux spécimens d'une même espèce. Étant donné que chaque spécimen n'a vécu que quelques semaines, alors qu'un échantillon de

sédiments typique peut couvrir des milliers d'années, il est nécessaire d'analyser un grand nombre (10 à 100) de spécimens pour obtenir un signal représentatif du paramètre climatique à reconstruire (Rosenthal et al., 2000 ; Katz et al., 2010).

Récemment, la thermométrie basée sur le rapport Mg/Ca des foraminifères a été largement appliquée à des questions paléocéanographiques concernant la variabilité de la température à travers le temps (par exemple Mashiotta et al., 1999 ; Elderfield et Ganssen, 2000 ; Rosenthal et al., 2003). Cette méthode est relativement récente parmi les proxies utilisés pour reconstruire les températures océaniques passées. Le Mg²⁺ peut se substituer au Ca lors de la formation de carbonate de calcium, et cette substitution est influencée par la température de l'eau de mer. Ainsi, les rapports Mg/Ca des foraminifères augmentent avec l'augmentation de la température. Cette sensibilité à la température du rapport Mg/Ca des foraminifères a été rapportée pour la première fois par Chave (1954) et Blackmon et Todd (1959).

Le rapport Mg/Ca des tests de foraminifères est devenu un indicateur de choix pour la reconstruction des températures océaniques de surface (SST). Plusieurs études ont démontré que la teneur en Mg des coquilles de foraminifères est positivement corrélée à la température de l'eau de mer pendant leur calcification (Elderfield et Ganssen, 2000 ; Dekens et al., 2008). Cette méthode offre l'avantage de pouvoir reconstruire les températures à différentes profondeurs en fonction des espèces de foraminifères utilisées. De plus, les analyses du rapport Mg/Ca sont relativement simples grâce aux techniques modernes d'analyse élémentaire, ce qui permet d'obtenir des enregistrements à haute résolution en peu de temps.

En résumé, la thermométrie basée sur le rapport Mg/Ca des foraminifères est un outil essentiel pour la reconstruction des températures océaniques passées, tant en surface qu'en profondeur. Cette méthode offre des avantages significatifs par rapport à d'autres indicateurs de température, en particulier en ce qui concerne la possibilité de reconstruire les températures à différentes profondeurs de la colonne d'eau. Elle repose sur des avancées techniques telles que la spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES) pour analyser les tests de foraminifères à une résolution spatiale élevée (Kasemann et al., 2009).

Dans cette section, nous allons d'abord présenter les nouvelles données concernant le rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques, en particulier de l'espèce *Globigerina bulloides*, qui ont été obtenues à partir d'un échantillon de sédiment prélevé à différentes profondeurs allant de 0 à 173 cm dans l'océan Atlantique au Sud-Ouest du Maroc. Ces données seront utilisées pour établir une calibration précise des rapports Mg/Ca en fonction de la température.

Ensuite, nous vous présenterons les résultats de l'application directe de ces calibrations aux données provenant de la carotte 8601-3, qui a été prélevée près de l'embouchure d'un des grands fleuves du Sud-Ouest du Maroc, le Souss. Cette carotte sédimentaire est un enregistrement stratigraphique qui permet de remonter dans le temps sur une période de 2000 ans environ. Grâce à ces calibrations, nous serons en mesure de reconstituer les températures océaniques passées à différentes profondeurs au cours de cette période.

L'objectif principal de cette analyse est de mieux comprendre la variabilité des températures océaniques passées dans la région au Sud-Ouest du Maroc au cours des derniers 2000 ans, ce qui contribuera à une meilleure compréhension des changements climatiques dans cette région critique.

I. Généralités sur l'eau de l'océan dans la côte Atlantique au Sud-Ouest du Maroc :

En basant sur les données de l'Atlas Mondial de l'Océan (National Oceanographic Data Center, Washington DC), les températures océaniques de surface (SST), dans la zone d'étude varient de 17 °C à 19 °C en Hiver et de 20 °C à 23 °C en Été, avec des températures les plus basses autour du cap Ghir et des températures les plus élevées à la partie océanique Sud-Ouest du Maroc. La salinité de la surface de la mer (SSS) est comprise entre 36,25 et 36,78 (p.s.u). Un gradient E-W est clairement reconnaissable, c'est-à-dire, que près de la côte entre les caps Ghir et Yubi, la salinité est la plus faible et près de l'extrême ouest des îles Canaries, la salinité est la plus élevée. Le gradient se développe, en raison de la remontée d'eau centrale, relativement fraîche près de la côte, suivie d'une évaporation, et par conséquent, d'une augmentation de la salinité, lorsque les eaux sont transportées vers « offshore » (Hagen et al, 1996). La salinité est plus visible en saison estivale et dans les eaux de surface, qu'en hiver et à 75 m de profondeur.

La distribution des nutriments, expliquée par les concentrations de Phosphate et de Nitrate, change avec l'augmentation de la profondeur de l'eau. À la surface de la mer, la concentration en Nitrates autour du cap Ghir est relativement élevée, diminuant vers le sud, et montrant des valeurs plus faibles au cap Yubi. À une profondeur de 75 m, la distribution du Nitrate présente un gradient inverse, avec une concentration plus faible au cap Ghir et des valeurs croissantes vers le Sud-Ouest et au cap Yubi. De plus, les concentrations de Nitrate à 100 m de profondeur sont encore élevées au cap Yubi, mais ont également augmentés entre les deux caps. En revanche, la concentration de Phosphate à la surface de la mer est faible en dehors des caps et augmente entre eux et vers le large (Schütz et al, 1981 ; Sarnthein et al, 1982). La concentration de Phosphate à 75 m de profondeur est très similaire, mais, avec des valeurs légèrement faibles au cap Ghir. À 100 m de profondeur, les valeurs augmentent au cap Ghir et à l'ouest de Tenerife et diminuent entre les deux caps. Les sédiments terrigènes sont transportés dans les zones océaniques étudiées soit par les apports éoliens, soit par les apports fluviaux. Actuellement, les arrivées fluviales vers l'océan Atlantique-Nord se produisent principalement dans la zone Nord, en dehors du cap Ghir, en particulier, par l'Oued Sous. Alors qu'au Sud de 29 °N, les conditions arides prévalent sur le continent et la poussière éolienne provenant de la région saharienne (Swap et al, 1996 ; Holz et al, 2004 ; Kuhlmann et al, 2004).

Le système de courants des Canaries contient des filaments et des tourbillons, qui se forment en raison de la nature sinueuse du courant des Canaries. Ils transportent de l'eau fraîche, remontée jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres vers le large (Van Camp et al, 1991 ; Johnson et al, 2000). La plupart des filaments se développent près des caps de la côte africaine, par exemple, le filament d'upwelling quasi permanent en dehors du cap Ghir (Hagen et al, 1996). Les concentrations élevées de chlorophylle-a indiquant une productivité élevée, sont observées notamment, dans les filaments, ainsi que dans la zone d'upwelling côtière (Van Camp et al, 1991 ; Davenport et al, 1999). La principale source d'eau remontée (provenant des profondeurs comprises entre 100 et 300 m) est l'Eau Centrale de l'Atlantique Nord (NACW) (Mittelstaedt, 1983) qui est relativement fraîche (environ 7 °C à 14 °C) et ses salinités varient entre 34,9 et 35,9 (p.s.u) (Poole et al, 1999). Ainsi, le courant sous-marin vers le Nord a été signalé, le long du talus africain entre 20 °N et 34 °N (Barton, 1998 et Johnson et al, 2000), atteint moins de 100 km de large et à une extension verticale de plusieurs centaines de mètres (Barton, 1998), en dehors des côtes marocaines, il s'écoule à des profondeurs d'environ 1000

m (Mittelstaedt, 1989).

La zone d'étude est donc caractérisée, par la présence de l'eau d'upwelling riche en éléments nutritifs (Mittelstaedt, 1991). Les zones des remontées d'eau sont généralement limitées aux eaux du plateau et de la pente supérieure, dans une bande étroite de 20 à 30 km (Mittelstaedt, 1991). Ainsi, la production primaire est élevée sur le plateau et diminue vers les eaux océaniques. L'intensité du courant des Canaries, ainsi que la force et la durée de l'upwelling, dépendent des variations saisonnières de l'intensité et de la position des alizés du Nord-Est, qui sont couplés au déplacement méridien de la haute des Açores. Les zones au large du cap Ghir (~ 31 °N) et du cap Yubi (~ 27 °N) connaissent de fortes remontées d'eau en Été et en Automne et des remontées d'eau moins intenses en Hiver et au Printemps (Mittelstaedt, 1991 ; Nykjær et al, 1994). Entre les deux caps, l'upwelling est moins prononcé, car les vents sont dirigés principalement vers la côte (Hernández et al, 1997).

II. Rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques, comme indicateur «proxy» des paléo- températures de l'océan au Sud-Ouest du Maroc :

L'utilisation du rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques est maintenant couramment employée pour déterminer les changements de température de l'eau de mer/océan (Lea et al, 1999 ; Elderfield et Ganssen, 2000 ; Anand et al, 2003). Ainsi, depuis la dernière décennie plusieurs études ont aussi suggérées que cette méthode devrait pouvoir être utilisée pour reconstituer cette fois la température des eaux profondes (Elderfield et al, 2006 ; Marchitto et al, 2006). Cependant, les variations de température estimées de l'eau de profondeur entre la dernière période glaciaire et l'Holocène (période actuelle), sont faibles et proches des incertitudes de mesures comparées aux variations observées pour les températures de surface. L'amélioration des limites de détection et de la précision instrumentale des analyses Mg/Ca ainsi que la publication de nouvelles calibrations du rapport Mg/Ca d'espèces planctonique en fonction de la température des eaux profondes contraintes pourraient néanmoins permettre de mieux appréhender leur reconstruction.

Plusieurs indicateurs mis au point, pour reconstruire les températures passées de l'eau de la surface (SST), et le Mg/Ca mesuré sur les foraminifères planctoniques a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années (Elderfield et al, 1999 ; Ganssen, 2000 ; Barker et al, 2005). L'avantage de cette méthode est que, le même porte-biotique peut être utilisé à la fois pour les analyses isotopiques du Mg/Ca et de l'oxygène, ce qui permet d'estimer l'eau de mer, un indicateur indirect (proxy) de la salinité. Néanmoins, des études récentes ont mis en évidence plusieurs biais potentiels, qui peuvent affecter l'intégration de Mg dans les tests foraminifères ou sa conservation au cours de la diagenèse. En ce qui concerne l'intégration de Mg dans la calcite foraminifère, des travaux antérieurs ont porté sur les effets potentiels de la concentration en ions carbonate de l'eau de mer (Barker et al, 2002) et de la salinité (Lea et al, 1999 ; Mathien et al, 2009 ; Kisakurek et al, 2008). Le rapport Mg/Ca peut également être modifié dans les sédiments de surface, soit par la dissolution partielle de composants de coquille riches en Mg, dans des eaux sous-saturées par rapport à la calcite (Brown et al, 1996 ; Regenberg et al, 2009), ou par la prolifération de calcite secondaire riche en Mg probablement formée près de l'interface sédiment-eau de mer, en particulier, dans les zones où les eaux interstitielles sont sursaturées par rapport au CaCO₃ (Boussetta et al, 2011).

Le développement des méthodes d'analyses fiables est donc nécessaire, à l'interprétation du rapport Mg/Ca des carbonates biogéniques marins. En fait, la mesure du rapport Mg/Ca dans les coquilles marines est un moyen de connaître, les températures océaniques passées. En

outre, plusieurs études antérieures indiquent que cette méthode est principalement utilisée, pour les reconstructions du Quaternaire et du Pliocène, bien qu'elle puisse être utilisée, la plupart du temps à travers l'Éocène.

Dans l'atlantique Nord, le foraminifère planctonique de type *Globigerina bulloides* est abondant. Ainsi, la géochimie de son test pourrait être utilisée, pour reconstruire les changements passés des conditions des eaux de surface et de profondeur. Les variations morphologiques des Foraminifères planctoniques ont été largement utilisées, pour déchiffrer les reconstructions paléoclimatiques, paléoenvironnementales et paléoécologiques (Elderfield et al, 2006). *Globigerina bulloides* est un foraminifère planctonique, essentiellement présent dans les masses d'eau tempérées à subpolaires. Dans les régions d'upwelling, *G.bulloides* contribue au flux foraminifère maximal à la profondeur de l'océan et fournit donc, des informations géochimiques importantes, pour les études paléocéanographiques. Bien que des chercheurs antérieurs aient discuté de la répartition générale de *G.bulloides* dans les eaux de surface et les sédiments de l'océan Atlantique, ainsi que de sa relation avec le changement des paramètres écologiques.

Nombreux travaux antérieurs ont étudié les sédiments d'eau profonde, au large de l'Afrique du Nord-Ouest, afin d'obtenir des informations concernant la paléocéanographie de l'Atlantique Nord-Est et l'évolution climatique du continent africain (Moreno et al, 2002). La distribution de la température de l'eau de surface et de profondeur est peut-être la meilleure représentation de l'état du système climatique, parce que l'océan joue un rôle fondamental dans l'évolution du climat terrestre. Par conséquent, déterminer l'évolution de la température passée de l'océan est essentiel, pour comprendre l'histoire de la Terre.

L'objectif principal de cette étude est de reconstituer la variabilité temporelle des eaux de la mer à haute résolution au cours des derniers 2000 ans dans la façade atlantique au Sud-Ouest du Maroc, en se basant sur deux carottes « GeoB8601-3 ». La variabilité temporelle est discutée, pour les changements paléoclimatiques affectant les caractéristiques de la colonne d'eau (températures de la surface de la mer) et la productivité de la surface, en réponse à divers facteurs de forçage.

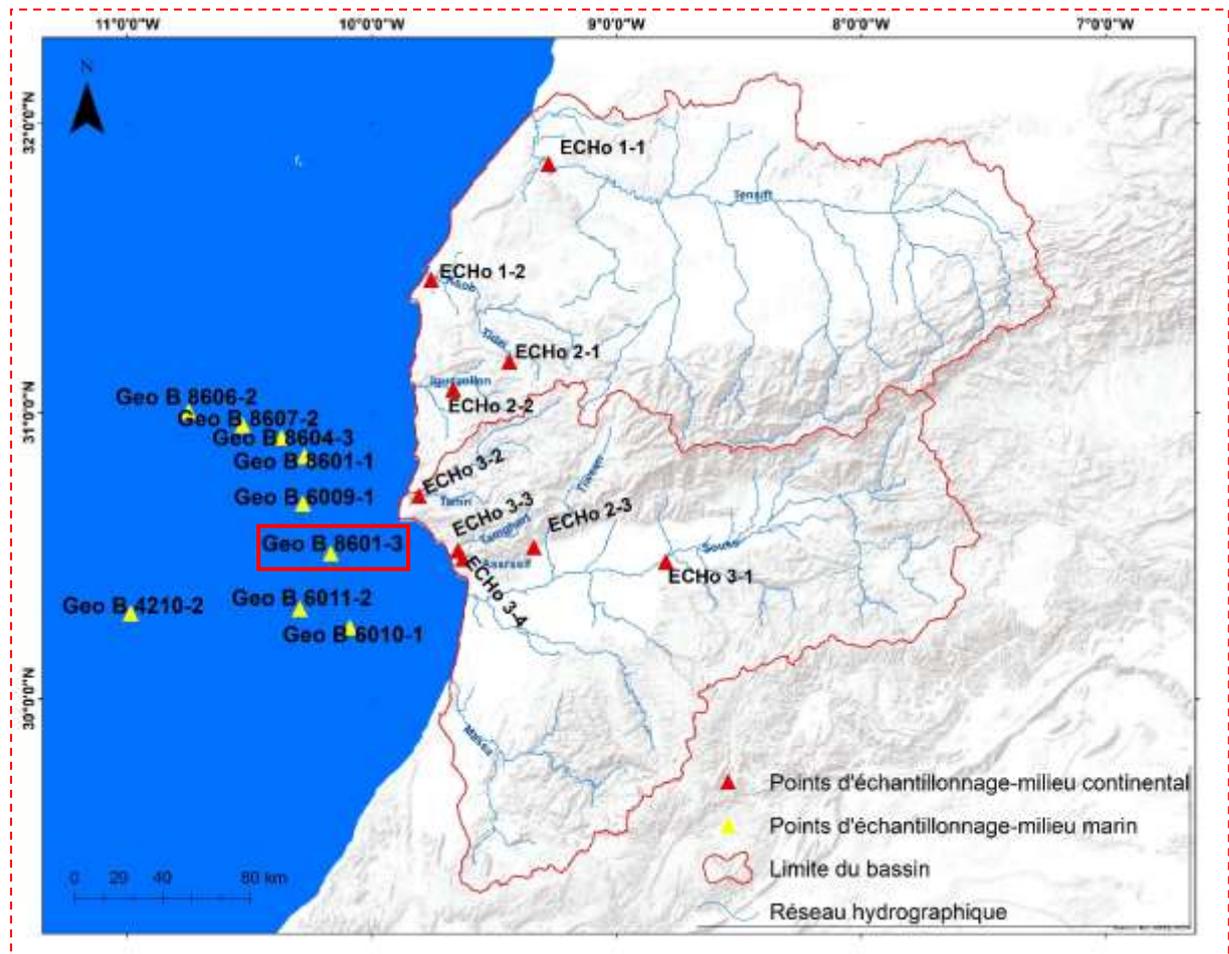
La détermination de la température de l'océan de surface dans le passé, s'appuie principalement, sur des méthodes micropaléontologiques (fonctions de transfert) et isotopiques (équation des paléotempératures). Depuis une quinzaine d'années, l'analyse des alcénones s'est ajoutée à ces méthodes de reconstruction essentielles aux paléocéanographes, pour quantifier les changements climatiques. Dans ce qui suit, nous présenterons un résumé des travaux qui ont abouti à la mise au point de cette approche.

1. Matériels et méthodes de travail :

Les analyses de Mg/Ca ont été effectuées sur les foraminifères planctoniques de type *Globigerina bulloides*, récupérée à partir des prélèvements de la surface marine, couvrant la façade atlantique au Sud-Ouest du Maroc. Ainsi, nous avons reconstitué dans cette étude, l'évolution des températures de la surface océanique se basant sur la carotte « GeoB8601-3 » prélevée au Sud-Ouest du Maroc, à partir de la mesure du rapport Mg/Ca des tests de foraminifères.

Chaque échantillon choisi dans ce travail contient entre, 16 et 30 foraminifères planctoniques (*G.bulloides*). La plupart des méthodes de préparation des échantillons utilisés pour la mesure du Mg/Ca de foraminifères, suivent les procédures développées par Lea et Boyle (1991). Pour nous, les échantillons ont été nettoyés selon la procédure de nettoyage de

Barker et al, (2003), modifiée par le professeur à l'Université de Brême Mr. Groeneveld.J, et qui comprend plusieurs traitements. Ils ont été mesurés, à l'aide de la méthode spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES), Cette technique fournit des mesures de haute précision des rapports Mg/Ca de l'ordre de 70,5% (Rosenthal et al, 2004). Toutes les procédures de nettoyages et de mesures ont été effectuées au centre MARUM, à l'Université de Brême, Allemagne, suivant une méthode précise.



Carte 47 : Situation géographique de la carotte Geo8601-3.

En ce qui concerne la calibration utilisée dans cette étude, on indique que les calibrations sont disponibles pour un nombre limité d'espèces, dont *G. sacculifer* (Nürnberg et al, 1996), *O. universa* (Lea et al, 1999 ; Russell et al, 2004), *G. bulloides* (Mashiotta et al, 1999 ; Lea et al, 1999 ; Elderfield et Ganssen, 2000), et *N. pachyderma* (Langen et al, 2005). Les expériences disponibles suggèrent une sensibilité à la température de $9,7 \pm 0,9\%$ de variation de Mg/Ca par °C, fournissant ainsi, les preuves directes les plus solides, pour le contrôle de la température sur le Mg/Ca foraminifère planctonique, de la même manière que les expériences inorganiques ont soutenu les attentes thermodynamiques. Anand et al, (2003) ont calculé les températures de calcification des différentes espèces planctoniques, à partir de mesures appariées du $d^{18}O$, plutôt que d'utiliser des estimations de l'hydrographie locale. Ce dernier pourrait être associé à des erreurs importantes, en raison de l'incertitude sur la profondeur de calcification exacte. La calibration de plusieurs espèces suggère une sensibilité à la température de $9,5 \pm 0,5\%$ par °C, de sorte que la calibrations multi-espèces fournit des preuves solides, parce que le signal de température pendant la formation du test est transféré de manière fiable dans les sédiments (Elderfield et al, 2000 ; Rosenthal et al, 2002).

Plusieurs approches ont été faites, pour calibrer le Mg/Ca en fonction de la température de plusieurs espèces de foraminifères planctoniques. Celles-ci comprennent des études sur les

carottes, dont chacune peut avoir des avantages et des inconvénients. Pour ce titre, nous avons utilisé dans cette étude, la calibration de Mashiotta et al, 1999 ; Elderfield et al, 2002, pour calibrer le Mg/Ca en fonction de la température, afin d'identifier les changements de la température d'eau de surface et de profondeur au Sud-Ouest du Maroc, durant les derniers 2000 ans.

Nous présentons dans un premier temps, les nouvelles données Mg/Ca de foraminifères planctoniques (*G.Bulloides*), issus des sédiments de surface (dépôt le plus actuel), sur la gamme de profondeurs 173cm de l'océan atlantique au Sud-Ouest du Maroc. Ces données sont utilisées, pour établir une calibration des rapports Mg/Ca, en fonction de la température. Dans un deuxième temps, nous présentons les résultats de l'application directe de ces calibrations à une série de la carotte GeoB8601-3 prélevée dans le même secteur géographique de l'étude. Les résultats des données des sédiments de surface et la reconstitution des paléotempératures à différentes profondeurs au cours des derniers 2000, font l'objet de la discussion suivante.

2. Caractérisation des températures de surface marine au Sud-Ouest du Maroc :

Les valeurs de $d^{18}O$ mesurées sur *G. bulloides* des sédiments de surface et leurs températures de calcification correspondantes, à l'aide de la méthode spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES), sont résumées dans le tableau ci-dessous. Les résultats pour le Mg/Ca mesurés sur *G.bulloides*, sont également présentés dans le tableau n°23. Les valeurs Mg/Ca de *G.bulloides* obtenues ont été converties en températures ($SST_{Mg/Ca}$), en utilisant l'équation de Mashiotta et al, 1999 et l'équation d'Elderfield et Ganssen, (2000), pour les foraminifères planctoniques de type *G. bulloides*.

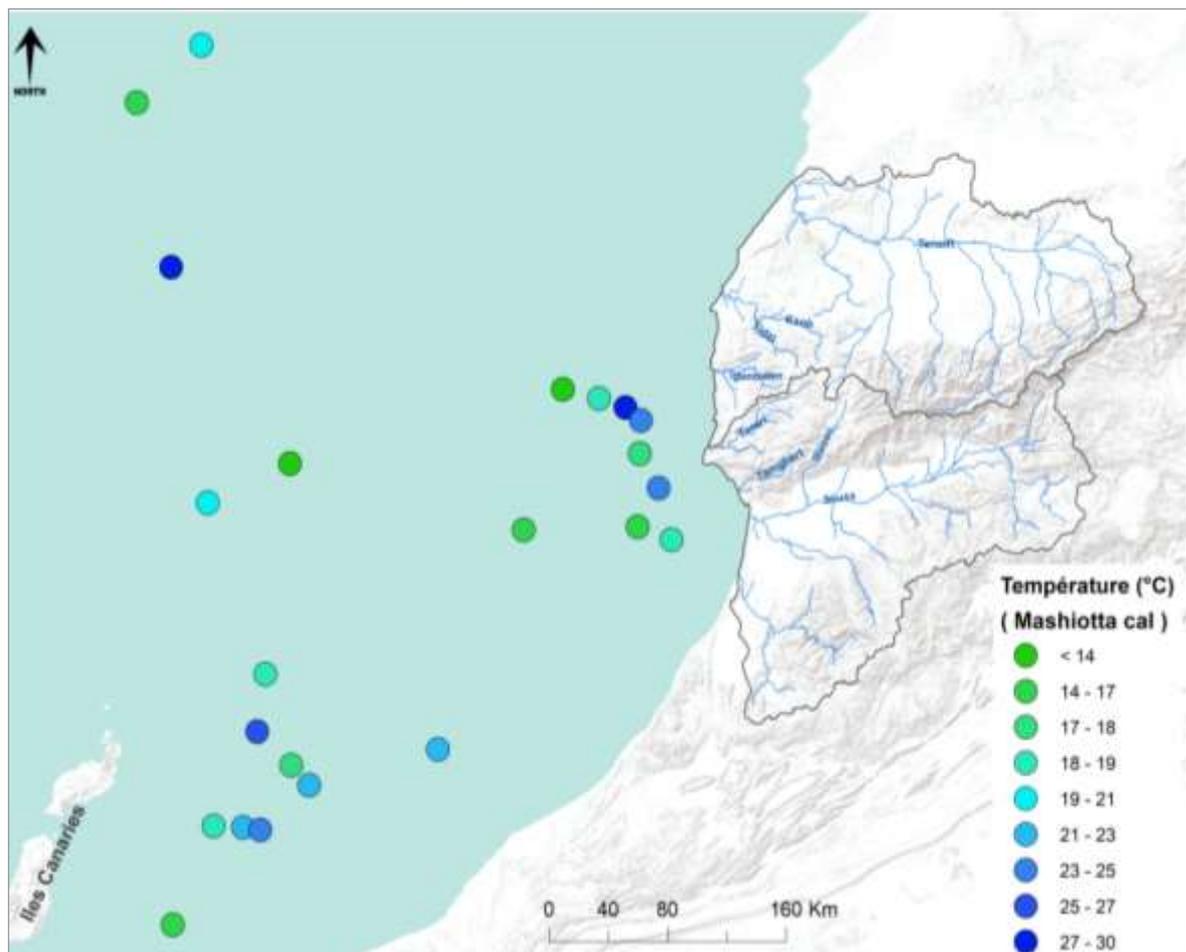
Tableau 23 : Les caractéristiques géochimiques des sédiments de surface marins obtenues.

Nom carotte	Prof. (cm)	Lat.	Long.	G. bulloides			T (°C) (Cal.Mashiotta)	T (°C) (Cal.Elderfield et Ganssen)
				Mg/Ca (mmol/mol)	$d^{13}C$	$d^{18}O$		
GeoB8614-2	2-3	27,535	-13,850	3,06	-0,95	-0,14	17,4	18
GeoB8613-7	2-3	27,535	-13,737	3,98	-1,12	-0,08	19,9	20
GeoB4239-2	B3	28,495	-13,180	3,36	-1,07	-0,40	18,3	19
GeoB8612-2	2-3	28,802	-12,860	3,54	-1,07	-0,28	18,8	19
GeoB8611-3	2-3	28,795	-12,682	4,85	-1,42	-0,43	21,7	22
GeoB8610-2	2-3	28,782	-12,577	7,22	-1,24	-0,15	25,5	26
GeoB4229-1	B3	29,185	-12,650	3,16	-0,71	-0,05	17,7	18
Muc4223-4	2-3	29,018	-12,467	4,22	-1,09	-0,13	20,4	21
GeoB4226-3	B3	29,318	-11,833	5,42	-0,28	0,11	22,8	23
GeoB4228-2	B3	29,470	-12,993	4,25	-0,58	0,13	20,5	21
GeoB4218-1	A3	29,955	-12,912	3,73	-0,35	0,38	19,3	20
GeoB4210-1	B3	30,300	-10,980	3,27	-0,96	-0,07	18,0	18
GeoB4217-1	2-3	30,435	-12,895	4,29	-0,27	0,33	20,6	21
GeoB4216-2	2-3	30,632	-12,397	3,28	-0,31	0,41	18,1	18
GeoB8604-3	2-3	30,957	-10,522	3,74	-1,38	-0,10	19,3	20
GeoB8607-2	2-3	30,912	-10,362	11,89	-1,06	0,14	30,1	31
GeoB6011-2	2-3	30,315	-10,288	4,49	-1,08	-0,05	21,0	22
GeoB6009-1	2-3	30,682	-10,275	3,09	-1,16	-0,10	17,5	18
GeoB8601-1	2-3	30,848	-10,268	3,82	-1,39	0,09	19,5	20
GeoB6010-1	2-3	30,250	-10,083	10,82	-1,05	-0,13	29,2	30
GeoB8606-2	2-3	31,003	-10,742	2,62	-1,16	-0,11	16,0	16
GeoB5560-1	B3	32,610	-13,117	3,81	-1,01	1,55	19,5	20
GeoB5561-1	2-3	32,703	-12,935	4,25	-0,64	0,36	20,5	21

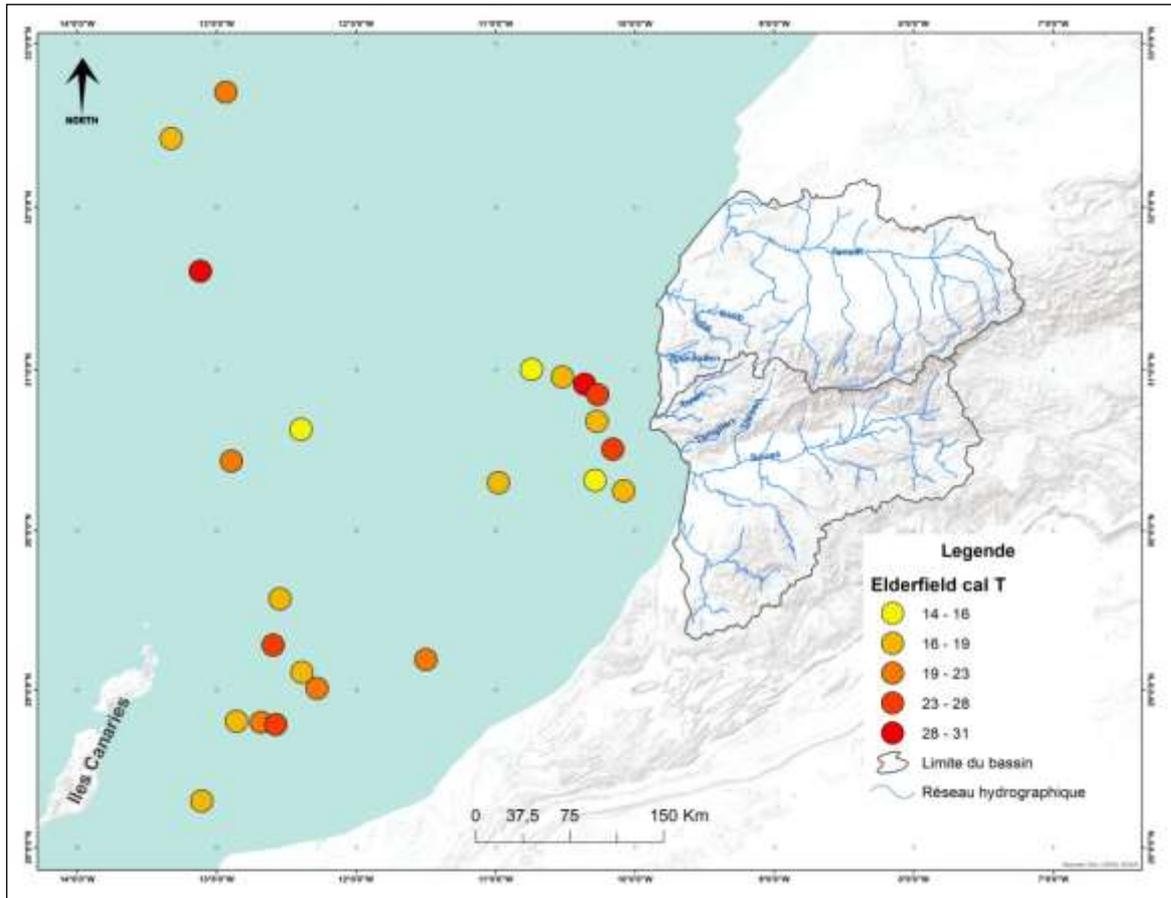
GeoB4201-2	B3	32,702	-13,545	3,77	-0,07	0,66	19,4	20
------------	----	--------	---------	------	-------	------	------	----

À partir des résultats obtenus ci-dessus, le rapport Mg/Ca montre une variabilité plus ou moins compliquée. Il semble y avoir très peu de dépendance à la température, à travers la zone d'étude. En effet, les rapports des foraminifères Mg/Ca d'une manière générale ont montré un grand potentiel, comme indicateur des températures océaniques passées dans les zones tropicales et subtropicales de l'océan (Elderfield et al, 2000 ; Rosenthal et al, 2000 ; Lea et al, 2002).

Généralement, les résultats obtenus montrent, une grande variabilité entre les échantillons retenus dans cette étude. En se basant sur les mesures du rapport Mg/Ca, la température de surface de la mer (SST) à la façade atlantique au Sud-Ouest du Maroc, varie entre 16 °C (Mg/Ca = 2,62 mmol/mol) et 30,1 °C (Mg/Ca = 11,89 mmol/mol) selon la calibration de Mashiotta, ou entre 16°C et 31°C selon la calibration d'Elderfield et Ganssen, (2000). La distribution de la température de surface de la mer (SST), varie en fonction de la position géographique des échantillons. En effet, la distribution de la température (SST) montre que la valeur de la température la plus élevée est celle de l'échantillon GeoB8607-2 (~31°C), tandis que la faible valeur est enregistrée au niveau de l'échantillon GeoB8606-2 (~16°C). Le gradient de la température est aussi marqué à la côte Atlantique marocaine, près de la région du Cap Ghir. Généralement, on note au niveau de cette région d'étude, des valeurs comprise entre 17 °C et 30 °C.



Carte 48 : Températures estimées de la surface marine, à partir du rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques (*G.buloides*), selon la méthode de Mashiotta, (1999).



Carte 49 Températures estimées de la surface marine, à partir du rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques (*G.buloides*), selon la méthode d'Elderfield et al, (2000).

3. Essai de reconstitution des températures des eaux profondes au Sud-Ouest du Maroc, au cours des 2000 dernières années, à partir du rapport Mg/Ca des foraminifères (*G.buloides*) :

Les rapports Mg/Ca de foraminifères planctoniques ont été déterminés dans les sédiments de la carotte GeoB8601-3, prélevée à la marge atlantique au Sud-Ouest du Maroc, afin d'étudier les variations de températures des masses d'eau, caractérisant la partie supérieure de la circulation océanique, pendant les derniers 2000 ans.

Les reconstitutions des paléotempératures (Mg/Ca) des eaux à 173cm de profondeur, à l'aide d'espèces de foraminifères *G. Bulloide* et des datations au carbone 14 ont été réalisées, permettant d'établir des modèles d'âges, et donc, de faire associer à des profondeurs précises de carottes, un âge calendaire absolu.

Les données Mg/Ca mesurées des foraminifères planctoniques sont ensuite converties en température, en utilisant des calibrations adaptées à l'espèce de foraminifère de type *G. Bulloide*.

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude sur les variations des températures océaniques de surface (Sea Surface Temperatures, SST) de la carotte GeoB8601-3. Ceci afin de mieux définir les variations des températures océaniques au cours des derniers 2000 ans.

Pour reconstituer la température marine dans la marge Sud-Ouest marocaine, on a utilisé le rapport Mg/Ca, qui nous a permis de retracer l'évolution de la température de l'océan, au cours des derniers 2000 ans.

Afin de vérifier la cohérence des résultats de Mg/Ca obtenus, il est intéressant de mettre en

parallèle ces résultats, avec ceux des calibrations déjà existantes sur cette espèce dans la littérature (Mashiotta et al, 1999 ; Elderfield et al, 2000). Toutes ces données ont été obtenues par la même méthode de nettoyage, un coefficient d'ajustement de $\sim 0,09$ mmol/mol est systématiquement ajouté aux données obtenues à partir de la méthode réductive de Boyle et Keigwin, (1985). Ce coefficient a été déterminé, à partir de nombreuses mesures inter-calibration menées par différents laboratoires au cours des dernières années. (Barker et al, 2003, Greaves et al, 2008, Yu et al, 2008).

Tableau 24 : Les caractéristiques géochimiques de la carotte GeoB8601-3, obtenues sur *Globigerina bulloides*.

Nom carotte	Prof. (cm)	G. bulloides		
		Mg/Ca (mmol/mol)	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
GeoB8601-3	0-1,5	3,03	-0,63	-0,02
GeoB8601-3	5-6,5	2,99	-1,23	-0,01
GeoB8601-3	10-11,5	3,37	-0,69	0,09
GeoB8601-3	15-16,5	3,60	-0,76	0,16
GeoB8601-3	21-22,5	3,24	-1,02	0,13
GeoB8601-3	45-46,6	3,86	-0,86	0,01
GeoB8601-3	70-71,5	3,59	-0,83	0,13
GeoB8601-3	80-81,5	3,43	-1,16	-0,12
GeoB8601-3	85-86,5	3,48	-0,36	0,10
GeoB8601-3	90-91,5	2,30	-0,92	0,07
GeoB8601-3	100-101,5	3,27	-	-
GeoB8601-3	110-111,5	4,44	-0,30	0,43
GeoB8601-3	125-126,5	4,11	-0,51	0,37
GeoB8601-3	130-131,5	3,91	-1,54	-0,16
GeoB8601-3	135-136,5	4,44	-0,89	-0,12
GeoB8601-3	145-146,5	2,91	-0,21	0,28

Les températures de la carotte Geo8601-3, durant les derniers 2000 ans sont légèrement plus froides, que celles de la carotte la plus au Sud (Geo4223-4) par exemple. Ceci pourrait s'expliquer par l'impact des flux d'eau douce issus des cours d'eau dérivant par le continent. Cette alimentation a sans doute eu un impact important sur les SST de la zone du Cap Ghir influencés par les eaux continentales. Ce facteur qui varie localement de manière importante, doit être pris en considération, lors de la comparaison entre les signaux de températures des différentes carottes.

À ce titre, on remarque au niveau des résultats obtenus dans cette étude, que les données du rapport Mg/Ca dans la zone d'étude, varient en fonction de la profondeur. En effet, la distribution de Mg/Ca (mmol/mol) montre que la plus faible valeur est enregistrée au niveau de la profondeur de 90-91,5cm (2,62 mmol/mol), tandis que la plus élevée est celle de la profondeur de 110-111,5cm (4,44 mmol/mol) et 135-136,5cm (4,44 mmol/mol). Cette dernière montre des valeurs plus que la moyenne au niveau de cette carotte, ce qui pose la question de savoir si elles sont liées à des circonstances particulières, ou sont-elles liées à la procédure de traitement des données. Ainsi, on observe au niveau de cette carotte, une large dispersion/tendance des données, qui sont significativement plus fortes au niveau de cette carotte. En effet, tous les points semblent suivre généralement, une tendance vers la diminution (plus ancien vers plus récent), seuls les points entre 110-111,5cm et 45-46,5cm marquent une augmentation notable et atteignent 4,44(mmol/mol) et 3,86(mmol/mol) respectivement.

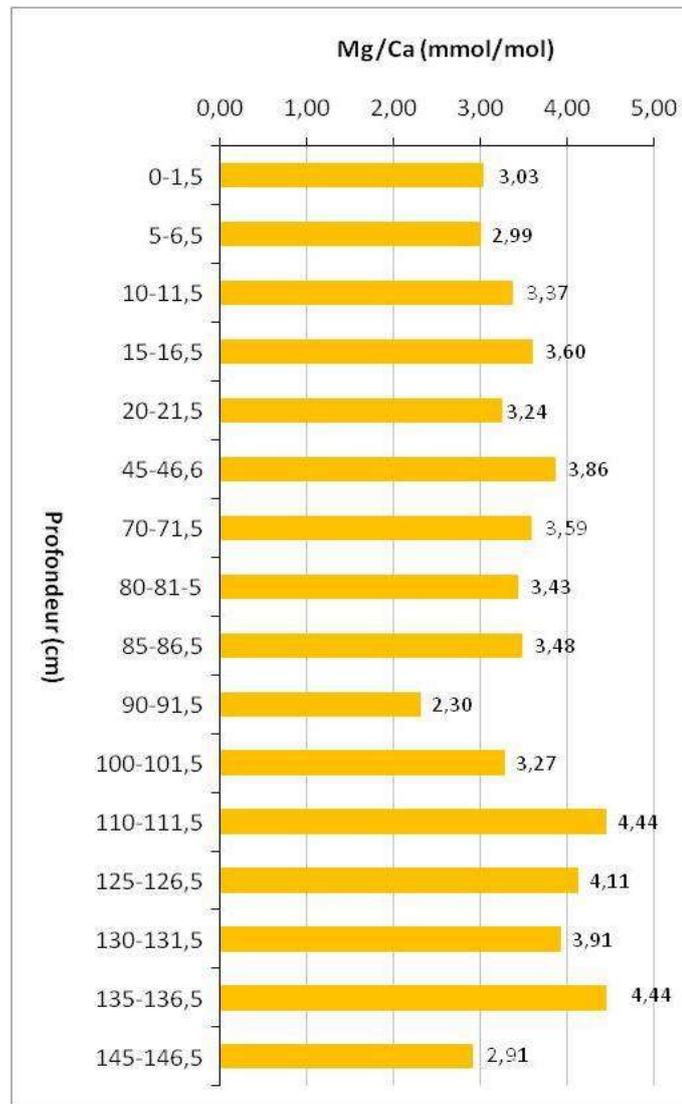


Figure 85 : Enregistrements Mg/Ca (mmol/mol) de la carotte GeoB8601-3, obtenus sur *Globigerina bulloides*.

Grâce aux outils de calibration, et au cadre chronologique précis obtenu à l'aide des nombreuses datations ^{13}C , nous avons pu mettre en évidence, les variations des températures océaniques au large du Sud-Ouest du Maroc, au cours des derniers 2000 ans. La reconstitution des SST de la carotte GeoB8601-3, permet d'obtenir les principales phases climatiques marquant cette période. Une augmentation significative des températures pendant les années entre ± 2112 et ± 1681 ans BP et plus ou moins les années entre ± 1191 et 233 ans BP, et par des températures relativement froides entre ~ 165 ans BP jusqu'à l'actuel, enfin interrompues par un refroidissement remarquable en ± 1351 ans BP. Lorsque l'on compare les enregistrements des deux méthodes de calibration, on observe d'abord, la présence d'un gradient vers la diminution de SST, tout le long de cette période.

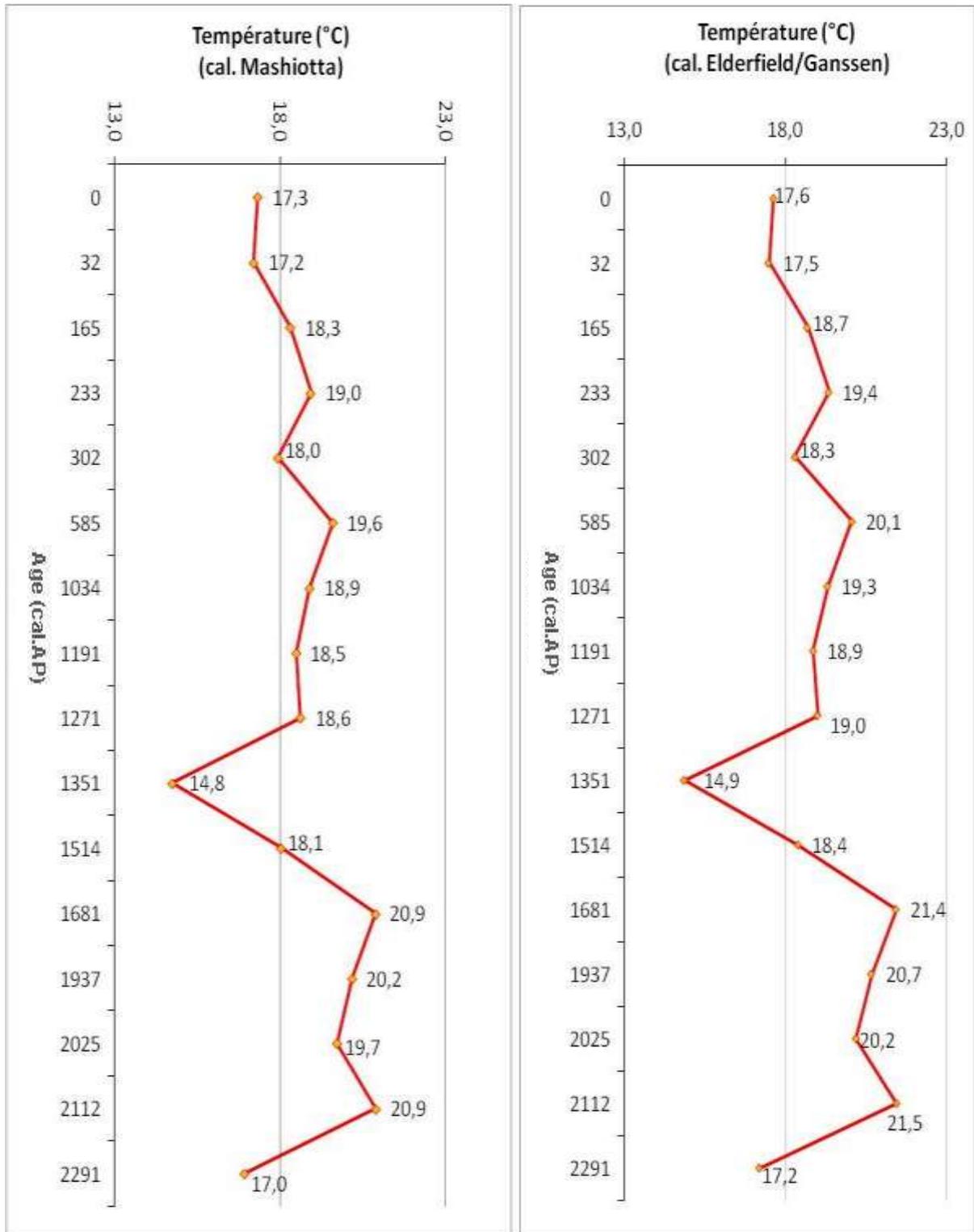


Figure 86 : Paléotempératures de surface estimées par la mesure du rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques *G. bulloides* (Calibration de Mashiotta, 1999 et d'Elderfield et al, 2000).

Axe 3 : Discussion et interprétation :

Le climat dans le domaine d'étude est généralement semi-aride et influencé par l'océan Atlantique. Cette région semi-aride est vulnérable, au changement climatique, à cause de la variabilité climatique à des échelles de temps saisonnières et plus longues (Knippertz et al, 2003), ce qui entraîne des changements dans la fréquence, l'intensité, la répartition spatiale, la durée et le moment des événements météorologiques et climatiques extrêmes. Pendant la

phase négative de la NAO, les trajectoires des dépressions atteignent plus souvent l'Afrique du Nord, ce qui entraîne une augmentation des précipitations dans le Nord-Ouest de l'Afrique (Knippertz et al, 2003 ; Trouet et al, 2009). Pour le Sud-Ouest du Maroc, Ait Brahim et al, (2016) ont montré que, la variabilité la plus importante des précipitations est observée dans les montagnes de l'Atlas, où les valeurs des précipitations varient considérablement, en raison des effets de l'altitude et du microclimat.

Par ailleurs, toutes les estimations disponibles montrent que, à l'échelle de l'hémisphère Nord, la période 1983-2012 est la période de 30 ans la plus chaude des 800 dernières années et la plus chaude, depuis 1400 ans (Masson et al, 2013). Sur l'ensemble de la période étudiée (1968-2015), le bassin versant du Tensift et de Souss-Massa connaissent une variabilité et une irrégularité spatio-temporelle des températures et des précipitations. L'analyse de l'évolution des températures moyennes annuelles a permis de constater, une tendance vers l'augmentation dans les deux bassins versants. On note aussi, un accroissement observé du déficit hydrique estival, résultant d'une augmentation de l'évapotranspiration potentielle, au cours de la période 1968-2015. Ce déficit hydrique climatique au sud du Maroc nous permet, de mettre en évidence la pression qui s'exerce sur la disponibilité de l'eau pour les cultures.

Les enregistrements paléoclimatiques continentaux montrent également, des périodes de plusieurs décennies où les températures, localement, étaient aussi chaudes, pendant l'optimum médiéval (950-1250), que le milieu ou la fin du siècle. Cependant, ces épisodes chauds ne se sont pas produits de manière synchrone dans les différentes régions de la planète, ce qui explique que le réchauffement « global » est récent.

Dans la présente étude, nous avons essayé de souligner ce qui a été atteint précédemment, en comparant les résultats que nous avons obtenus grâce à notre étude et ceux obtenus grâce aux autres études, menées sur la région du Sud-Ouest du Maroc, en se basant essentiellement sur les carottes qui ont été récupérées, lors de la croisière METEOR M 45/5 (carotte GeoB6007-2 et GeoB6008-1), en raison que ces deux sites sont très proches de notre site d'étude, et également, en raison des bonnes corrélations des paramètres géochimiques entre les deux sites. L'objectif principal était d'obtenir plus informations sur les changements climatiques et environnementaux passés enregistrés dans le Sud-Ouest du Maroc, au cours des 2000 dernières années à nos jours.

I. Comparaison des résultats XRF et Mg/Ca de cette étude et des autres enregistrements climatiques au large du Sud-Ouest du Maroc :

Tout d'abord, dans ce travail, les enregistrements des sédiments marins à haute résolution utilisées, documentent les variations du dépôt de sédiments terrigènes, au large de la marge continentale marocaine. Actuellement, le site de la carotte GeoB8601-3 étudiée est situé sous la trajectoire de la poussière saharienne, mais, il enregistre également de façon saisonnière, les dépôts fluviaux, souvent fournis sous forme d'écoulements d'eau, provenant des montagnes de l'Atlas (Holz et al, 2007). En effet, les changements observés dans les enregistrements des données géochimiques de la carotte GeoB8601-3, indiquent une variabilité claire à l'échelle millénaire, pouvant également, être observée dans les sédiments terrigènes de l'océan Atlantique Nord au large du Maroc.

Le transport des matériaux terrestres au large du Sud-Ouest du Maroc, soit d'une source éolienne et/ou d'une autre source fluviale, provient de plusieurs rivières/Oueds saisonniers (Souss, Tamghart, Asserssif et Assif Ait Aneur). Concernant les sédiments marins dans notre

domaine d'étude, les zones sources d'alimentation, peuvent être aussi loin au Sud que le Sahara méridional et le Sahel transportés par le jet d'Est Africain/saharien (Dupont, 1999).

La carotte sédimentaire GeoB8601-3, récupérée au large du Maroc documente une augmentation abrupte de l'humidité, à partir d'environ 1191 ans avant le présent (BP). Cette période peut être reconnue comme une transition aride-humide au Sud-Ouest du Maroc. De plus, cette période peut être caractérisée par une augmentation de ruissellement continental, interrompu par de courts épisodes secs, clairement reflétés par les fluctuations de l'apport terrigène au large du Sud-Ouest du Maroc. Ça pourrait être expliqué par des effets locaux dans un paysage montagneux, puisque ces enregistrements proviennent de l'océan et que les sédiments sont dérivés à la fois des montagnes de l'Atlas et du désert saharien. On note ici que, la variabilité observée dans nos enregistrements est plus représentative et cohérente avec les enregistrements paléoclimatiques et paléohydrologiques, à l'intérieur de notre zone d'étude.

L'enregistrement « d'aridité/humidité » documente clairement, une variabilité à l'échelle millénaire, d'épisodes secs brusques et répétés dans le climat du Sud-Ouest du Maroc. En outre, la phase plus ou moins sèche enregistrée au Sud-Ouest du Maroc représente la période entre 2752 et ± 1351 ans avant le présent (BP). En général, ces longues périodes de réduction de l'écoulement continental peuvent correspondre aux changements climatiques de l'Holocène, décrits pour les hautes et basses latitudes (deMenocal et al, 2000).

En faisant appel à la reconstitution de la température de surface de la mer (SST) de la faune foraminifère (*G.Bulloides*) de la même carotte étudiée (GeoB8601-3), on remarque que au cours de la période étudiée, l'existence d'événements froids au Sud-Ouest du Maroc, notamment, les années ± 2291 et ± 1351 ans avant le présent (BP). Cependant, cet enregistrement au large du domaine d'étude est fortement influencé, par la mousson africaine, alors que notre enregistrement au large du Cap Ghir est plutôt dominé, par le système climatique de l'Atlantique Nord (Knippertz et al, 2003). Dans ce contexte, Kuhlmann et al, (2004), indiquent que pendant l'Holocène, la partie Nord de l'Afrique du Nord-Ouest a probablement été dominée par le climat de l'Atlantique Nord. En effet, dans une zone où la fraction des sédiments terrigènes contient si clairement une partie dominante de sédiments éoliens, il faut évidemment faire la distinction entre les sédiments fluviaux et éoliens. Nous supposons que nos données peuvent être comparées, à des données indirectes, provenant des hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Bond et al, (2001) suggèrent que les variations de l'irradiation solaire constituent le principal mécanisme de forçage de ces changements du climat Holocène, sur des échelles de temps centennales à millénaires, et n'excluent pas que le forçage solaire, puisse exciter la variabilité atmosphérique.

Si nous comparons l'aridité continentale du Nord-Ouest de l'Afrique, avec un enregistrement des glaces des sédiments marins de l'Atlantique nord subpolaire, représentant la variabilité climatique de l'Holocène, sur des échelles de temps centennales à millénaires (Bond et al, 2001), on note que, pendant cet intervalle de temps, une reconstruction des précipitations hivernales moyennes dans l'ouest de la Norvège, indique une augmentation des précipitations hivernales, qui peut également être attribuée à une circulation d'ouest plus forte (Nesje et al, 2000). Sur la base d'un modèle de circulation générale atmosphérique, Harrison et al, (1992) montrent que, au début et au milieu de l'Holocène, la dépression islandaise et le courant-jet d'Ouest ont été déplacés plus au nord, produisant des hivers modérée et humides en Europe du Nord. Tous ces signaux des hautes et basses latitudes sont similaires à une

situation positive d'oscillation nord-atlantique (NAO), qui se caractérise par des conditions orageuses sur l'océan Atlantique Nord, des conditions humides mais chaudes en Europe du Nord et des conditions froides et sèches dans la région méditerranéenne (Hurrell et al, 2003). Dans la présente étude, la variabilité à l'échelle centennale et millénaire des données pluviométriques mesurées par des instruments (voir la partie II) et de l'apport en sédiments terrigènes (sédiments éoliens contre sédiments fluviaux) au large du Sud-Ouest du Maroc, indique des conditions sèches récurrentes.

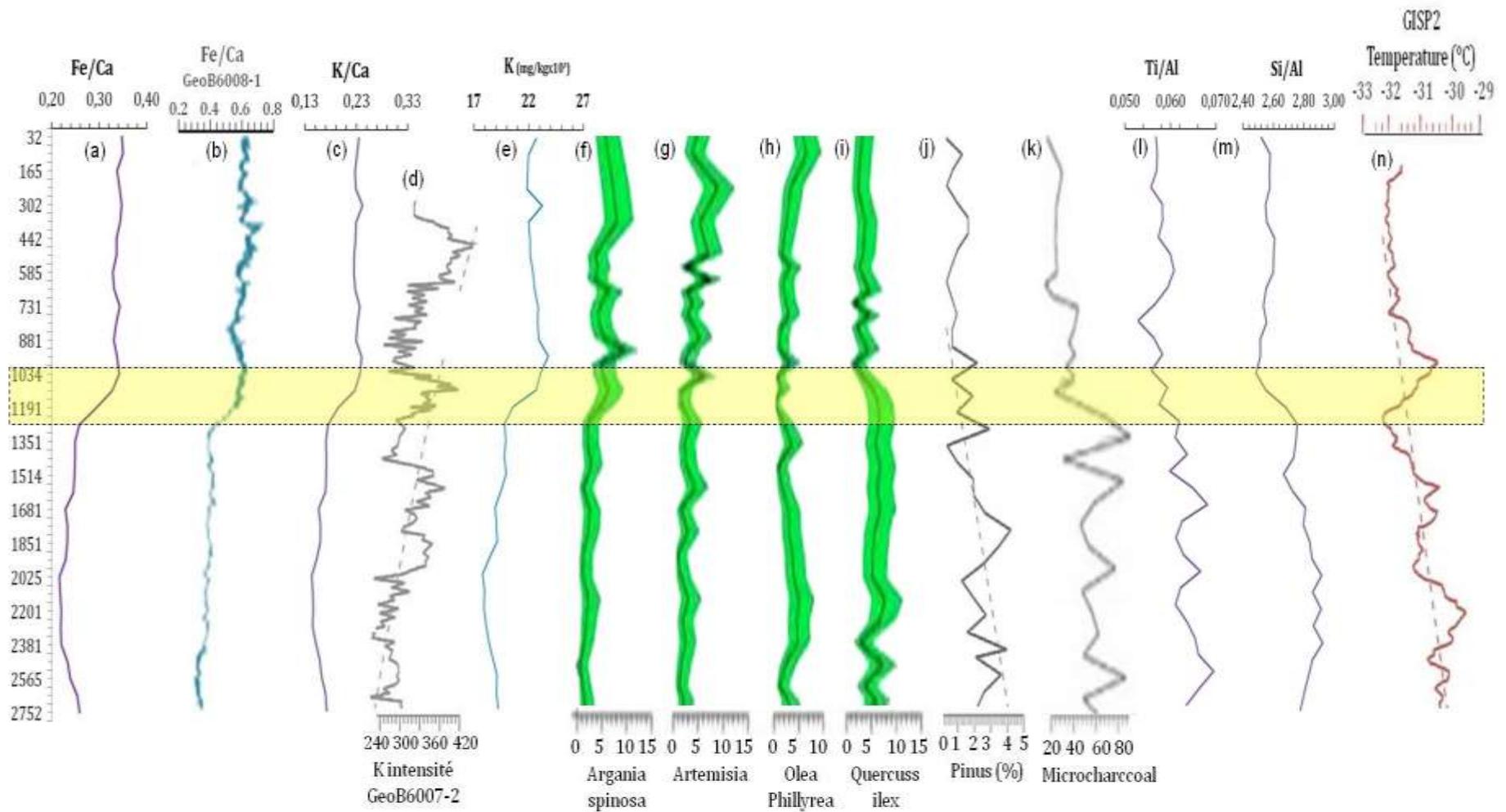


Figure 87 : Comparaison des enregistrements climatiques au large du Sud-Ouest du Maroc (a, b, c, d, e) rapports Fe/Ca, K/Ca et K dans les carottes GeoB8601-3 (cette étude), GeoB6008-1 (McGregor et al, 2009) et GeoB6007-2 (Kuhlmann et al, 2004) respectivement. (f, g, h, i, j) cinq taxons polliniques (%) de la carotte GeoB8601-3 (Zhao et al, 2019). (k) concentration en Microcharbons de la carotte GeoB8601-3 (Zhao et al, 2019). (l, m) rapport Ti/Al et Si/Al de la carotte GeoB8601-3 (cette étude). (n) reconstruction de la température à partir des carottes de glace du Greenland Ice Sheet Project Two (Alley, 2004).

Par ailleurs, nous observons à partir de nos résultats ci-dessus que, la distribution des teneurs des éléments chimiques varie d'une façon remarquable, au cours de cette période, avec un changement brusque marqué entre 1191 ans et 1034 ans BP, en comparaison avec l'enregistrement de la carotte voisine GeoB6008-1, qui couvre la même période des 2000 dernières années. En outre, les enregistrements des éléments chimiques, les données complémentaires de concentration de pollen et de micro-charbon de bois de la carotte GeoB8601-3 devraient nous permettre, de mieux comprendre la variabilité du climat passé et sa relation avec la végétation et les activités humaines. En effet, les données polliniques (McGregor et al, 2009 et Zhao et al, 2019) et les rapports d'éléments chimiques des sédiments marins utilisés dans ce travail, indiquent un changement marqué entre 1191 ans et 1034 ans BP. L'augmentation de la vitesse de sédimentation, du rapport Fe/Ca et K/Ca et les éléments fluviaux ont indiqué, une augmentation de la charge sédimentaire terrestre dans le site d'étude, entraînée, soit par le climat, soit par le changement d'occupation des sols (McGregor et al, 2009). À cet égard, on peut mentionner donc deux scénarios : changement de climat/précipitations et changement d'occupation des sols.

Ces deux scénarios seront discuté en détail ci-dessous, avec les données des deux sites GeoB8601-3 (notre carotte étudiée) et GeoB6008 (McGregor et al, 2009), utilisées pour tester chaque scénario.

1. Premier scénario : changement de climat/précipitations :

Dans le cadre du premier scénario, la comparaison des éléments Al, Fe, K, des rapports Fe/Ca, K/Ca et du pollen des deux carottes (GeoB8601-3 et GeoB6008-1) montre, dans les limites des incertitudes du modèle d'âge, que les tendances sont généralement cohérentes pour les 2000 dernières années. En effet, une relation positive significative, entre les teneurs d'élément K, Fe et Al, les rapports du Fe/Ca et K/Ca (cette étude), la distribution de pollen et les données du Micro-charbon (Zhao et al, 2019) a été observé pour la période allant de ± 2752 ans BP à ± 1191 ans BP. Nous marquons qu'avant ± 1191 ans BP, les régions du Sud-Ouest du Maroc, entre les années 2752 et 1191 ans BP ont connu généralement, une période aride intense, caractérisée par l'augmentation des apports éoliens. Tandis que les années entre 1191 et 1031 BP (transition) ont été caractérisés par une période de transition progressive de l'état aride à l'état humide, d'une manière remarquable. Selon McGregor et al, (2009), l'augmentation des apports fluviaux est généralement interprétée, comme un indicateur des précipitations ou du bilan hydrique pour une région donnée. Enfin dans les années de 1031 ans BP jusqu'au présent, la région a connu une période humide intense, caractérisée par l'augmentation des apports fluviaux. De plus, plusieurs données indirectes (proxies), basées sur la carotte GeoB6008, suggèrent un changement marqué, à partir d'environ ± 1191 ans BP. Le taux de sédimentation, les valeurs élevées de Fe/Ca et K/Ca et l'augmentation des flu de pollen, indiquent un apport terrestre, plus important dans la zone d'étude, pendant cette période. De plus, les faibles valeurs de Fe/Ca et K/Ca, indiquent des quantités de précipitations faibles, avec une augmentation de Si/Al et Ti/Al. En effet, l'enregistrement de Fe/Ca, K/Ca, Si/Al et Ti/Al pour cette période, indique donc, un stress hydrique plus élevé dû à une plus grande disponibilité de l'aridité dans le Sud-Ouest du Maroc.

Dans le cadre du scénario « climat/précipitation », le passage de ± 1034 ans à 1191 ans BP, montre un changement rapide d'un mode climatique à un autre. C'est-à-dire, qu'avant ± 1034 ans et 1191 ans BP, les dépôts éoliens dominent et cela signifie que les conditions plus arides

prévalent. Après ± 1034 ans et 1191 ans BP, le dépôt fluvial domine et implique des conditions plus ou moins humides jusqu'à nos jours. Puisque les précipitations au Maroc sont contrôlées par la circulation atmosphérique à grande échelle de l'oscillation nord-atlantique (Knippertz et al, 2003), le changement entre ± 1034 ans à 1191 ans BP, montre une réorganisation de cette caractéristique à grande échelle. Ce changement pourrait être la transition hors de la " période humide africaine " à 6 ka BP (deMenocal et al, 2000). De plus, les enregistrements polliniques du Moyen-Atlas montrent une diminution régulière des précipitations au cours des 2000 dernières années, bien que la dernière partie de cette reconstruction, puisse être influencée par les changements de végétation anthropique (Cheddadi et al, 1998). Enfin, au cours des 1000 dernières années, les faibles changements au cours de la même période dans les précipitations marocaines ou dans l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer, tels qu'ils ont été reconstitués à partir de la largeur des cernes d'arbres au nord du Maroc (Esper et al, 2007).

Par ailleurs, le phénomène d'upwelling qui est une caractéristique océanique majeure le long de la côte Sud-Ouest du Maroc, ainsi que le refroidissement associé de l'atmosphère, peuvent être une source majeure d'humidité, pour les régions situées immédiatement sur le littoral des zones d'upwelling (Snyder et al, 2003). L'enregistrement de la température de surface de la mer de notre carotte GeoB8601-3, est un indicateur de l'intensité du phénomène d'upwelling (McGregor et al, 2007). En effet, les rapports Mg/Ca sont souvent utilisés, comme indicateur paléocéanographique, pour reconstruire la température océanique passée (Schefuß et al, 2011). Nos résultats indiquent que les valeurs de Mg/Ca au Sud-Ouest du Maroc augmentent notamment de 2112 ans BP à 1681 ans BP et qu'un nouvel enrichissement s'est produit entre 1271 ans BP et 585 ans BP, alors que les valeurs plus faibles sont enregistrées aux années 2291, 1351 et 32 BP.

Selon Ait Brahim et al, (2016), l'effet de la température devient plus important vers la latitude moyenne, et dominante à haute altitude dans le domaine d'étude. En ce qui concerne les sources d'humidité variables, nous avons exclu l'influence de l'humidité dérivée de la mer Méditerranée, car son influence sur le Sud-Ouest du Maroc est négligeable, par rapport à celle de l'humidité dérivée de l'océan Atlantique (Ait Brahim et al, 2017). En effet, l'apport d'humidité provenant de l'océan Atlantique s'affaiblit ou se renforce, sous l'influence de la dépression saharienne dans le Sud-Ouest du Maroc (Liu et al, 2014). Par conséquent, la quantité des précipitations est l'effet prédominant qui fonctionne avec l'effet de l'altitude, car plus de précipitations signifie également, plus de précipitations en altitude à des températures plus basses (Sachse et al, 2012). Si on suppose que les précipitations avaient changé entre ± 1034 ans et 1191 ans BP, selon les données de notre carotte GeoB8601-3 au Sud-Ouest du Maroc, on peut confirmer ou interpréter ces résultats, en s'appuyant sur les changements dans les enregistrements polliniques de la carotte voisine GeoB6008, puisque, même de petits changements dans la disponibilité de l'eau, auraient un impact important sur la végétation de cette région (McGregor et al, 2009).

En outre, les rapports Ti/Al et Si/Al dans la carotte GeoB8601-3, diminuent clairement après 1191 ans BP pour atteindre des valeurs très faibles, vers 1034 ans BP, tandis que les rapports Ti/Al et Si/Al dans la carotte GeoB6008-1 (non représentée dans la figure) montrent un peu de changement tout au long de la carotte. Ces divergences entre les données peuvent être liées aux différentes méthodes XRF qui ont été utilisées pour les deux carottes. Cependant, la diminution du pourcentage de pollen de type *Quercus Robur*, avec des

enregistrements relativement stables d'*Olea/Phillyrea* et de *Pistacia* suggèrent des conditions plus sèches (McGregor et al, 2009). Le pollen d'*Olea/Phillyrea* et de *Pistacia* reflète souvent, des conditions semi-arides (Barbero et al, 1990). L'augmentation des pourcentages de pollen d'*Artemisia*, par exemple, suggère également un assèchement (McGregor et al, 2009). Alors qu'on remarque, d'après les résultats des données polliniques de Zhao et al, (2019) une augmentation des valeurs polliniques d'*Argania spinosa* et d'*Artemisia* autour ± 1191 ans et 1034 ans BP, accompagnée d'une diminution des types *Pinus* depuis ± 1514 ans BP, ainsi que les similitudes des pourcentages polliniques d'autres taxons (*Olea/Phillyrea*, *Quercus ilex*).

Les valeurs élevées des rapports de Ti/Al et Si/Al dans notre carotte GeoB8601-3, suggèrent probablement un fort transport éolien au Sud-Ouest du Maroc avant 1191 ans BP. Par conséquent, la faible dispersion éolienne pourrait également expliquer la diminution rapide du rapport Ti/Al et Si/Al dans la carotte GeoB8601-3 au cours de la période entre 1191 ans et 1034 ans BP. L'augmentation tardive du K/Ca et Fe/Ca après 1191 ans BP suggère un transport fluvial depuis les hautes montagnes du Sud-Ouest du Maroc. La fréquence de feu plus élevée avant 1191 ans BP, pourrait suggérer des conditions arides. Après 1191 ans BP, l'activité de feu est beaucoup plus faible, ce qui suggère, soit des conditions plus humides, soit une moindre disponibilité avec un paysage plus ouvert (Zhao et al, 2019). Cependant, dans cette étude, lorsque la concentration de micro-charbon de bois diminue après 1191 ans BP, la concentration de rapport du K/Ca et Fe/Ca augmente. Cela signifie que le feu est plus faible, qui devrait être attribué à des conditions humides, ou à un meilleur contrôle des incendies par les humains. Par ailleurs, le fort transport éolien est cohérent avec les pourcentages élevés de pollen de *Pinus*, accompagné des valeurs élevés d'*Olea/Phillyrea* et de *Quercus*, qui ont également été transportés par les alizés du nord-est (Zhao et al, 2019), avec aussi, des valeurs élevées de micro-charbon de bois (indice de feu), cette condition est également observée dans la carotte voisine GeoB6008-1. En même temps, les rapports de Fe/Ca, K/Ca (transport fluvial) et les pourcentages de pollen d'*Argania spinosa* et d'*Artemisia* augmentaient (Zhao et al, 2019). Cela signifie qu'il y a peut-être une transition, d'une période sèche, à une période humide.

D'autre part, les tendances des rapports Si/Al et Ti/Al et les pourcentages de *Pinus* de la carotte GeoB8601-3 correspondent à une diminution de la température basée sur l'enregistrement $\delta^{18}\text{O}$ de la carotte de glace GISP2 (Alley, 2004). En effet, Vinther et al, (2003) et Olsen et al, (2012) ont montré que le climat hivernal du Groenland est fortement influencé par les modes de la NAO. La baisse de la température au Groenland et la diminution des alizés du nord-est en faveur d'un passage à des modes de NAO plus négatifs (Zhao et al, 2019). Il en résulterait une augmentation des précipitations hivernales au Maroc, ce qui serait cohérent avec un apport fluvial élevé indiqué par l'augmentation des rapports K/Ca et Fe/Ca dans notre carotte GeoB8601-3. Cette hypothèse est soutenue par Trouet et al, (2009) et Olsen et al, (2012) qui ont proposé des modes négatifs de NAO à l'échelle millénaire et submillénaire pendant le refroidissement de l'Atlantique. De plus, Zielhofer et al, (2017) ont utilisé une approche multi-proxy pour le lac « Sidi Ali » dans le Moyen Atlas, et ont également déduit l'influence des pluies hivernales maximales sur la Méditerranée occidentale, pendant les modes -NAO coïncidant avec le refroidissement de l'Atlantique.

De plus, les valeurs élevées de Fe/Ca et K/Ca après ± 1191 ans BP, coïncident avec une augmentation de l'abondance du pollen, notamment, d'*Argania spinosa* dans la carotte GeoB8601-3 (Zhao et al, 2019). Les Arganiers sont les végétations les plus dominantes dans

le Sud-Ouest du Maroc (Msanda et al, 2005). Les analyses palynologiques des sédiments de la même carotte GeoB8601-3, accomplies par Zhao et al. (2019), montrent une forte augmentation d'*Argania spinosa* après 1191 ans BP. De même, dans la carotte voisine GeoB6008-1, le pollen d'*Argania spinosa* représente 9% de l'assemblage pollinique total (McGregor et al, 2009). Les valeurs d'Al, Fe et K, sont relativement élevées, ce qui pourrait expliquer l'importance du ruissèlement d'eau après ± 1191 ans BP. Ainsi, nous trouvons une corrélation positive entre les concentrations de pollen d'*Argania spinosa*, les valeurs élevées de Fe/Ca et K/Ca et la diminution de micro-charbon de bois (indice des incendies). Cela indique que la diminution de Fe/Ca et K/Ca, pourrait être entraînée par des conditions climatiques sèches. En fait, Zhao et al, (2019) confirment que l'augmentation d'*Argania spinosa* est probablement principalement influencée par l'impact humain. Zhao et al, (2019) suggère que la diminution de *Pistacia*, avec le retour de *Olea/Phillyrea* et *Quercus ilex* (Fig.142) résultent probablement, des facteurs climatiques avec une augmentation des précipitations et/ou du ruissellement après la période de 1191 ans et 1034 ans BP. Selon Zhao et al, 2019, la diminution du pollen de *Pinus* dans la carotte GeoB8601-3, suggère une diminution du transport éolien, ce qui est supporté par une diminution de l'apport éolien indiqué par la diminution du rapport Ti/Al et Si/Al. Alors que, McGregor et al, (2009) a réfuté le premier scénario (climat/précipitations), pour deux raisons : Premièrement, aucun autre enregistrement au Maroc ne pourrait refléter des changements à grande échelle dans les précipitations coïncidant avec leurs résultats ; deuxièmement, l'enregistrement pollinique de la carotte GeoB6008-1 ne suggère ni des conditions plus humides ni des conditions plus sèches à partir de 1191 ans BP. Le principal argument de McGregor et al, (2009) contre le forçage climatique seulement était la combinaison des valeurs polliniques relativement stables d'*Olea/Phillyrea* et de *Pistacia*, de faibles valeurs du type *Quercus robur*, avec une stabilité ou même une légère augmentation du type *Quercus ilex*, après la période 1191-1034 ans BP. Selon McGregor et al, (2009), la diminution contemporaine des valeurs de pollen du type *Quercus robur*, avec ceux du type *Ephedra fragilis* est difficile à expliquer par des changements dus au climat.

2. Deuxième scénario : changement d'occupation des sols (Facteur anthropique) :

Dans le cadre du deuxième scénario, le scénario d'occupation des sols a été recommandé par McGregor et al, (2009) qui indique que l'augmentation des apports terrestres est lié à l'augmentation de l'érosion. Presque les mêmes changements des apports terrestres ont été trouvés, dans les deux enregistrements de la carotte GeoB8601-3(cette étude) et la carotte voisine GeoB6008-1. De plus, l'augmentation du pollen d'*Argania spinosa*, après ± 1191 ans BP a été considérée comme le résultat d'une augmentation de l'habitation et de l'élevage de chèvres (McGregor et al, 2009). Comme nous l'avons vu précédemment, l'augmentation des précipitations peut être déduite, après la période entre ± 1191 ans et 1034 ans BP. Selon Zhao et al, (2019), la répartition actuelle d'*Argania spinosa* se situe principalement au Sud-Ouest du Maroc, où les précipitations sont faibles et les températures élevées, et n'auraient probablement pas augmenté, dans des conditions plus humides, comme cela a été montré pour la période après ± 1191 ans et 1034 ans BP. Par conséquent, McGregor et al, (2009) montre que, le forçage climatique ne pourrait pas seulement, expliquer l'augmentation du pollen d'*Argania spinosa*, comme nous l'avons vu précédemment, mais serait mieux expliqué par l'impact humain.

Par ailleurs, après environ ± 1191 ans BP, on remarque une augmentation des rapports Fe/Ca et K/Ca dans notre carotte GeoB8601-3 et dans la carotte voisine GeoB6008-1. Ainsi, le taux de sédimentation a augmenté de façon spectaculaire, passant de 100cm/1000 ans à 300 cm/1000 ans (McGregor et al, 2009), ce qui signifie qu'un changement du taux de sédimentation s'est produit après ± 1191 ans BP. En effet, l'augmentation de l'apport fluvial entre ± 1034 ans à 1191 ans BP, serait probablement due à un changement d'occupation des sols ou à une augmentation de la superficie des terres érodables (Walling et al, 1996). L'érosion des sols peut augmenter, en raison de l'augmentation des cultures et du pâturage du bétail, et cela s'explique, par une augmentation de la charge sédimentaire des rivières/Oueds qui atteignent l'océan (Dearing et al, 2003). La distribution des sédiments montre une augmentation plus importante, en raison des impacts humains et du changement d'occupation des sols (Dearing et al, 2003). Le taux de sédimentation de la carotte GeoB8601-3, montre une grande augmentation de ± 1034 ans à 1191 ans BP, comme indiqué auparavant, cette augmentation est cohérente avec une augmentation de l'érosion de la terre. De plus, on note une augmentation de l'apport de Fe et K (matériel terrestre) correspondant à l'augmentation du flux de pollen dans la carotte voisine GeoB6008-1 (McGregor et al, 2009).

Pendant cette période, on suppose que c'est le début la conquête du Maroc par les Arabes (arabisation) et l'influence des activités humaines (McGregor et al, 2009). Par ailleurs, McGregor et al, (2009) et Zhao et al, (2019), indiquent que l'augmentation du pollen d'*Argania spinosa* autour de ± 1191 ans BP a été reliée à l'arrivée de l'Islam et au changement des pratiques agricoles, y compris la possibilité de la préservation des forêts d'Arganiers. D'autre part, Fletcher et al, (2017) a suggéré que, la dégradation de couvert végétal naturel a été déclenchée anthropologiquement par l'augmentation de l'intensité des activités pastorales au sud du Haut-Atlas au début de la période islamique au Maroc. Les estimations suggèrent que la population marocaine a doublé après l'arrivée des Arabes (McEvedy et al, 1978), la migration et la colonisation ont augmenté la population au Sud du Maroc, et l'expansion du pâturage et agricole (Brett, 1992). Des études antérieures sur les changements du rendement sédimentaire des rivières au 20^{ème} siècle, indiquent que les rendements sédimentaires augmentent généralement avec l'accroissement de la population (Walling et al, 1996), où la population du Maroc a triplé au cours du 20^{ème} siècle (DAÉSSNU, 2006). L'augmentation de la population du Maroc a conduit à une pression sur les écosystèmes, étant donné que le paysage marocain est soumis à la déforestation (Mikesell, 1960), à la désertification (Sobrinho et al, 2000), et à la dégradation des écosystèmes (Culmsee, 2004). En effet, l'augmentation des valeurs de pollen d'*Argania spinosa* par exemple, montre une augmentation du bétail (chèvres) dans le Sud-Ouest du Maroc (McGregor et al, 2009), ainsi que, la diminution des valeurs de pollen de *Pistacia* résultant de l'exploitation des arbres de *Pistacia* par les chèvres (Mikesell, 1960). En outre, McGregor et al, (2009), indique que l'augmentation de la déforestation et du pastoralisme pourrait mieux expliquer le changement des taxons polliniques à partir de 1191 ans BP, qu'une interprétation uniquement climatique. Alors que, Mikesell, (1960) suppose que le défrichage des terres pour le pâturage et pour le bois de feu, peuvent réduire les espèces d'arbres. En effet, l'apparition d'animaux domestiques (en particulier les chèvres), dans les régions du Sud-Ouest du Maroc, expliquerait la diminution de quelques types d'arbres (McGregor et al, 2009).

Dans ce contexte, nous suggérons que les valeurs faibles de Si/Al et Ti/Al et les valeurs élevées de Fe/Ca K/Ca de la carotte GeoB8601-3, peuvent être expliquées par une érosion du sol plus élevée, en raison du changement d'occupation des sols après ± 1191 ans BP, qui

coïncide avec l'arabisation dans la région du Souss et de Tensift. Les effets anthropiques sur la végétation et l'occupation des sols après ± 1191 ans BP ont été suggérés par McGregor et al, (2009). Après ± 1191 ans BP, les valeurs d'Al, Fe et K sont en moyenne plus élevées, ce que nous interprétons comme un indicateur d'une période humide. De même, les concentrations d'Al, Fe et K montrent une plus grande variabilité après ± 1191 ans BP, ce qui correspondrait à des effets plus forts des variations climatiques, sur un paysage plus érodable. L'augmentation des rapports K/Ca et Fe/Ca après ± 1191 ans BP a été interprétée, comme une alimentation élevée des Oueds du Sud-Ouest du Maroc et une diminution de l'apport de poussière, indiquant aussi une augmentation de la décharge terrestre. Selon Bouchaou et al, (2008), l'eau est souvent la force érosive cruciale au Maroc, où 40% des terres sont affectées par l'érosion hydrique. En effet, l'érosion naturelle ou anthropique, est très importante dans les zones arides et semi-arides. Par exemple, l'érosion anthropique dépend de différents facteurs, comme la croissance démographique, la déforestation et l'agriculture, surtout dans le cas des sols peu profonds et dans les zones montagneuses et c'est le cas de notre domaine d'étude.

En outre, des études antérieures, par exemple, Lamb et al, (1991) ; McGregor et al, (2009) et Cheddadi et al, (2015), montrent que l'augmentation d'*Artemisia* et d'autres herbes telles que *Cichorioideae*, *Plantago*, indiquent une perturbation humaine, c'est-à-dire un milieu modifié du fait de l'activité ou de la présence humaine, ce qui signifie un pâturage intensif et des cultures, et donc une dégradation des terres au cours de cette période. Or, la baisse des activités des feux (les données de micro-charbon) après ± 1191 ans BP, pourrait également être associée au déboisement et à la dégradation des terres, entraînant une ouverture du couvert végétal (Campbell et al, 2017). McGregor et al, (2009), indique que l'impact des activités humaines, en particulier l'augmentation du bétail après ± 1191 ans BP, serait responsable de l'augmentation de l'érosion et du changement de la végétation, ce qui renforce les changements documentés dans les pratiques agricoles (Ibn Khaldoun, 1971). Ainsi, plusieurs sources suggèrent qu'après l'arabisation du Maroc autour de ± 1191 ans BP, l'influence anthropique a augmenté de façon rigoureuse, par une utilisation agricole plus intense. Par exemple, l'augmentation du pollen d'Arganier (*Argania spinosa*) pourrait être liée, à une augmentation du nombre de chèvres dans le Sud-Ouest du Maroc, étant donné que la présence et l'utilisation de l'Arganier ont été d'abord décrites par Leon l'Africain en 1550. Ici, nous pouvons confirmer que l'espèce se développe dans les régions du Sud du Maroc, depuis au moins les 2000 dernières années et a augmenté vers 950 ans BP. En effet, l'augmentation de la représentation des arganiers pourrait représenter, le début et le développement de la culture et de l'exploitation de cet arbre, en raison de sa valeur économique (McGregor et al, 2009). Dans l'ensemble, l'apparition des chèvres dans le Sud-Ouest du Maroc, suite à l'islamisation et à l'augmentation de la population, pourrait expliquer les changements observés dans les taux d'érosion entre ± 1034 et 1191 ans BP dans la carotte GeoB6008-1, la plus proche de notre carotte GeoB8601-3.

Les résultats de notre carotte GeoB8601-3, en comparaison avec les résultats de la carotte voisine GeoB6008-1, indiquent que la dégradation des terres et l'érosion dans le Sud-Ouest du Maroc ont une histoire beaucoup plus longue, que les 50 dernières années, étant donné que les processus de dégradation et d'érosion peuvent avoir commencé, dès le 8^{ème} siècle (McGregor et al, 2009). D'après les preuves présentées dans cette étude, il est possible de classer le Sud-Ouest du Maroc en fonction de sa vulnérabilité passée, puis d'évaluer la sensibilité/résilience aux impacts futurs (Dearing, 2006). Sachant que, le Sud-Ouest du Maroc est déjà dégradé et

sensible à une très forte érosion, alors que la pression augmente et pousse l'agriculture et le pastoralisme vers de nouvelles régions (McGregor et al, 2009). En effet, les principaux résultats obtenus dans ce travail, indiquent que le Sud-Ouest du Maroc en général, peut être très vulnérable à l'impact humain. Par conséquent, la gestion et l'atténuation de la dégradation des terres et des écosystèmes dans ces régions doivent tenir compte de la longue histoire du changement climatique et de la végétation, afin d'établir les données de références sur les écosystèmes et la résilience des écosystèmes (Dearing, 2008).

En résumé, les résultats de la carotte GeoB8601-3, fournissent plus d'informations sur l'interprétation paléo-enregistrement des carottes des sédiments marins au Sud-Ouest du Maroc. Les proxies (indicateurs) tels que, les intensités des éléments chimiques, le rapport Mg/Ca des foraminifères (*G. Bulloides*) et les données polliniques, sont souvent utilisées dans cette discussion. Nos résultats suggèrent que la période des 2000 dernières années, pourrait avoir une forte empreinte anthropique et que les proxies terrestres de cette période, ne reflètent pas nécessairement le climat seul. En effet, une interprétation basée seulement sur le climat, n'explique pas de manière adéquate, l'augmentation abrupte de l'apport fluvial de ± 1034 ans à 1191 ans BP au Sud-Ouest du Maroc. Ce point doit être pris en compte, lors de l'interprétation des enregistrements à plus long terme, du changement climatique dans le Sud du Maroc.

CONCLUSION

La distribution spatiale des sédiments marins et continentaux dans la région du Sud-Ouest du Maroc a été étudiée pour faciliter la compréhension des enregistrements marins et des changements environnementaux dans la région. Les sédiments de surface marins et continentaux montrent des compositions terrigènes relativement similaires en raison de l'influence du transfert de matériaux depuis les terres par des processus tels que l'apport fluvial et éolien. Les résultats de cette étude mettent en évidence des variations dans la composition élémentaire des sédiments terrestres et marins en fonction de la latitude, reflétant la diversité des conditions locales et des sites d'échantillonnage.

Des paramètres géochimiques ont été utilisés pour reconstruire les changements climatiques et environnementaux sur une période de deux millénaires. Les valeurs des rapports Fe/Ca et K/Ca ont été utilisées pour évaluer les changements liés aux apports fluviaux, tandis que les valeurs des rapports Ti/Al et Si/Al ont été utilisées pour étudier les apports de poussières éoliennes. Deux périodes distinctes ont été identifiées dans la carotte GeoB8601-3. Avant environ 1191 ans avant le présent (BP), les rapports Fe/Ca, K/Ca, Ti/Al et Si/Al montrent une corrélation négative, suggérant que les changements dans les apports terrigènes étaient principalement liés aux variations climatiques. Après environ 1191 ans BP jusqu'à aujourd'hui, une augmentation notable des apports fluviaux (Fe/Ca et K/Ca) s'explique par des conditions climatiques plus humides pendant cette période.

L'analyse de la carotte sédimentaire GeoB8601-3 au large du Sud-Ouest du Maroc a révélé une augmentation significative de la vitesse de sédimentation ainsi que des concentrations en Fe, K, Al, Fe/Ca et K/Ca entre environ 1191 et 1034 ans BP, indiquant une augmentation des dépôts de matériaux terrestres à cette époque. Les données géochimiques suggèrent que cette augmentation était principalement due à des apports fluviaux plus importants, probablement en raison d'une augmentation des précipitations et/ou du ruissellement.

De plus, la reconstitution des températures de surface de la mer (SST) à partir de la carotte GeoB8601-3 a permis d'identifier les principales phases climatiques de la région au cours de cette période. Une augmentation significative des températures a été observée entre environ 2112 et 1681 ans BP, ainsi que pendant la période allant d'environ 1191 ans BP à 233 ans BP, suivie de températures relativement plus froides depuis environ 165 ans BP jusqu'à aujourd'hui.

En conclusion, les changements dans les paysages du Sud-Ouest du Maroc semblent résulter d'une interaction complexe entre les facteurs climatiques et les activités humaines, plutôt que d'un seul forçage climatique. Cette étude souligne l'importance de prendre en compte à la fois les influences naturelles et anthropiques lors de l'analyse des changements environnementaux dans cette région.

CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE

Dans cette section de la thèse, nous avons cherché à identifier les changements paléoclimatiques et paléoenvironnementaux survenus au Sud-Ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années. Notre démarche s'est principalement appuyée sur l'analyse des composants géochimiques des enregistrements des sédiments marins, que nous avons utilisés comme indicateurs "proxys". Cette étude repose sur l'interprétation des éléments chimiques et des rapports spécifiques.

L'analyse spatiale a révélé que les compositions des sédiments continentaux et marins au Sud-Ouest du Maroc reflètent globalement des compositions terrigènes cohérentes. Toutefois, nous avons observé des variations dans la composition élémentaire des sols terrestres et des sédiments marins en fonction de la latitude. Ces variations sont influencées par l'interaction complexe entre les apports éoliens et fluviaux, provenant principalement de deux sources majeures : la zone Saharienne et les rivières/Oueds de l'Atlas.

La composition géochimique des matériaux terrigènes déposés au Sud-Ouest du Maroc a une incidence sur les rapports élémentaires présents dans les sédiments de surface marins. Dans cette étude, nous avons utilisé la distribution des rapports Ti/Ca et Si/Al comme indicateur des apports éoliens de matériel terrigène, tandis que la distribution des rapports Fe/Ca, K/Al, K/Ca et Fe/Ca a servi à évaluer les apports fluviaux. Il est important de noter que de nombreux facteurs influent sur la répartition des éléments chimiques dans les sédiments marins, notamment les caractéristiques géologiques, la topographie des bassins hydrographiques des rivières et les processus diagénétiques.

Les données résultant de l'utilisation de ces éléments chimiques se sont révélées précieuses pour l'analyse paléoclimatique. Les rapports Fe/Ca, K/Ca, Ti/Al et Si/Al ont fourni des informations essentielles pour reconstituer la variabilité paléoclimatique et paléoenvironnementale au Sud-Ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années.

L'examen de la carotte sédimentaire marine GeoB8601-3, située au Sud-Ouest du Maroc, a révélé une augmentation significative de la vitesse de sédimentation et de l'intensité des éléments Fe, K, Al, Fe/Ca et K/Ca sur une période allant d'environ 1191 à 1034 BP. Ces résultats suggèrent une augmentation du dépôt de matériel terrestre dans cette région, principalement en raison de l'augmentation des apports fluviaux. Les valeurs élevées des apports fluviaux se maintiennent depuis environ 1191 BP jusqu'à nos jours. Cette augmentation abrupte des apports fluviaux dans la région de GeoB8601-3 peut être attribuée à des facteurs climatiques, tels que l'augmentation des précipitations et/ou du ruissellement.

En outre, nous avons identifié deux périodes distinctes au cours des 2000 dernières années. Avant environ 1191 BP, les valeurs des rapports Fe/Ca, K/Ca, ainsi que les rapports Ti/Al et Si/Al, présentaient une corrélation négative, indiquant que les changements dans les apports terrigènes pendant cette période étaient principalement dus au climat. Après environ 1191 BP, une augmentation nette des apports fluviaux (Fe/Ca et K/Ca) s'est produite, probablement en lien avec une période de climat plus humide.

Enfin, grâce à la reconstitution des températures de surface de la mer (SST) à partir de la carotte GeoB8601-3, nous avons pu identifier les principales phases climatiques marquantes de cette période. Nous avons observé une augmentation significative des températures entre environ 2112 et 1681 ans BP, ainsi qu'entre environ 1191 et 233 ans BP, suivies de températures relativement plus froides depuis environ 165 ans BP jusqu'à aujourd'hui.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

À la fin de cette étude, il convient de rappeler que notre recherche était centrée sur le Sud-Ouest du Maroc, composé de deux zones distinctes : une partie continentale comprenant les bassins versants du Tensift et de Souss-Massa, et une partie marine englobant la côte atlantique marocaine entre les latitudes 30°-31°N et longitudes 10°-11°O.

L'objectif principal de notre étude était de caractériser la dynamique de la variabilité climatique actuelle et les changements climatiques passés dans cette région en utilisant une approche multidisciplinaire. Nous avons employé diverses méthodes pour collecter et analyser les données en vue de résoudre la problématique de recherche, qui consistait à confirmer ou réfuter l'existence d'un changement climatique et à évaluer son impact sur le Sud-Ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années. Pour ce faire, nous avons comparé le climat actuel (1968-2015) avec le climat passé en utilisant des enregistrements marins et continentaux.

Cette étude a permis une comparaison approfondie entre les données recueillies en milieu marin et continental afin de mieux comprendre les interactions entre l'océan et la terre dans le Sud-Ouest du Maroc au cours des derniers 2000 ans. Notre analyse de divers paramètres dans cette région nous a apporté une compréhension globale de l'interaction "océan/terre" et de son influence sur le climat local, ainsi que du rôle de l'océan dans la variabilité climatique à différentes échelles de temps. En fin de compte, cette étude vise à fournir des informations essentielles sur l'évolution récente du climat et à reconstituer de manière détaillée les changements climatiques survenus au cours des 2000 dernières années.

Concernant *l'évolution climatique actuelle* dans la région, nous avons constaté une homogénéité des apports climatiques et de leur répartition dans les deux bassins versants. Actuellement, le Sud-Ouest du Maroc connaît un climat principalement aride et semi-aride en raison de la topographie montagneuse (Haut-Atlas et Anti-Atlas), de sa proximité avec l'océan et de sa latitude saharienne. L'analyse statistique des données climatiques sur la période étudiée (1968-2015) a révélé une forte irrégularité des précipitations dans la région. Les précipitations mensuelles moyennes sont plus variables que les précipitations annuelles, et l'année se divise généralement en deux saisons climatiques : une saison sèche d'avril à octobre et une saison humide de novembre à mars, avec des pics de précipitations en décembre et janvier. Par ailleurs, les températures ont tendance à augmenter dans la région, avec des variations mensuelles et des températures estivales élevées, hivernales basses et des températures moyennes extrêmes en juillet (30°C). L'évaluation du bilan hydrique a montré une évapotranspiration potentielle relativement élevée de mai à octobre dans les stations étudiées. En outre, l'analyse des indices de sécheresse a révélé des périodes sèches, avec des années excédentaires entre 1988 et 1998, suivies d'années déficitaires entre 1999 et 2008 dans le bassin versant de Tensift, et entre 1983 et 1993 dans le bassin versant de Souss-Massa. Enfin, la corrélation entre l'indice de sécheresse (SPI) et les trois modes de téléconnexion (NAO, WeMOI et SOI) suggère une influence de ces modes sur le régime pluviométrique dans le Sud-Ouest du Maroc, où la phase positive du mode NAO et WeMOI coïncide souvent avec des déficits pluviométriques.

En ce qui concerne *l'évolution climatique passée*, cette étude nous a permis de retracer l'histoire du climat dans le Sud-Ouest du Maroc au cours des 2000 dernières années. Nous avons analysé des échantillons prélevés par différentes techniques (XRF et ICP) et étudié la distribution des composants géochimiques dans les sédiments continentaux et marins pour faciliter l'interprétation des enregistrements marins. La distribution spatiale de ces composants s'est révélée relativement cohérente, bien que la concentration en éléments majeurs et traces dans les sédiments marins soit influencée par les apports continentaux, qu'ils soient fluviaux ou éoliens, et varie en fonction de la latitude. L'analyse de la carotte sédimentaire GeoB8601-3 prélevée au large du Sud-Ouest du Maroc a permis de reconstituer l'histoire climatique de la région sur les 2000 dernières années. Les éléments chimiques qui se sont avérés particulièrement utiles pour caractériser le climat passé sont le potassium (K), le fer (Fe), l'aluminium (Al), le calcium (Ca), le titane (Ti) et le silicium (Si). De plus, les rapports entre ces éléments, tels que le Ti/Al et le Si/Al en tant que traceurs des apports de poussières éoliennes, ainsi que le Fe/Ca, le K/Ca et le Fe/Ca en tant qu'indicateurs des apports fluviaux, ont été utilisés pour interpréter les changements dans les apports sédimentaires. Nos résultats ont révélé une augmentation significative de la vitesse de sédimentation ainsi que de l'intensité des éléments K, Fe, Fe/Ca et K/Ca sur une période allant d'environ 1191 à 1034 BP, indiquant une augmentation du dépôt de matériel terrestre dans la région. Les analyses géochimiques des sédiments marins au cours des 2000 dernières années ont suggéré une augmentation des apports terrestres en raison de l'augmentation des apports fluviaux, qui persistent jusqu'à nos jours. Cette augmentation brusque des apports fluviaux dans la région de GeoB8601-3 peut être attribuée à des facteurs climatiques, tels que l'augmentation des précipitations et/ou du ruissellement. Nous interprétons également cet apport fluvial comme une conséquence de l'augmentation de l'érosion terrestre.

Les résultats obtenus dans cette étude ont été complétés par des enregistrements de pollen et de micro-charbon. Les enregistrements « XRF » et de pollen indiquent un changement notable autour de 1191 ans BP. Avant 1191 ans BP, les valeurs plus élevées de Si/Al, Ti/Al et les valeurs plus faibles de K/Ca et Fe/Ca, suggèrent un apport éolien plus élevé et un apport fluvial plus faible. De plus, la végétation était caractérisée par des occurrences relativement plus élevées de Pinus, Pistacia et Ephedra accompagnés d'une fréquence de feu plus élevée, et cela pourrait provenir de conditions relativement arides, entraînant un plus grand nombre de feux. Après 1191 ans BP, les occurrences d'Argania spinosa et d'Artemisia ont commencé à augmenter parallèlement à un déclin du Pinus, du Pistacia et du type Ephedra fragiles. La diminution de Si/Al et Ti/Al avec une tendance à la baisse de Pinus et une forte augmentation de K/Ca et Fe/Ca suggèrent moins d'apport éolien et plus de décharge fluviale. Cette augmentation de l'érosion terrestre peut être attribuée, à l'augmentation de l'habitat et de l'élevage dans le Sud-Ouest du Maroc. Cela modifierait la végétation et augmenterait l'érosion, conduisant à un apport fluvial plus important de matériaux et à une augmentation des flux polliniques.

Au cours des derniers 2000 ans, les changements climatiques et environnementaux peuvent être liés, au fort développement politique et économique du Sud-Ouest du Maroc qui a eu lieu autour de ± 1250 BP, c'est-à-dire, l'époque de l'islamisation. Par ailleurs, cela pourrait suggérer des conditions plus humides, qui pourraient être corrélées à des modes négatifs plus

fréquents de l'oscillation nord-atlantique (NAO), entraînant une fréquence de feu plus faible. D'autre part, l'augmentation d'*Argania spinosa*, accompagnée d'une fréquence de feu plus faible, pourrait aussi indiquer une augmentation des activités humaines, entraînant une réduction du couvert végétal et une érosion ultérieure. Ce qui pourrait nous donner un indice que la gestion humaine est cruciale, pour la protection future et l'exploitation durable des ressources naturelles.

À travers les différents outils quantitatifs et qualitatifs utilisés dans cette thèse, afin de comparer le climat actuel et le climat passé du Sud-Ouest du Maroc, nous concluons que le climat du domaine d'étude est soumis à la désertification, la dégradation des terres, la pression démographique, la diminution des ressources naturelles et à un processus temporel et spatial de changements radicaux, qui tendent à augmenter la température et à baisser l'humidité. Cela fait de l'hypothèse du changement climatique, une réalité quoique, nous ne soyons pas complètement d'accord sur son degré et son impact.

Ce travail constitue une première avancée, dans l'étude du climat actuel et le climat passé au Sud-Ouest du Maroc. Dans ce cadre, les résultats obtenus dans cette étude suggèrent que les écosystèmes et l'environnement terrestre du domaine d'étude ont été dans un état modifié, en raison des changements climatiques et des activités anthropiques. La prédiction de l'impact des changements climatiques futurs, la gestion des bassins versants et des systèmes pastoraux-agricoles doivent tenir compte, de la longue histoire de la végétation dégradée dans cette région.

Au final, le changement climatique et environnemental au Sud-Ouest du Maroc aura inévitablement un impact, sur les différents aspects de la vie et sera une nécessité à invoquer sur tous les plans économiques et pour tous les programmes de développement social avec la contribution réelle de toutes les disciplines scientifiques concernées, afin de s'adapter à ces changements et d'anticiper leurs effets, de manière à ne pas compromettre l'avenir des générations futures et leur devenir. Cette étude, qui est loin d'être complète, constitue une étape majeure, dans la compréhension des réalités actuelles et futures, sur les changements climatiques et leur impact au Sud-Ouest du Maroc. D'autre part, cette étude fournit une autre ligne de preuve, que l'impact humain sous la forme de nouvelles activités agricoles, du pastoralisme et de la déforestation a considérablement modifié l'environnement régional. Ainsi, ces résultats aideront à vérifier et comprendre l'interaction humaine, le climat et l'environnement, y compris la pertinence des stratégies adoptées dans la gestion des territoires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABHSM. (2003). Étude de synthèse des études géophysiques réalisées dans les plaines de Souss et Chtouka. ABHSM.
- ABHT. (2009-2013). Agence du Bassin Hydraulique du Tensift. <http://www.eau-tensift.net/>.
- Agoumi, A., & Debbarh, A. (2005). Ressources en eau et bassins versants du Maroc : 50 ans de développement (1955-2005). IN 50 ANS DE DÉVELOPPEMENTS HUMAINS ET PERSPECTIVES 2025 : CADRE NATUREL, ENVIRONNEMENT ET TERRITOIRES (pp. 9-58).
- AIT BRAHIM, Y., CHENG, H., SIFEDDINE, A., WASSENBURG, J. A., CRUZ, F. W., KHODRI, M., ... BOUCHAOU, L. (2017). SPELEOTHEM RECORDS DECADAL TO MULTIDECADAL HYDROCLIMATE VARIATIONS IN SOUTHWESTERN MOROCCO DURING THE LAST MILLENNIUM. *EARTH PLANET. SCI. LETT.*, 476, 1-10.
- ALBA-SANCHEZ, F., LOPEZ-SAEZ, J. A., NIETO-LUGILDE, D., & SVENNING, J. C. (2015). LONG-TERM CLIMATE FORCINGS TO ASSESS VULNERABILITY IN NORTH AFRICA DRY ARGAN WOODLANDS. *APPL. VEG. SCI.*, 18, 283-296.
- ALEXANDER, L. V., ZHANG, X., PETERSON, T. C., CAESAR, J., GLEASON, B., TANK, A., ... VAZQUEZ-AGUIRRE, J. L. (2006). GLOBAL OBSERVED CHANGES IN DAILY CLIMATE EXTREMES OF TEMPERATURE AND PRECIPITATION. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES AND TEMPERATURE FIELDS, GEOPHYS. RES. LETT.*, 25, 1297-1300.
- ALLEY, R. B. (2004). GISP2 ICE CORE TEMPERATURE AND ACCUMULATION DATA. IN: IGBP PAGES/WORLD DATA CENTER FOR PALEOCLIMATOLOGY DATA CONTRIBUTION SERIES 13.
- AMRAOUI, L. (2013). VARIABILITÉS CLIMATIQUES RÉGIONALES ET CHANGEMENT GLOBAL : CAS DE L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE RÉCENTE AU MAROC, EN MAURITANIE ET LEUR PROCHE OCÉAN, SOUS LA DIRECTION DE JACQUES COMBY. - LYON : UNIVERSITÉ JEAN MOULIN (LYON 3).
- ANCTIL, F., & COULIBALY, P. (2004). WAVELET ANALYSIS OF THE INTERANNUAL VARIABILITY IN SOUTHERN QUÉBEC STREAMFLOW. *JOURNAL OF CLIMATE*, 17(1), 163-173.
- ARCHER, D. E. (1996). AN ATLAS OF THE DISTRIBUTION OF CALCIUM CARBONATE IN SEDIMENTS OF THE DEEP SEA, *GLOBAL BIOGEOCHEM. CYCLES*, 10, 159-174.
- ATILLAH, A. (1993). LES INFLUENCES MARITIMES SUR LE CLIMAT DU MAROC CENTRAL : UNE ANALYSE PAR TÉLÉDÉTECTION SPATIALE. THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITÉ RENNES II, FRANCE, 496 P.
- AZZI, A., & MEDJERAB, A. (2011). CARACTÉRISATION DE LA SÉCHERESSE CLIMATIQUE DANS LE NORD CENTRE DE L'ALGÉRIE : CAS DU BASSIN VERSANT DA LA SOUMMAM, ACTES DU COLLOQUE DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE, ROVERETO, PP. 51-56.
- BALSAM, W. L., & MCCOY, F. W. (1987). ATLANTIC SEDIMENTS: GLACIAL/INTERGLACIAL COMPARISONS, *PALEOCEANOGRAPHY*, 2(5), 531-542, DOI: 10.1029/PA002i005p00531.
- BARBERO, M., BONIN, G., LOISEL, R., & QUEZEL, P. (1990). CHANGES AND DISTURBANCES OF FOREST ECOSYSTEMS CAUSED BY HUMAN ACTIVITIES IN THE WESTERN PART OF THE MEDITERRANEAN BASIN. *VEGETATIO* 87, 151-173.
- BARKER, S., & ELDERFIELD, H. (2002). Foraminiferal calcification response to glacial-interglacial changes in atmospheric CO₂. *Science*, 297(5582), 833-6.
- Barker, S., Greaves, M., & Elderfield, H. (2003). A study of cleaning procedures used for foraminiferal Mg/Ca paleothermometry. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4: 8407.
- Baroni, M. (2006). Étude des anomalies isotopiques du soufre et de l'oxygène dans le sulfate d'origine volcanique enregistré dans les archives glaciaires, Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, p. 172.
- Barton, E.D., Aristegui, J., Tett, P., Canton, M., Garcia-Braun, M., Hernandez-Leon, S., ... Garcia-Weill, L. (1998). The transition zone of the Canary Current upwelling region, *Progress in Oceanography*, vol. 41, pp. 455-504.
- Barton, E.D., Huyer, A., & Smith, R.L. (1977). Temporal variation observed in the hydrographic regime near Cabo Corveiro in the Northwest African upwelling region. *Deep-Sea Res.*, 24, 7-23.
- Barton, E.E. (1998). Eastern boundary of the north Atlantic: Northwest Africa and Iberia. Coastal segment (18,e). In: Robinson, A.R., & Brink, K.H. (Eds.), *The Sea: The Global Coastal Ocean*. vol. 11. Wiley, pp. 633-657.
- Benazzouz, S.S., Mordane, A., Orbi, A., Chagdali, M., Hilmi, K., Atillah, A., ... Herv, D. (2014). An improved coastal upwelling index from sea surface temperature using satellite-based approach the case of the canary current upwelling system. *Cont. Shelf Res.* 81.
- Bentov, S., & Erez, J. (2006). Impact of biomineralization processes on the mg content of foraminiferal shells: A biological perspective. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7: Q01P08.
- Benzakour, F., Gaadi, D., & Queffelec, A. (2000). Le français au Maroc : lexique et contacts de langues. Ed. Duculot, 170 p.
- Bergametti, G., Gomes, L., Coude-Gaussen, G., Rognon, P., & Le Coustumer, M.N. (1989). African dust observed over Canary Islands: source-regions identification and transport pattern for some summer situations. *J. Geophys. Res.* 94, 14855-14864.

- Berger, A.L. (1992). Astronomical theory of Paleoclimates and the last glacial-interglacial cycle. *Quaternary Science Reviews*, 11(5), 571-581.
- Bernikov, R. (1991). Synthèse des travaux de recherches océanographiques réalisés le long de la côte atlantique marocaine par « Atlantnro ». Rapport, 24 p.
- Bertrand (2011). Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature* 479, 517-520.
- Bianchi, G.G., & McCave, N. (1999). Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland, *Nature*, 397, 515-517.
- Biscaye, P.E., Kolla, V., & Turekian, K.K. (1976). Distribution of calcium carbonate in surface sediments of the Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 81(15), 2595-2603.
- Bleil (2004). Report and Preliminary Results of Meteor Cruise M 58/2: Las Palmas-Las Palmas (Canary Islands, Spain), 15.05.-08.06. 2003. *Geowissenschaften, Universitat Bremen, bremen. Fachbereich 5*.
- Bond (2001). Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate during the Holocene, *Science*, 294, 2130-2136.
- Boudhar, A. (2009). Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des oueds du haut atlas de Marrakech.
- Boudhar, A., Benoît, D., Hanich, L., Chaponnière, A., & Maisongrande, P. (2007). Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut Atlas marocain à partir des données SPOTVEGETATION [Article] // *Sécheresse : Vol. 18*.
- Boyle, E.A. (1981). Cadmium, zinc, copper, and barium in foraminifer a tests. *Earth and Planetary Science Letters* 53, 11-35.
- Boyle, E.A. (1983). Chemical accumulation variations under the Peru Current during the past 130,000 years, *J. Geophys. Res.*, 88, 7667-7680.
- Boyle, E.A., & Keigwin, L.D. (1985). Comparison of Atlantic and Pacific paleochemical records for the last 215,000 years - Changes in deep ocean circulation and chemical inventories. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 76, 135-150.
- Brenner, I.B., & Zander, A.T. (2000). Axially and radially viewed inductively coupled plasmas, a critical review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 55(8), 1195-1240.
- Bronk Ramsey, C. (2001). Development of the radiocarbon calibration program. *Radiocarbon* 43, 355e363.
- Brown, S.J., & Elderfield, H. (1996). Variations in Mg/Ca and Sr/Ca ratios of planktonic foraminifera caused by postdepositional dissolution: Evidence of shallow Mg-dependent dissolution. *Paleoceanography*, 11(5), 543.
- Brunet (2001). The variations and trends of the surface air temperature in the Northeastern of Spain from middle nineteenth century onwards, In Brunet, M., López, D. (Eds.): *Detecting and modelling regional climate change*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp 81-93.
- Bryan, K. (1962). Measurements of meridional heat-transport by ocean currents. *J. Geophys. Res.*, 67, (9), pp. 3403-3414.
- Budyko, M.I. (1984). The effect of volcanic eruptions on climate. *Meteorologîa I gidrologîa*, no3, pp. 5-11.
- Calvert (2007). Evidence from nitrogen isotope ratios for enhanced productivity during formation of eastern Mediterranean sapropels. *Nature* 359: 223-225.
- Caquineau, S., Gaudichet, A., Gomes, L., Magonthier, M.C., & Chatenet, B. (1998). Saharan dust: clay ratio as a relevant tracer to assess the origin of soil-derived aerosols. *Geophys. Res. Lett.* 25, 983-986.
- Caroli, E. (1999). Analyse numérique de la morphologie des marges continentales et implication de l'évolution du niveau marin sur l'immersion des plates formes continentales est-africaines. *École Normale Supérieure de Lyon*.
- Castañeda (2010). Millenia-scale sea surface temperature changes in the eastern Mediterranean (Nile River Delta region) over the last 27,000 years, *PALEOCEANOGRAPHY, VOL. 25, PA1208, 1*.
- Castelao, R., & Barth, J. (2006). The relative importance of wind strength and along-shelf bathymetric variations on the separation of a coastal upwelling jet. *J.Phys. Oceanogr*, vol. 36, pp. 412-425.
- Charrouf, Z., & Guillaume, D. (1999). Ethnoeconomical, ethnomedical, and phyto-chemical study of *Argania spinosa* (L.) skeels: a review. *Journal of Ethnopharmacology* 67, 7-14.
- Cheddadi, R., Lamb, H.F., Guiot, J., & van der Kaars, S. (1998). Holocene climatic change in Morocco: a quantitative reconstruction from pollen data. *Climate Dynamics* 14, 883-890.
- Chester, R., & Johnson, L.R. (1971). Atmospheric dusts collected off the West African coast. *Nature* 229, 105-107.
- Chester, R., Elderfield, H., Griffin, J.J., Johnson, L.R., & Padgham, R.C. (1972). Eolian dust along the eastern margins of the Atlantic Ocean. *Mar. Geol.* 13, 91-105.
- Chester, R., Griffiths, A.G., & Hirst, J.M. (1979). The influence of soil-sized atmospheric particulates on the elemental chemistry of the deep-sea sediments of the northeastern Atlantic. *Mar. Geol.* 32, 141-154.
- Chiessi, C. M., Mulitza, S., Pätzold, J., & Wefer, G. (2010). How different proxies record precipitation variability over southeastern South America. *IOP Conference Series*, 9(1), 012007.
- Christensen, J. H., & Christensen, O. B. (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climate Change*, 81, 7-30.

- Christensen, T. (2007). Regional Climate Projections-Climat Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. ISBN: 978-0521-70596-7.
- Clift, P. D., Hodges, K., Heslop, D., Hannigan, R., Hoang, L. V., & Calves, G. (2008). Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity. *Nature Geoscience*, 1, 875-880.
- Cole, J. M., Goldstein, S. L., deMenocal, P. B., Hemming, S. R., & Grousset, F. E. (2009). Contrasting compositions of Saharan dust in the eastern Atlantic Ocean during the last deglaciation and African Humid Period. *Earth and Planetary Science Letters*, 278, 257-266.
- Collins, M. J. (2009). Evidence for Changing Flood Risk in New England Since the Late 20th Century. *Journal of the American Water Resources Association*, 45(2), 279-290.
- Colombo, A. F., Etkin, D., & Karney, B. W. (1999). Climate Variability and the Frequency of Extreme Temperature Events for Nine Sites across Canada: Implications for Power Usage. *Journal of Climate*, 12, 2490-2502.
- Coste, B., & Minas, H. J. (1982). Analyse des facteurs régissant la distribution des sels nutritifs dans la zone de remontée d'eau des côtes mauritaniennes. *Oceanologica Acta*, 5(3), 315-324.
- CSEC (2001). Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat- plan directeur pour le développement des ressources en eau des bassins du Souss-Massa. Agadir 21-22 juin 2001, 9ème Session.
- Cubasch, U., von Storch, H., Waszkewitz, J., & Zorith, E. (1996). Estimates of climate change in southern Europe derived from dynamical climate model output. *Climate Research*, 7, 129-149.
- Culmsee, H. (2004). Vegetation und Weidenutzung im Westlichen Hohen Atlas (Marokko). MSc Thesis, Cramer-Borntraeger, Stuttgart.
- Cury, P., & Roy, C. (1987). Migration saisonnière du thiof (*Epinephelus aeneus*) au Sénégal : influence des upwellings sénégalais et mauritaniens. *Oceanologica Acta*, 11(1), 32-33.
- DARE. C.C (2011). Guide d'intégration de l'adaptation dans les Plans de Développement Communaux. 1215186-03 IDID NGO Project. 17p.
- Davenport, R., Neuer, S., Hernández-Guerra, A., Rueda, M.J., Llinas, O., Fischer, G., & Wefer, G. (1999). Seasonal and interannual pigment concentration in the Canary Islands region from CZCS data and comparison with observations from the ESTOC. *International Journal of Remote Sensing*, 20(7), 1419-1433.
- Davis, R. E., Knappenberger, P.C., Michaels, P.J., & Novicoff, W.M. (2003). Changing Heat-Related Mortality in the United States. *Environmental Health Perspectives*, 111, 1712-1718.
- De Deckker, P., Chivas, A.R., & Shelley, J.M.G. (1999). Uptake of Mg and Sr in the euryhaline ostracod *Cyprideis* determined from in vitro experiments. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, 148, 105-116.
- Dearing, J.A., & Jones, R.T. (2003). Coupling temporal and spatial dimensions of global sediment flux through lake and marine sediment records. *Global and Planetary Change*, 39, 147-168.
- DeGaetano, A.T. (1996). Recent Trends in Maximum and Minimum Temperature Threshold Exceedences in the Northeastern United States. *Journal of Climate*, 9, 1646-1660.
- Dekens, P.S., Lea, D.W., Pak, D.K., & Spero, H.J. (2002). Core top calibration of Mg/Ca in tropical foraminifera: Refining paleotemperature estimation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(4), 1022.
- Delworth, et coll. (2016). The North Atlantic Oscillation as a driver of rapid climate change in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, 9, 509-512.
- DeMenocal (2000). Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary Science Reviews*, 19, 347-361.
- Dijon, R. (1968). Contribution à l'étude hydrogéologique et à l'inventaire des ressources en eaux de la vallée du Souss. Thèse d'état, Montpellier. Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc, n°214, 1968, 292 p.
- Direction de la Météorologie Nationale (DMN) (1995). Spécial sécheresse, Bulletin d'information du Centre National du Climat et des Recherches Météorologiques, N° 2.
- Duce, R.A., & Tindale, N.W. (1991). Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 36, 1715-1726.
- Dupont, L.M. (1999). Pollen and spores in marine sediments from the east Atlantic: a view from the ocean into the African continent. In: Fischer, G., Wefer, G. (Eds.), *Use of Proxies in Paleoceanography: examples from the South Atlantic*. Springer, Berlin, pp. 523-546.
- Durski, S.M., & Allen, J.S. (2005). Finite-amplitude evolution of instabilities associated with the coastal upwelling front. *Journal of Physical Oceanography*, vol. 35, pp. 1606-1628.
- Dwyer, G.S., Cronin, T.M., Baker, A., Raymo, M.E., Buzas, J.S., & Corrège, T. (1995). North-Atlantic deep-water temperature change during late Pliocene and late quaternary climatic cycles. *Science*, 270, 1347-1351.
- Dypvik, H., & Harris, N.B. (2001). Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclastics using Th/U, Zr/Rb, and (Zr + Rb)/Sr ratios. *Chemical Geology*, 181, 131-146.

- El Ghachi, M. (2007). La Seille: un système fluvial anthropisé (Lorraine, France). Tome 1. Thèse, Université Paul Verlaine de METZ, France. 344p.
- El Ghachi, M. (2008). La caractérisation de l'impact des interventions humaines sur les cours d'eau: cas de la Seille (France). *Mosella*, tome 30, n° 1- 4.
- El Ghachi, M. (2010). Etiages de 2003 dans un domaine océanique, Méthodologie et Résultats: Le cas de la Seille (Lorraine, France). *Revue Geomaghreb*, n° 6, pp. 45-57.
- El Ghachi, M., & Corbonnois, J. (2004). Evolution du lit de la Seille sous l'influence des actions anthropiques (Lorraine, Bassin de La Moselle). Actes du colloque de l'université de Metz. *Revue Mosella*, tome XXIX-N°3-4.
- El Ghachi, M., & Morchid, F.Z. (2015). Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Khénifra dans un contexte de variabilité climatique. *Journal of Materials and Environmental Science*, Volume 6, N 11, 3346-335.
- El Ghachi, M., Aafir, M., & Bouberria, A. (2011). Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Taza, dans un contexte de variabilité climatique. Publication des actes du colloque, pp. 1-15.
- Elderfield, H., & Ganssen, G. (2000). Past temperature and $\delta^{18}O$ of surface ocean waters inferred from foraminiferal Mg/Ca ratios. *Nature*, 405(6785), 442-445.
- Emberger, L. (1955). Une classification biogéographique des climats. Recueil des travaux des laboratoires de botanique. Géologie et zoologie de la faculté des sciences de Montpellier, 1955, fascic.7, pp. 3-43.
- Erez, J. (2003). The source of ions for biomineralization in foraminifera and their implications for paleoceanographic proxies. *Biomineralization*, 54, 115-149.
- Esper, J., Frank, D., Büntgen, U., Verstege, A., Luterbacher, J., & Xoplaki, E. (2007). Long-term drought severity variations in Morocco. *Geophysical Research Letters*, 34(17).
- Essallami (2007). Hydrological changes in the Mediterranean Sea over the last 30,000 years. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Volume 8, Number 7, p. 3, 4.
- Estrade, P., Marchesiello, P., Colin de Verdière, A., & Roy, C. (2008). Cross-shelf structure of coastal upwelling: a two-dimensional expansion of Ekman's theory and a mechanism for inner shelf upwelling shut down. *Journal of Marine Research*, 66, 589-616.
- Fletcher, W.J., & Hughes, P.D. (2017). Anthropogenic trigger for late Holocene soil erosion in the Jebel Toubkal, high Atlas, Morocco. *Catena*, 149, 713-726.
- Foley, J.A. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309, 570-574.
- Folland, C.K. (2001). Global temperature change and its uncertainties since 1861. *Geophysical Research Letters*, 28, 2621-2624.
- Foucault, A. (2009). Climatologie et Paléoclimatologie. Dunod, Paris, 281, 307 p.
- Foucault, A., & Raoult, J.F. (1980). Dictionnaire de géologie. Editions Masson, Paris. ISBN 2-225-65461-1, ISSN 0338-2672.
- Furnestin, J. (1959). Hydrologie du Maroc atlantique. *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes*, 23(1), 5-77.
- Futterer, D.K. (2000). The solid phase of marine sediments. In: Zabel, M. (Ed.), *Marine Geochemistry*. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 1-22.
- Galán, E., Cañada, R., Fernández, F., & Cervera, B. (2001). Annual temperature evolution in the Southern Plateau of Spain from the construction of regional climatic time series. In Brunet, M., López, D. (Eds.), *Detecting and modelling regional climate change*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 119-131.
- Gao, Y., Fan, S.M., & Sarmiento, J.L. (2003). Aeolian iron input to the ocean through precipitation scavenging: a modeling perspective and its implication for natural iron fertilization in the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 108(D7).
- Gao, Y., Kaufman, Y.J., Tanre, D., Kolber, D., & Falkowski, P.G. (2001). Seasonal distributions of Aeolian Iron Fluxes to the global ocean. *Geophysical Research Letters*, 28(1), 29-32.
- Gooday, A. J. (2003). Benthic foraminifera (Protista) as tools in deep-water palaeoceanography: environmental influences on faunal characteristics. *Advances in Marine Biology*, 46, 1-90.
- Goven, A. (2012). Distribution of major elements in Atlantic surface sediments: imprint of terrigenous input and continental weathering. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13, Q01013.
- Gregory, J. M., & Mitchell, J. F. B. (1997). The climate response to CO₂ of the Hadley Centre coupled AOGCM with and without flux adjustment. *Geophysical Research Letters*, 24, 1943-1946.
- Grousset, F. E. (1998). Saharan wind regimes traced by the Sr-Nd isotopic composition of subtropical Atlantic sediments: Last Glacial Maximum vs today. *Quaternary Science Reviews*, 17, 395-409.
- Guest, C. S., Willson, K., Woodward, A. J., Hennessey, K., Kalkstein, L. S., Skinner, C., & McMichael, A. J. (1999). Climate and Mortality in Australia: Retrospective Study, 1979-1990, and Predicted Impacts in Five Major Cities in 2030. *Climate Research*, 13, 115.

- Haddani, H. (2012). Étude du fonctionnement hydrogéologique des bassins versants de Rhéraya, Ourika et Zat (Tensift_Marrakech, Maroc): Hydrochimie isotopique. Mémoire de fin d'études, Master es Sciences Et Techniques « Eau et Environnement ». FSTG, Marrakech, 111p.
- Hagen, E. (2001). Northwest African upwelling scenario. *Oceanol. Acta*, 24, S113-S127.
- Hagen, E., Zülicke, C., & Feistel, R. (1996). Near-surface structures in the Cape Ghir filament off Morocco. *Oceanologica Acta*, 19(6), 577-598.
- Hansen, J. E., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2013). NASA GISS Surface Temperature (GISTEMP) Analysis. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Holmgren, K. (2003). Persistent millennial-scale climate variability over the past 25,000 years in Southern Africa. *Quat. Sci. Rev.*, 22, 2311-2326.
- Holz, C., Stuut, J. B.W., & Henrich, R. (2004). Terrigenous sedimentation processes along the continental margin off NW Africa: implications from grain-size analysis of seabed sediments. *Sedimentology*, 51, 1145-1154.
- Holz, C., Stuut, J. B.W., Henrich, R., & Meggers, H. (2007). Variability in terrigenous sedimentation processes off northwest Africa and its relation to climate changes: inferences from grain-size distributions of a Holocene marine sediment record. *Sedimentary Geology*, 202, 499-508.
- Hoyt, D.V., & Schatten, K. (1998). Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction. *Solar Physics*, 179, 189-219.
- Huang, S.P., Pollack, H.N., & Shen, P.Y. (1997). Late Quaternary temperature changes seen in the world-wide continental heat flow measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1947-1950.
- Hurrell, J. W., & Van Loon, H. (1997). Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. In *Climatic Change at High Elevation Sites* (pp. 69-94). Springer Netherlands.
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., & Visbeck, M. (2003). An overview of the North Atlantic oscillation. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 134, 1-36.
- Huvelin, P. (1973). Mouvements pré-atlasiques et récents dans les Jbilet et sur leurs pourtours. *Notes du Service Géologique du Maroc*, t.33, N°249, pp. 83-123.
- IPCC. (1995). *Climate change. Synthesis Report of the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.
- IPCC. (2012). *Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2013). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Itambi, A. C., von Dobeneck, T., & Adegbe, A. T. (2010). Millennial-scale precipitation changes over Central Africa during the late Quaternary and Holocene: Evidence in sediments from the Gulf of Guinea. *J. Quat. Sci.*, 25(3), 267-279.
- Izuka, S.K. (1988). Relationship of magnesium and other minor elements in tests of *Cassidulina subglobosa* and *Cassidulina oriangulata* to physical oceanic properties. *Journal of Foraminiferal Research*, 18, 151-157.
- Jacobeit, J. (2000). *Rezente Klimaentwicklung im Mittelmeerraum*. Petermanns Geogr. Mittl., 144, 22-33. (En allemand).
- Jansen, J. H. F., Van der Gaast, S. J., Koster, B., & Vaars, A. J. (1998). CORTEX, a shipboard XRF-scanner for element analyses in split sediment cores. *Mar. Geol.*, 151(1-4), 143-153.
- JICA. (2007). *Étude de plan de gestion intégrée des ressources en eau dans le plaine du Haouz [Rapport] / Agence japonaise de coopération internationale*. - Japon: JICA, MATEE, ABHT.
- Jickells, T.D. (2005). Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 308, 67-71.
- Johnson, J., & Stevens, I. (2000). A fine resolution model of the eastern North Atlantic between the Azores, the Canary Islands and the Gibraltar Strait. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 47(5), 875-899.
- Jorissen, F.J., Fontanier, C., & Thomas, E. (2007). Chapter seven paleoceanographical proxies based on deep-sea benthic foraminiferal assemblage characteristics. *Developments in Marine Geology*, 1, 263-325.
- Kaplan, J.O. (2003). Climate change and Arctic ecosystems: 2. Modeling, paleodatamodel comparisons, and future projections. *J. Geophys. Res.*, 108, doi: 10.1029/2002JD002559.
- Kaplan, M.R., & Wolfe, A.P. (2006). Spatial and temporal variability of Holocene temperature in the North Atlantic region. *Quat. Res.*, 65, 223-231.
- Karrouk, M.S. (2003). *Dynamique des climats du Maroc*. Thèse de doctorat d'état. Université Ben M'Sick - Casablanca (Maroc), 332 p.

- Kattenberg, A., Giorgi, F., Grassl, H., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., Tokioka, T., Weaver, A.J., & Wigley, T.M.L. (1996). Climate models - projections of future climate. In: *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 289-357.
- Katz, M.E., Cramer, B.S., Franzese, A., Hönisch, B., Miller, K.G., & Rosenthal, Y. (2010). Traditional and emerging geochemical proxies in foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, 40, 165-192.
- Killingley, J.S., Johnson, R.F., & Berger, W.H. (1981). Oxygen and carbon isotopes of individual shells of planktonic foraminifera from Ontong-Java Plateau, equatorial Pacific. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 33, 193-204.
- Kim, J.H., Meggers, H., Rimbu, N., Lohmann, G., Freudenthal, T., Müller, P.J., & Schneider, R.R. (2007). Impacts of the north atlantic gyre circulation on Holocene climate off northwest Africa. *Geology*, 35, 387e390.
- Klein Tank, A.M.G., & Können, G.P. (2003). Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946-1999. *Journal of Climate*, 16, 3665-3680.
- Knippertz, P., Christoph, M., & Speth, P. (2003). Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 83, 67-88.
- Koopmann, B. (1981). Sedimentation von Saharastaub im subtropischen Nordatlantik während der letzten 25.000 Jahre. *Meteorol. Forschungsergebnisse*, 35, P.23-59.
- Kucuk, M., Kahya, E., Cengiz, T.M., & Karaca, M. (2009). North Atlantic Oscillation influences on Turkish lake levels. *Hydrological Processes*, 23(6), 893.
- Kuhlmann, H., Freudenthal, T., Helmke, P., & Meggers, H. (2004). Reconstruction of paleoceanography off NW Africa during the last 40,000 years: influence of local and regional factors on sediment accumulation. *Mar. Geol.*, 207, 209-224.
- Kuhlmann, H., Meggers, H., Freudenthal, T., & Wefer, G. (2004). The transition of the monsoonal and the N Atlantic climate system off NW Africa during the Holocene. *Geophys. Res. Lett.*, 31, n/a-n/a.
- Kum, L.R., Brantley, S.L., & Arthur, M.A. (2000). Chemical weathering, atmospheric CO₂, and climate, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28, 611-667.
- Kunkel, K.E., Pielke, R.A., & Changnon, S.A. (1999). Temporal Fluctuations in Weather and Climate Extremes that Cause Economic and Human Health Impacts: A Review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 1077-1098.
- Kuss, J., & Kremling, K. (1999). Spatial variability of particle associated trace elements in near-surface waters of the North Atlantic, derived by large volume sampling. *Mar. Chem.*, 68, 71-86.
- Labat, D. (2010). Cross wavelet analyses of annual continental freshwater discharge and selected climate indices. *Journal of Hydrology*, 385(1), 269-278.
- Lamb, H.F., Dambon, F., & Maxted, R.W. (1991). Human impact on the vegetation of the Middle Atlas, Morocco, during the last 5000 years. *Journal of Biogeography*, 18, 519-532.
- Lea, D.W. (2004). Elemental and isotopic proxies of past ocean temperatures. In: *The oceans and marine geochemistry: Treatise on Geochemistry*, Vol. 6. Oxford, Elsevier-Pergamon, 365-390.
- Lea, D.W., Martin, P.A., Pak, D.K., & Spero, H.J. (2002). Reconstructing a 350 ky history of sea level using planktonic Mg/Ca and oxygen isotope records from a Cocos Ridge core. *Quaternary Science Review*, 21, 283-293.
- Lean, J., Beer, J., & Bradley, R. (1995). Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate. *Geophysical Research Letters*, 22, 3195-3198.
- Lear, C.H., Rosenthal, Y., & Slowey, N. (2002). Benthic foraminiferal Mg/Ca- paleothermometry: A revised core-top calibration. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66, 3375- 3387.
- Lebourgeois, F., & Piedallu, C. (2005). Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière ? Notion d'indices bioclimatiques, méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. *Revue forestière Française*, LVII, volume 4/2005, p331-356.
- Lohmann, G. P. (1995). A model for variation in the chemistry of planktonic foraminifera due to secondary calcification and selective dissolution. *Paleoceanography*, 10(3), 445-457.
- Lorenz, S. J. (2006). Orbitally driven insolation forcing on Holocene climate trends: evidence from alkenone data and climate modeling. *Paleoceanography*, 21.
- Luck, M., Landis, M., & Gassert, F. (2015). Aqueduct Water Stress Projections: Decadal Projections of Water Supply and Demand Using CMIP5 GCMs. Technical note. Washington, DC: World Resources Institute.
- MacDonald, G. M. (2000). Holocene treeline history and climate change across northern Eurasia. *Quat. Res.*, 53, 302-311.
- Mahowald, N. M. (2006). Change in atmospheric mineral aerosols in response to climate: Last glacial period, preindustrial, modern, and doubled carbon dioxide climates. *J. Geophys. Res.*, 111(D10), D10202.

- Makaoui, A., Orbi, A., Hilmi, K., Zizah, S., Larissi, J., & Talbi, M. (2005). L'upwelling de la côte atlantique du Maroc entre 1994 et 1998. *C.R. Geoscience*, 337, 1518-1524.
- Marchal, O. (2002). Apparent long-term cooling of the sea surface in the northeast Atlantic and Mediterranean during the Holocene. *Quat. Sci. Rev.*, 21(4-6), 455-483.
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M., & Valverde, M. C. (2009). Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate model system. *International Journal of Climatology*, 29, 2241-2255.
- Martin, P. A., Lea, D. W., Rosenthal, Y., Shackleton, N. J., Sarnthein, M., & Papenfuss, T. (2002). Quaternary deep sea temperature histories derived from benthic foraminiferal Mg/Ca. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198, 193-209.
- Martinez, N. C., Murray, R. W., Dickens, G. R., & Kolling, M. (2009). Discrimination of sources of terrigenous sediment deposited to the Central Arctic Ocean through the Cenozoic. *Paleoceanography*, 24, PA1210.
- Martinez-R. F., Kastner, M., Gallego-Torres, D., Rodrigo-Gamiz, M., Nieto-Moreno, V., & Ortega-Huertas, M. (2015). Paleoclimate and paleoceanography over the past 20,000 yr in the Mediterranean Sea Basins as indicated by sediment elemental proxies. *Quaternary Science Reviews*, 107, 25-46.
- Martrat. (2004). Abrupt Temperature Changes in the Western Mediterranean over the Past 250,000 Years. *Science*, 306, 1762.
- Mashiotta, T. A., Lea, D. W., & Spero, H. J. (1999). Glacial-interglacial changes in Subantarctic sea surface temperature and $\delta^{18}\text{O}$ -water using foraminiferal Mg. *Earth and Planetary Science Letters*, 170, 417-432.
- Masque, P., Sanchez-Cabeza, J. A., Bruach, J. M., Palacios, E., & Canals, M. (2002). Balance and residence times of (210)Pb and (210)Po in surface waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Cont. Shelf Res.*, 22, 2127e2146.
- Massei, N., Durand, A., Deloffre, J., Dupont, J. P., Valdes, D., & Laignel, B. (2007). Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in northwestern France over the past 35 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 112(D9).
- Massei, N., Laignel, B., Deloffre, J., Mesquita, J., Motelay, A., Lafite, R., & Durand, A. (2009). Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950-2008. *International journal of climatology*, 30(14), 2146-2154.
- Masson, V. (2000). Holocene climate variability in Antarctica based on 11 ice cores isotopic records. *Quat. Res.*, 54, 348-358.
- Masson-Delmotte, V. (2005). GRIP deuterium excess reveals rapid and orbital-scale changes in Greenland moisture origin. *Science*, 309(5731), 118-121.
- Math. (1998). Déclaration du ministre de l'aménagement du territoire de l'environnement et de l'habitat. Le matin du Sahara et du Maghreb, 19 Novembre 1998.
- Mateille, T., Tavoillot, J., Martiny, B., Dmowska, E., Winiszewska, G., Ferji, Z., ... & El Mousadik, A. (2016). Aridity or low temperatures: what affects the diversity of plant-parasitic nematode communities in the Moroccan argan relic forest? *Appl. Soil Ecol.*, 101, 64e71.
- Mathien-Blard, E., & Bassinot, F. (2009). Salinity bias on the foraminifera Mg/Ca thermometry: Correction procedure and implications for past ocean hydrographic reconstructions. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10(12).
- Mathieu, R., Bellier, J. P., & Granier, B. (2011). Manuel de Micropaléontologie. *Carnets de Géologie/Notebooks on Geology*, 123 pp.
- Maxime, D. (2008). Caractérisation de la variabilité climatique Holocène à partir de séries continentales, marines et glaciaires. *Climatologie*. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2008. Français.
- McEvedy, C., & Jones, R. (1978). *Atlas of World Population History*. Penguin Books Ltd., London.
- McGregor, H. V., Dima, M., Fischer, H. W., & Mulitza, S. (2007). Rapid 20th-Century increase in coastal upwelling off northwest Africa. *Science*, 315, 637-639.
- McGregor, H. V., Dupont, L., Stuut, J. B.W., & Kuhlmann, H. (2009). Vegetation change, goats, and religion: a 2000-year history of land use in southern Morocco. *Quat. Sci. Rev.*, 28, 1434e1448.
- Mebarki, A. (2005). Hydrologie des bassins de l'Est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat d'état. Université Mentouri de Constantine. 360p.
- Meehl, G. A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T. R., Mearns, L. O., & Whetton, P. (2000). Trends in Extreme Weather and Climate Events: Issues Related to Modeling Extremes in Projections of Future Climate Change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 427-436.
- Metaxas, D. A., Bartzokas, A., & Vitsas, A. (1991). Temperature fluctuations in the Mediterranean area during the last 120 years. *International Journal of Climatology*, 11, 897-908.
- Metcalf, B., Feldmeijer, W., Vringer-Picon, M., Brummer, G. J. A., Peeters, F. J. C., & Ganssen, G. M. (2015). Late Pleistocene glacial-interglacial shell-size-isotope variability in planktonic foraminifera as a function of local hydrography. *Biogeosciences*, 12, 4781-4807.
- Mikesell, M. W. (1960). Deforestation in northern Morocco. *Science*, 132, 441-448.

- Miller, J. R., & Russell, G. L. (1992). The impact of global warming on river runoff, *J. Geophys. Res.*, 97(D3), 2757-2764.
- Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. M. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *J. Geol.*, 100(5), 525-544.
- Milliman, J. D., Farnsworth, K. L., Jones, P. D., Xu, K. H., & Smith, L. C. (2008). Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000. *Global Planet. Change*, 62(3-4), 187-194.
- Mitchell, J. F. B., Davis, R. A., Ingram, W. J., & Senior, C. A. (1995). On surface temperatures, greenhouse gases and aerosols: models and observations. *Journal of Climate*, 10, 2364-2386.
- Mittelstaedt, E. (1983). The upwelling area off northwest Africa - a description of phenomena related to coastal upwelling. *Progress in Oceanography*, 12, 307-331.
- Moberg, A., Sonechkin, D.M., Holmgren, K., Datsenko, N.M., & Karlen, W. (2005). Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433, 613-617.
- Moreno, A., Targarona, J., Henderiks, J., Canals, M., Freudenthal, T., & Meggers, H. (2002). Orbital forcing of dust supply to the North Canary Basin over the last 250 kyrs. *Quaternary Science Reviews*, 20, 1327-1339.
- Moujane, A., Bentamy, A., Chagdali, M., & Mordane, S. (2011). Analysis of high spatial and temporal surface winds from Aladin model and from remotely sensed data over the Canarian upwelling region. *Revue Télédétection*, 10(1), 11-22.
- Moukhchane, M. (1983). Contribution à l'étude des réservoirs profonds de la bordure nord de l'Atlas entre Demnate et Imintanoute (Maroc). Thèse de doctorat, Besançon. 119p.
- Myrberg, K., Andrejev, O., & Lehmann, A. (2010). Dynamic features of successive upwelling events in the Baltic Sea – a numerical case study. *Oceanologia*, vol. 52-1, pp. 77-99.
- Navarro-Pérez, E., & Barton, E.D. (2001). Seasonal and interannual variability of the Canary Current. *Scientia Marina*, vol. 65, pp. 205-213.
- Nesbitt, H.W. (1980). Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 1659-1666.
- Nesbitt, H.W., & Markovics, G. (1997). Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 1653-1670.
- New, M., Todd, M., Hulme, M., & Jones, P. (2001). Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 21, 1899-1922.
- New, M.G., Hulme, M., & Jones, P.D. (2000). Representing twentieth-century space-time climate fields. Part II: Developments of a 1901-1996 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, 13, 2217-2238.
- Niasse, M., Afouda, A., & Amani, A. (2004). Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification: Éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. UICN, Gland (Suisse) et Cambridge (Royaume-Uni), 71 p.
- Nicholls, N., Gruza, G.V., Jouzel, J., Karl, T.R., Ogallo, L.A., & Parker, D.E. (1996). Observed climate variability and change. In: Houghton, J.T. et al. (eds) *Climate change 1995: the science of climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp133-192.
- Nicholls, N., Gruza, G.V., Jouzel, J., Karl, T.R., Ogallo, L.A., & Parker, D.E. (1999). Observe climate variability and Northern hemisphere. *Mon. Weather Rev.*, 112.
- Nicholson, S.E. (2000). The nature of rainfall variability over Africa on time scales of decades to millennia. *Global Planet. Change*, 26, 137-158.
- Nieto-Moreno, V., Martinez-Ruiz, F., Giralt, S., Jimenez-Espejo, F., Gallego-Torres, D., Rodrigo-Gamiz, M., García-Orellana, J., Ortega-Huertas, M., & Lange, G.J. (2011). Tracking climate variability in the western Mediterranean during the Late Holocene: a multiproxy approach. *Clim. Past*, 7, 1395e1414.
- Nijenhuis, I.A., Becker, J., & De Lange, G.J. (2001). Geochemistry of coeval marine sediments in Mediterranean ODP cores and a land section: implications for sapropel formation models. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 165, 97e112.
- Nouaceur, Z. (1999). Évolution récente des lithométéores en Mauritanie. Thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon III, 503 p.
- Nykjaer, L., & Van Camp, L. (1994). Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991. *J. Geophys. Res.*, 99, C7, doi: 10.1029/94JC00814.
- Nykjaer, L., & Van Camp, L. (1994). Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991. *J. Geophys. Res.*, 99, C7, doi: 10.1029/94JC00814.
- Olsen, J., Anderson, N.J., & Knudsen, M.F. (2012). Variability of the north atlantic oscillation over the past 5,200 years. *Nat. Geosci.*, 5, 808.

- Orbi, A., Hilmi, K., Larissi, J., Zidane, H., Zizah, S., El Moussaoui, N., Lakhdar, J.I., & Sarf, F. (1998). Hydrologie et hydrodynamique des côtes marocaines: milieux paraliques et zones côtières. Commissariat Général, EXPO'98, Lisbonne, 68 p.
- ORSTOM Hydrologie du bassin de Tensift (1976): Rabat ORSTOM Fanas Documentaire, [Report]. - 33630.
- LOUDIN, L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 495p.
- Palutikof, J.P., Guo, X., Wigley, T.M.L., & Gregory, J.M. (1992). Regional Changes in Climate in the Mediterranean Basin Due to Global Greenhouse Gas Warming. MAP Technical Report Series. Athens: UNEP.
- Palutikof, J.P., Trigo, R.M., & Adcock, S.T. (1996). Scenarios of rainfall over the Mediterranean: is the region drying. In the International Conference on Mediterranean Desertification, 29 October-01 November 1996, Crete Greece. Available from: Climate Research Unit, UEA, Norwich, UK.
- Parish, R., & Funnell, D.C. (1999). Climate change in mountain regions: some possible consequences in the Moroccan High Atlas. *Global Environmental Change*, 9, 45-58.
- Pauling, A., Luterbacher, J., Casty, C., & Wanner, H. (2006). Five hundred years of gridded high-resolution precipitation reconstructions over Europe and the connection to large-scale circulation. *Climate Dynamics*, 26, 387-405.
- Pelegri, J.J. (2005). Coupling between the open ocean and the coastal upwelling region off northwest Africa: water recirculation and offshore pumping of organic matter. *J. Mar. Syst.*, 54.
- Peltier, J.C (1982): La végétation du bassin versant de l'oued Souss, Maroc. Thèse d'état es-science, univ. scient. & médicale, Grenoble. 201 p.
- Peltier, J.C (1982): La végétation du bassin versant de l'oued Souss, Maroc. Thèse d'état es-science, univ. scient. & médicale, Grenoble. 201 p.
- Petschick, R., Kuhn, G., Gingele, F. (1996): Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography. *Mar. Geol.* 130, 203-229.
- Pettitt, A.N (1979): A non-parametric approach to the change-point problem, *Applied Statistics*, Volume 28(2), pp. 126-135.
- Peucker-Ehrenbrink, B. (2009): Land2Sea database of river drainage basin sizes, annual water discharges, and suspended sediment fluxes, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q06014.
- Piedallu, C., Gégout, J.C (2007): Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modeling. *Ann. For. Sci.* 64, 899-909.
- Plewa, K., Meggers, H., Kuhlmann, H., Freudenthal, T., Zabel, M., Kasten, S. (2012): Geochemical distribution patterns as indicators for productivity and terrigenous input off NW Africa. *Deep-Sea Research I* 66, 51-6.
- Plummer, N., Salinger, M. J., Nicholls, N., Suppiah, R., Hennessey, K. J., Leighton, R. M., Trewin, B., Page, C. M., Lough, J. M. (1999): Changes in Climate Extremes over the Australian Region and New Zealand during the Twentieth Century. *Climatic Change* 42:183-202.
- PNUD (2007): Rapport mondial sur le développement humain 2007-2008, la lutte contre le changement climatique : un impératif de solidarité humaine dans un monde divisé, 382p.
- Poole, R., Tomczak, M. (1999): Optimum multiparameter analysis of the water mass structure in the Atlantic Ocean thermocline. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 46 (11), 1895-1925.
- Prentice, I.C., Webb, T. (1998): BIOME 6000: reconstructing global mid-Holocene vegetation patterns from paleoecological records. *J. Biogeogr.*, 25 (6), 997-1005.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., Gill, T. E. (2002): Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Rev. Geophys.*, 40(1), 1002.
- Ravelo, A.C., Fairbanks, R.G. (1995): Carbon isotopic fractionation in multiple species of planktonic foraminifera from core-tops in the Tropical Atlantic. *Journal of Foraminiferal Research* 25, 53-74.
- Rea, D. K. (1994): the paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind, *Rev. Geophys.*, 32(2), 159-195.
- Renssen, H. (2005): Simulating the Holocene climate evolution at northern high latitudes using a coupled atmosphere-sea ice-ocean vegetation model. *Clim. Dyn.*, 24(1), 23-43.
- Repapis, C. C., Philandras, C. M. (1988): A note on the air temperature trends of the last 100 years as evidenced in the eastern Mediterranean time series. *Theoretical and Applied Climatology* 39: 93-107.
- Revel (2015): 100,000 Years of African monsoon variability recorded in sediments of the Nile margin, *Quaternary Science Reviews* 29 - 1342-1362.
- Rodrigo-Gamiz, M., Martinez-Ruiz, F., Jimenez-Espejo, F.J., Gallego-Torres, D., Nieto-Moreno, V., Romero, O., Ariztegui, D. (2011): Impact of climate variability in the western Mediterranean during the last 20,000 years: oceanic and atmospheric responses. *Quat. Sci. Rev.* 30, 2018e2034.

- Rognon. P (1996): Sécheresse et aridité: Leur impact sur la désertification au Maghreb, *Sécheresse*, Volume 7, pp. 287-297.
- Rohling (2002): Holocene atmosphere-ocean interactions: records from Greenland and the Aegean Sea, *Climate Dynamics* 18: 587-593.
- Rosenthal. Y (2004): Interlaboratory comparison study of Mg/Ca and Sr/Ca measurements in planktonic foraminifera for paleoceanographic research. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5(4): Q04D09.
- Rosenthal. Y, Lohmann. G. P, Lohmann. K. C, Sherrell. R. M (2000): Incorporation and Preservation of Mg in *Gs. sacculifer*: Implications for reconstructing sea surface temperatures and the oxygen isotopic composition of seawater. *Paleoceanography*, 15, 135-145.
- Rosenzweig. C, Tubiello. F.N (1997): Impacts of global climate change on Mediterranean agriculture: Current methodologies and future directions: An introductory essay. *Mitig. Adapt. Strategies Global Change* 1: 219-232.
- Roy. C (1992): Réponse des stocks de poissons à la dynamique des upwellings en Afrique de l'ouest : analyse et modélisation. Thèse de doctorat, Université de Brest, 146 p.
- Ruddiman. W. F, Janecek. T. R (1989): Pliocene-Pleistocene biogenic and terrigenous fluxes at equatorial Atlantic sites 662, 663, and 664, *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results*, 108, 211-240.
- Sagan. C, Toon. O. B, Pollack. J. B (1979): Anthropogenic Albedo Changes and the Earth's Climate. *Science* 206: 1363-1368.
- Saidi. M. E (1995): Contribution à l'hydrologie profonde et superficielle du bassin du Souss (Maroc) : Climatologie, hydrogéologie, crues et bilans hydrologiques en milieu subaride. Thèse 1995, p75-78.
- Salama, Tahiri M (2010): La gestion des ressources en eau face aux Changements climatiques. Cas du bassin Tensift (Maroc). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp: 127-138.
- Sarnthein, M., Thiede, J., Pflaumann, U., Erlenkeuser, H., Fütterer, D.K., Koopmann, B., Lange, H., Seibold, E., 1982. Atmospheric and oceanic circulation patterns off Northwest Africa during the past 25 million years. In: Seibold, E. (Ed.), *Geology of the Northwest African Continental Margin*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 545-604.
- Sarnthein. M, Koopmann. B (1980): Late Quaternary deep-sea record on northwest African dust supply and wind circulation. *Palaeoecol. Africa* 12, 239-253.
- Schiffelbein. P, Hills. S (1984): Direct assessment of stable isotope variability in planktonic foraminifera populations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 48, 197-213.
- Sebbar. A, Badri. W, Fougrach. H, Hsain. M, Saloui. A (2011): Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004), *Sécheresse*, Volume 22, pp. 139-148.
- Seneviratne. S. I (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 109-230, ISBN: 978-1-107-60780-4.
- Sinan. M (2000): Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par couplage des SIG, de la géophysique et de la géostatistique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). Thèse Université Mohammed V, Rabat, Maroc.
- Sirocko. F, Garbe-Schonberg. D, Devey. C (2000): Processes controlling trace element geochemistry of Arabian Sea sediments during the last 25,000 years. *Glob. Planet. Change* 26, 217e303.
- Skinner. L. C, Shackleton. N. J, Elderfield. H (2003): Millennial-scale variability of deep-water temperature and $\delta^{18}O_w$ indicating deep-water source variations in the Northeast Atlantic, 0-34 cal. ka BP. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4: 1098.
- Snyder. M.A, Sloan. L.C, Diffenbaugh. N.S, Bell. J.L (2003): Future climate change and upwelling in the California Current. *Geophysical Research Letters* 30, 1823.
- Sobrino. J.A, Raissouni. N (2000): Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing* 21, 353-366, doi:10.1080/014311600210876.
- Spero. H.J, Lea. D.W (1996): Experimental determination of stable isotope variability in *Globigerina bulloides*: implications for paleoceanographic reconstructions. *Marine Micropaleontology* 28, 231-246.
- Stéphan. P, Goslin. J, Paillet. Y, Manceau. R, Suanez. S, Vliet-Lanoë. V, Hénaff. A, Delacourt. C (2015): Holocene salt-marsh sedimentary infilling and relative sea-level changes in West Brittany (France) using foraminifera-based transfer functions. *Boreas*, 44(1), 153-177.
- Stott. L (2004): Decline in surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in Holocene epoch. *Nature*, 431, 56-59.
- Stuut. J. B (2005): Provenance of present-day eolian dust collected off NW Africa. *J. Geophys. Res.* 110, D04202.
- Swap. R, Ulanski. S, Cobbett. M, Garstang. M (1996): Temporal and spatial characteristics of Saharan dust outbreaks. *Journal of Geophysical Research* 101 (D2), 4205-4220.
- Tebaldi. C, Haohow. K, Arblaster. J, Meehl. G (2007): Going to Extremes. An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Climatic Change* 79: 185-21.

- Teisserenc. B (1983): Étude sur l'hiver de 1879-80 et recherches sur l'influence de la position des grands centres d'action de l'atmosphère dans les hivers anormaux. *Annales de la Société Météorologique de France*, 31, 70-79;
- Hildebrandsson & Teisserenc De Bort (1907) *Les bases de la météorologie dynamique*, Gauthier-Villars, Paris.
- Thompson. D.W, Wallace. J.M (1998): the African monsoon to variation of insolation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 49(3-4): 237-263.
- Thornthwaite. C.W (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55-94.
- Thurman. H. V, Trujillo. A. P (2002): *Essentials of oceanography*, 7th edition, Prentice Hall PTR.
- Till. C, Guiot. J (1990): Reconstruction of precipitation in Morocco since 1100 A.D. based on *Cedrus atlantica* tree-ring widths. *Quaternary Research* 33, 337-351.
- Torres-Padron. M.E, Gelado-Caballero. M.D, Collado-Sanchez. C, Siruela-Matos. V.F, Cardona-Castellano. P.J, Hernandez-Brito. J.J (2002): Variability of dust inputs to the CANIGO zone. *Deep Sea Res. Part II: Top. Studies Oceanogr.* 49, 3455–3464.
- Touchard .Y(2002) : Retombées à longue distance des trapps d'éthiopie. Thèse de doctorat - Université Aix-Marseille III.
- Toyofuku. T, Kitazato. H, Kawahata. H, Tsuchiya. M, Nohara. M (2000): Evaluation of Mg/Ca thermometry in foraminifera: comparison of experimental results and measurements in nature. *Paleoceanography* 15, 456-464.
- Trenberth. K. E (2008): The Impact of Climate Change and Variability on Heavy Precipitation, Floods, and Droughts. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 978-0470848944.
- Trenberth.K. E, (2007) : Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change (2007): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 235-336, ISBN: 978-0521-70596-7.
- Trouet. V, Esper. J, Graham. N.E, Baker. A, Scourse. J.D, Frank. D.C(2009): Persistent positive north Atlantic oscillation mode dominated the medieval climate Anomaly. *Science* 324, 78-80.
- Turc. L (1955) : Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques* 6, 1-131.
- Van Camp. L, Nykjaer. L, Mittelstaedt. E, Schlittenhardt. P (1991): Upwelling and boundary circulation off Northwest Africa as depicted by infrared and visible satellite observations. *Prog. Oceanogr.* 26, 357–402.
- Van. O (2009): Western Europe is warming much faster than expected. *Climate of the Past* 5: 1-12.
- Vincent. L (2005): Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes In South America, 1960-2002. *Journal of Climate* 18: 5011-5023.
- Vinther. B.M, Johnsen. S.J, Andersen. K.K, Clausen. H.B, Hansen. A.W(2003): NAO signal recorded in the stable isotopes of Greenland ice cores. *Geophys. Res. Lett.* 30. <https://doi.org/10.1029/2002GL016193>.
- Walling. D.E, Webb. B.W (1996): Erosion and sediment yield: a global overview. In: Walling, D.E., Webb, B.W. (Eds.), *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. IAHS Press, Wallingford, UK, pp. 3-19.
- Wansard. G (1996): Quantification of paleotemperature changes during isotopic stage 2 in the La Draga continental sequence (NE Spain) based on the Mg/Ca ratio of freshwater ostracods. *Quaternary Science Review* 15, 237-245.
- Warning. B, Brumsack. H.-J (2000): Trace metal signatures of eastern Mediterranean sapropels. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 158, 293e309.
- Watanabe. T, Winter. A, Oba. T (2001) : Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and 18O/16O ratios in corals. *Marine Geology* 173, 21-35.
- Weaver. P.P.E, Wynn. R.B, Kenyon. N.H, Evans. J (2000): Continental margin sedimentation, with special reference to the north-east Atlantic margin. *Sedimentology* 47, 239–256.
- Wehausen. R, Brumsack. H. J (2000): Chemical cycles in Pliocene sapropel-bearing and sapropel-barren eastern Mediterranean sediments. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 158, 325e352.
- Weingartner. R, Barben. M, Spreafico. M (2003): Floods in mountain areas-an overview based on example from Switzerland. *Journal of Hydrology*, 282: 10-24.
- Weisrock. A, Wahl. L, Ouammou. A, Chakir. L (2006): Systemes fluviaux du SudOuest marocain et leur evolution depuis le Pleistocene superieur (Fluvial systems of southwestern Morocco and their evolution since the Late Pleistocene). *Geomorphologie: Relief, Processus, Environnement* 4, 229-248.
- Whilite. DA, Glantz. MH (1985): Understanding the drought phenomenon : The role of definitions, *Water inters*, Volume 10, pp. 111-120.
- Wigley. T. M. L (1992): Future climate of the Mediterranean Basin with particular emphasis on changes in precipitation. In: Jelic, L., Milliman, J. D., Sestini, G. (eds). *Climatic Change and the Mediterranean*, pp. 15-44.
- Williams.P.W, King .D.N.T, Zhao J. X, Collerson. K.D (2004): Speleotherm master chronologies: combined Holocene 18O and 13C records from the north Island of New Zealand and their palaeoenvironmental interpretation. *The Holocene*, 14, 194-208.

- Wit. J. C, Reichart. G. J, Jung. S. J. A, Kroon. D (2010): Approaches to unravel seasonality in sea surface temperatures using paired single-specimen foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ and Mg/Ca analyses. *Paleoceanography*, 25, PA4220.
- Wynn. R.B, Masson. D.G, Stow. D.A.v, Weaver. P.P. E (2000): The Northwest African slope apron: a modern analogue for deep-water systems with complex seafloor topography. *Mar. Pet. Geol.* 17, 253-265.
- Xoplaki, E., Gonzalez-Rouco, J. F., Luterbacher, J. U., & Wanner, H., 2004. Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics and trends. *Climate dynamics*, 23(1), 63-78.
- Xueqin. Z (2019) : Recent climatic and anthropogenic impacts on endemic species in southwestern Morocco. *Quaternary Science Reviews*. p15.
- Yacoubi. M, El Mourid. M, Chbouki. N, Stockle. C (1998) : Typologie de la sécheresse et recherche d'indicateur d'alerte en climat semi-aride marocain. *Sécheresse* 9 : 269-276.
- Yan. Z (2002): Trends of Extreme Temperatures in Europe and China Based on Daily Observations. *Climatic Change* 53:355-392.
- Yarincik. K. M, Murray. R. W, Peterson .L. C (2000): climatically controlled eolian and hemipelagic deposition in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578,000 years: Results from Al/Ti and K/Al, *Paleoceanography*, 15, 210-228.
- Zabel. M, Schneider. R.R, Wagner. T, Adegbe. A.T, Vries. U, Kolonic. S (2001): Late Quaternary climate changes in central Africa as inferred from terrigenous input to the Niger Fan. *Quaternary Research* 56, 207-217.
- Zamrane. Z (2016) : Recherche d'indices de variabilité climatique dans des séries hydroclimatiques au Maroc : identification, positionnement temporel, tendances et liens avec les fluctuations climatiques : cas des grands bassins de la Moulouya, du Sebou et du Tensift. *Sciences de la Terre*. Université Montpellier, Français.
- Zhang. P. Z, Molnar. P, Downs. W. R (2001): Increased sedimentation rates and grain sizes 2-4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates, *Nature*, 410, 891-897.
- Zielhofer. C (2017): Atlantic forcing of Western Mediterranean winter rain minima during the last 12,000 years. *Quat. Sci. Rev.* 157, 29-51.
- Zielinski. G.A (1995): Stratospheric loading and optical depth estimates of explosive volcanism over the last 2100 years derived from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core. *J. Geophys. Res.*, 100(D10), 20,937-20,955.

Liste des figures

Partie 1

Figure 1 : Résumé de la méthode et de la démarche de l'étude.....	25
Figure 2 : Schéma de la structure de la thèse.....	31
Figure 3 : Températures de surface de l'océan Atlantique dans l'hémisphère Nord.....	64
Figure 4 : Différence de vent au niveau 1000 hPa (m/s) sur vingt années en hiver (mois de décembre à février) de la période 1980-1999.....	65
Figure 5 : Représentation de la circulation de surface du Courant des Canaries	66
Figure 6 : Les zones d'upwelling de la côte atlantique Marocaine.....	69
Figure 7 : Évolution de la température moyenne de l'hémisphère nord depuis l'an mille.....	84
Figure 8 : Schéma récapitulatif des impacts associés aux deux phases de l'Oscillation Nord Atlantique.....	88
Figure 9 : Phénomènes El Niño et La Niña à l'échelle de la planète.....	90
Figure 10 : Le climat des derniers 50 000 ans BP à partir des données glaciologiques.....	93
Figure 11 : Évolution de la température de l'hémisphère nord depuis 2000 ans.....	95
Figure 12 : Configuration orbitale il y a 11 000 ans (en haut) et actuelle (en bas).	96
Figure 13 : Aperçu sur quelques types de Foraminifères.	102
Figure 14 : Schéma de la structure d'un grain de pollen.....	106
Figure 15 : Description de la carotte GeoB8601-3.....	115
Figure 16 : Spectromètre de fluorescence X dispersif X de compteur Panalytical Epsilon.....	117
Figure 17 : Les étapes de préparation et d'analyse des échantillons par fluorescence X.....	119
Figure 18 : Tests de foraminifères de type Globigerina Bulloides 100µm.....	120
Figure 19 : Certains foraminifères planctoniques incorporent plus de Mg dans leurs tests lorsqu'ils poussent dans des eaux plus chaudes.....	121
Figure 20 : Susceptibilité magnétique à haute résolution de la carotte GeoB6007 (noir) et GeoB8601 (gris) ainsi que la succession d'âge de la carotte GeoB6007-2 (carrés pleins) basée sur des données de radiocarbone AMS.....	129

Partie 2

Figure 21 : Répartition altitudinale des stations étudiées dans les deux bassins versants.....	137
Figure 22 : Chronogramme des stations pluviométriques utilisées dans le bassin de Tensift.....	139
Figure 23 : Chronogramme des stations pluviométriques utilisées dans le bassin de Souss-Massa.....	139
Figure 24 : Exemple de Méthode du simple cumul.....	140
Figure 25 : Exemple de Méthode du double cumul.	141
Figure 26 : Exemple de la corrélation mensuelle.	141
Figure 27 : CUSUM des précipitations à la station d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna.....	143
Figure 28 : CUSUM des précipitations à la station d'Agadir, Taroudant et d'Aoulouz.....	144
Figure 29 : Résultat d'application de test de Lee et Heghinian sur la série pluviométrique des trois stations.....	146
Figure 30 : Résultat d'application de test de Buishand à la série pluviométrique de la station des trois stations.....	147
Figure 31 : Résultat d'application de test de Pettitt à la série pluviométrique des trois stations.....	149

Figure 32 : Résultat d'application de test de Lee et Heghinian sur la série pluviométrique des trois stations.....	150
Figure 33 : Résultat d'application de test de Buishand à la série pluviométrique de la station des trois stations.	150
Figure 34 : Résultat d'application de test de Pettitt à la série pluviométrique des trois stations.....	152
Figure 35 : Évolution des précipitations annuelles par rapport à la moyenne mobile à la station d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna (1972-2015).....	158
Figure 36 : Évolution des précipitations annuelles par rapport à la moyenne mobile à la station d'Agadir, Taroudant et d'Aoulouz (1968-2015).	160
Figure 37 : Les précipitations moyennes mensuelles à la station : Aghbalou, Chichaoua et Adamna (1972-2015).....	161
Figure 38 : Coefficient mensuel des précipitations à la station : Aghbalou, Chichaoua et Adamna (1972-2015).....	161
Figure 39 : Les précipitations moyennes mensuelles à la station : Agadir, Taroudant et Aoulouz (1968-2015).....	162
Figure 40 : Coefficient mensuel des précipitations à la station : Agadir, Taroudant et Aoulouz (1968-2015).....	164
Figure 41 : Les précipitations moyennes saisonnières à la station : Aghbalou, Chichaoua et Adamna (1972-2015)....	164
Figure 42 : Les précipitations moyennes saisonnières à la station : Agadir, Taroudant et Aoulouz (1968-2015)....	165
Figure 43 : Évolution de la température moyenne annuelle de la station d'Okaimdan (1990-2009), Marrakech (1961-2010) et de Takerkoust (1983-2010).....	167
Figure 44 : Évolution de la température moyenne mensuelle de la station d'Okaimdan (1990-2009), Marrakech (1961-2010) et de Takerkoust (1983-2010).....	169
Figure 45 : Évolution de la température moyenne annuelle de la station d'Aoulouz (1981-2018), Taroudant (1981-2018) et d'Agadir (1981-2018).	170
Figure 46 : Évolution de la température moyenne mensuelle à la station d'Aoulouz (1981-2018), Taroudant (1981-2018) et d'Agadir (1981-2018).	171
Figure 47 : Bilan hydrique mensuel moyen du bassin versant de Tensift (1981-2018).....	175
Figure 48 : Bilan hydrique mensuel moyen du bassin versant de Souss-Massa (1981-2018)....	175
Figure 49 : Évolution de la sécheresse à l'aide de l'indice rapport à la normale aux stations d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna (1972-2015).	186
Figure 50 : Évolution de la sécheresse météorologique à l'aide de l'indice l'écart à la moyenne à la station d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna (1972-2015).....	187
Figure 51 : Évolution de la sécheresse météorologique à l'aide de l'indice SPI à la station d'Aghbalou, Chichaoua et d'Adamna (1972-2015).	189
Figure 52 : Pourcentage des années sèches, normales et humides au Tensift (1972-2015).....	189
Figure 53 : Évolution de l'indice rapport à la normale des trois stations (Aoulouz, Taroudant et Agadir) pour la période (1968-2015).	191
Figure 54 : Évolution de la sécheresse météorologique à l'aide de l'indice l'écart à la moyenne à la station d'Aoulouz, Taroudant (1968-2015).	192
Figure 55 : Évolution de la sécheresse météorologique à l'aide de l'indice SPI à la station d'Aoulouz, Taroudant et d'Agadir (1968-2015).	194
Figure 56 : Pourcentage des années sèches, normales et humides aux trois stations (1968-2015).....	194

Figure 57 : Schéma récapitulatif des impacts associés aux deux phases de NAO (d'après Cassou, 2004).....	196
Figure 58 : Schéma des deux phases de WeMOI	197
Figure 59 : Évolutions des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations d'Agadir à l'échelle annuelle au cours de la période 1968-2015.	201
Figure 60 : Évolutions des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations de Taroudant à l'échelle annuelle au cours de la période 1968-2015.....	202
Figure 61 : Évolutions des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations d'Aoulouz à l'échelle annuelle au cours de la période 1968-2015.	202
Figure 62 : Évolutions des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations d'Aghbalou à l'échelle annuelle au cours de la période 1972-2015.	203
Figure 63 : Évolutions des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations de Chichaoua à l'échelle annuelle au cours de la période 1972-2015.	204
Figure 64 : Évolutions des indices NAO, WeMOI et SOI avec l'indice SPI des précipitations d'Adamna à l'échelle annuelle au cours de la période 1978-2015.....	204

Partie 3

Figure 65 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon ECHO 1-1.....	219
Figure 66 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon ECHO 1-2.....	220
Figure 67 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon ECHO 2-1.....	221
Figure 68 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon ECHO 2-2.....	221
Figure 69 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon ECHO 2-3.....	222
Figure 70 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon ECHO 2-4.....	222
Figure 71 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon ECHO 3-1.....	223
Figure 72 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon ECHO 3-3.....	223
Figure 73 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon ECHO 3-4.....	224
Figure 74 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon GéoB8606-2.....	226
Figure 75 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon GéoB8607-2.....	226
Figure 76 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon GéoB8604-3.....	226
Figure 77 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon GéoB8601-3.....	227
Figure 78 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon GéoB6009-1.....	227
Figure 79 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon GéoB6011-2.....	229
Figure 80 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon GéoB4210-2.....	230
Figure 81 : Distribution des éléments majeurs et traces d'échantillon GéoB6010-1.....	230
Figure 82 : Distribution des teneurs des éléments chimiques en fonction de la profondeur.....	263
Figure 83 : Distribution des teneurs des rapports chimiques en fonction de la profondeur.....	264
Figure 84 : Distribution des teneurs d'élément du K, Fe, Al, Ca et des rapports du Fe/Ca, K/Ca, Si/Al et Ti/Al de la carotte GeoB8601-3 en fonction de l'âge (BP).....	268
Figure 85 : Enregistrements Mg/Ca (mmol/mol) de la carotte GeoB8601-3 obtenues sur <i>Globigerina bulloides</i>	282
Figure 86 : Paléotempératures de surface estimées par la mesure du rapport Mg/Ca du foraminifère planctonique <i>G. bulloides</i> (Calibration de Mashiotta, 1999 et d'Elderfield et al, 2000).....	283
Figure 87 : Comparaison des enregistrements climatiques au large du sud-ouest du Maroc.....	286

Liste des cartes

Partie 1

Carte 1 : Carte de localisation géographique des domaines d'étude.....	20
Carte 2 : Situation géographique des bassins versants étudiés à l'échelle du Maroc.....	37
Carte 3 : Situation géographique du bassin versant de Tensift.....	38
Carte 4 : Situation géographique du bassin versant de Souss-Massa.....	40
Carte 5 : Carte hypsométrique du bassin de Tensift.	41
Carte 6 : Carte des pentes du bassin versant de Tensift.	41
Carte 7 : Carte hypsométrique du bassin de Souss-Massa.	44
Carte 8 : Carte des pentes du bassin versant de Souss-Massa.	44
Carte 9 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Tensift.	46
Carte 10 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Souss-Massa.....	48
Carte 11 : Carte géologique du bassin de Tensift.	50
Carte 12 : Carte géologique du bassin de Souss-Massa.....	52
Carte 13 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de Tensift, (images satellitaires 2018).....	54
Carte 14 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de Souss-Massa, (images satellitaires 2018).....	56
Carte 15 : Représentation de la façade atlantique du Maroc, la bathymétrie et la situation géographique des échantillons marins.....	61
Carte 16 : Carte de la densité de la population en 2014 dans le bassin de Tensift.....	70
Carte 17 : Carte de la densité de la population en 2014 dans le bassin de Souss-Massa.....	73
Carte 18 : Localisation des sites d'échantillonnages mentionnés dans cette étude.....	113
Carte 19 : Situation géographique de la carotte 8601-3.....	115

Partie 2

Carte 20 : Localisation des stations pluviométriques et thermométriques dans les deux bassins versants.....	138
Carte 21 : Pluviométrie annuelle moyenne au Maroc calculée sur la période 1971-2010.....	157
Carte 22 : Cartes de l'évolution du couvert végétal dans le bassin versant de Tensift (NDVI 1995-2005-2015).....	205
Carte 23 : Cartes de l'évolution du couvert végétal dans le bassin versant de Tensift (NDVI 1995-2005-2015).	209

Partie 3

Carte 24 : La situation géographique des points d'échantillonnages continentaux et marins étudiées.....	217
Carte 25 : Répartition spatiale des éléments majeurs (en mg/kg) des échantillons continentaux.....	223
Carte 26 : Répartition spatiale des éléments traces (en mg/kg) des échantillons continentaux.....	224
Carte 27 : Répartition spatiale des éléments majeurs (en mg/kg) des échantillons marins.....	231
Carte 28 : Répartition spatiale des éléments traces (en mg/kg) des échantillons marins.....	231
Carte 29 : Synthèse sur la répartition spatiale des éléments majeurs des sédiments continentaux et marins.....	232
Carte 30 : Synthèse sur la répartition spatiale des éléments en traces des sédiments continentaux et marins.....	233

Carte 31 : Simulation à l'aide d'un modèle global d'émission du flux annuel moyen d'émissions de poussières (à gauche) et du flux annuel total de dépôt (à droite).....	239
Carte 32 : Les régimes des vents pendant les saisons estivales et hivernales au-dessus de l'Atlantique Nord tropical.....	240
Carte 33 : Distribution globale des sédiments types sur les fonds océaniques.....	241
Carte 34 : Distribution spatiale d'éléments de Ca (en mg/kg).....	242
Carte 35 : Distribution spatiale d'éléments de K (en mg/kg).....	243
Carte 36 : Distribution spatiale d'éléments d'Al (en mg/kg).....	244
Carte 37 : Distribution spatiale d'éléments de Fe (en mg/kg).....	245
Carte 38 : Distribution spatiale d'éléments de Mg (en mg/kg).....	245
Carte 39 : Distribution spatiale d'éléments de Ti (en mg/kg).....	246
Carte 40 : Distribution spatiale d'éléments de Si (en mg/kg).....	247
Carte 41 : Distribution spatiale de rapport Fe/Ca (en mg/kg).....	248
Carte 42 : Distribution spatiale de rapport K/Ca (en mg/kg).....	248
Carte 43 : Distribution spatiale de rapport K/Al (en mg/kg).....	249
Carte 44 : Distribution spatiale de rapport Ti/Al (en mg/kg).....	250
Carte 45 : Distribution spatiale de rapport Si/Al (en mg/kg).....	251
Carte 46 : Situation géographique de la carotte 8601-3 (l'étoile jaune)	261
Carte 47 : Situation géographique de la carotte Geo8601-3.....	277
Carte 48 : Températures estimées de surface marine à partir le rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques (G.buloides) selon la méthode de Mashiotta, 1999.....	279
Carte 49 : Températures estimées de surface marine à partir le rapport Mg/Ca des foraminifères planctoniques (G.buloides) selon la méthode d'Eldderfield et al, (2000).....	280

Liste des tableaux

Partie 1

Tableau 1 : Évolution des différents gaz à effet de serre.	83
Tableau 2 : Les paramètres climatiques et leurs échelles spatiales et temporelles.....	100
Tableau 3 : Identification de stations pluviométriques.....	110
Tableau 4 : Identification de stations thermométriques.....	111
Tableau 5 : Informations détails concernant les prélèvements continentaux étudiés.....	114
Tableau 6 : Informations détails concernant les prélèvements marins étudiés.....	116
Tableau 7 : Caractéristiques de model d'âge adopté pour la carotte GeoB8601-3.....	129

Partie 2

Tableau 8 : Identification de stations pluviométriques retenues.....	136
Tableau 9 : Identification de stations thermométriques retenues.	137
Tableau 10 : Découpage de la chronique des pluies des trois stations en périodes homogènes.....	143
Tableau 11 : Découpage de la chronique des pluies des trois stations en périodes homogènes.....	145
Tableau 12 : Résultats des tests de détection de rupture appliqués aux séries pluviométriques annuelles.....	152
Tableau 13 : Caractéristiques statistiques des trois stations (1972-2015).....	158
Tableau 14 : Caractéristiques statistiques des trois stations (1968-2015).....	160
Tableau 15 : Pluies saisonnières et leurs contributions dans les pluies moyennes annuelles à la station de Chichaoua, d'Aghbalou et d'Adamna (1972-2015).....	165
Tableau 16 : Pluies saisonnières et leurs contributions dans les pluies moyennes annuelles à la station d'Agadir, Taroudant et d'Aoulouz (1968-2015).....	166
Tableau 17 : Estimation des moyennes anuelles de bilan hydrique dans les deux bassin versants étudiés (1981-2018).....	175
Tableau 18 : Ccatégories de sécheresse et d'humidité définies par les valeurs de l'ISP.....	185
Tableau 19 : Fréquence des années sèches, normales et humides des trois stations à l'aide de l'indice rapport à la normale.....	185
Tableau 20 : Fréquence des années sèches, normales et humides des trois stations à l'aide de l'indice rapport à la normale.....	190

Partie 3

Tableau 21 : Informations détails sur les prélèvements continentaux.....	219
Tableau 22 : Informations détails sur les prélèvements marins mentionnées dans cette étude...	226
Tableau 23 : Les caractéristiques géochimiques des sédiments de surface marins obtenues.....	278
Tableau 24 : Les caractéristiques géochimiques de la carotte GeoB8601-3 obtenues sur Globigerina bulloides.....	281

Liste des photos

Partie 1

Photo 1 : Photographies à exemplaire prises au terrain qui a été effectué en 2017 dans le bassin du Tensift et de Souss-Massa (travail de terrain, 2017).....	23
Photo 2 : Photographies à exemplaire de travail de laboratoire prises à l'université de Brême 2017.....	24
Photo 3 : Photos montrant quelques activités agricoles dans le bassin du Tensift.....	71
Photo 4 : Photos montrant quelques activités agricoles dans le bassin de Souss-Massa.....	74
Photo 5 : Photos montrant quelques activités de pêche maritime dans le bassin Souss-Massa.....	75
Photo 6 : Photo exemplaire d'une carotte de glace.....	104
Photo 7 : Section exemplaire d'une carotte marine.....	104
Photo 8 : Photographies prises à Brême 2017 afin d'illustrer quelques-unes des étapes du protocole de nettoyage des foraminifères (G. Bulloides).....	127