

Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc

N. MOKHTARI, R. MRABET, P. LEBAILLY, L. BOCK

(Reçu le 29/10/2013; Accepté le 09/12/2013)

Résumé

L'objectif de cet article est l'analyse comparative de l'extension spatiale et de la localisation géographique de l'aridité et des étages bioclimatiques du Maroc et de leurs limites en utilisant différents indices utilisés en Afrique du Nord et ailleurs en Méditerranée. L'analyse a été orientée vers l'utilisation des données issues de la base données WorldClim, la spatialisation moyennant les techniques SIG et l'étude de la répartition des différentes espèces végétales. Ainsi, les étages bioclimatiques ont été caractérisés moyennant une approche spatiale en utilisant le diagramme pluviothermique d'Emberger (Sauvage, 1963). Les résultats obtenus montrent que les zones hyperarides au Maroc représentent 45 à 55% du territoire en fonction des différents indices d'aridité. La répartition spatiale des pluies indique que 48% du territoire Marocain reçoit moins de 100mm annuellement, alors que les régions où il pleut plus de 600mm ne dépassent pas les 6%. Les zones arides, semi-arides et subhumides potentiellement concernées par la désertification sont de l'ordre de 42%. La comparaison des différents indices utilisés montre que l'indice d'aridité de De Martonne, le plus facile à calculer, reste satisfaisant pour les études à caractère régional. La dérivation de la carte des étages bioclimatiques, en se basant sur le diagramme d'Emberger, (Q2 et Tmin) montre l'existence au Maroc de 5 grands types de climats allant de humide jusqu'au peraride. L'étage perhumide n'existant que sous forme insignifiante au niveau des crêtes de la chaîne du Rif (<5Km²). Les variantes thermiques allant du « Tempéré » à « Très chaud » y représentent plus que 70%.

Mots clés: Bioclimats, aridité, continentalité, SIG, végétation, Maroc.

Abstract

The objective of this study was to compare and analyze the spatial extent and geographic location of aridity and bioclimatic zones in Morocco and their limitations using different indices used in North Africa and elsewhere in the Mediterranean region. The analysis was based on the use of data from the WorldClim database, spatialization through GIS techniques, and the distribution of different plant species. Hence, the bioclimatic zones were characterized by spatial approach using Emberger pluviothermic Chart (Sauvage, 1963). The results showed that according to the different indices of aridity, the hyper-arid areas in Morocco represent 45 to 55% of the country. The spatial distribution of rainfall showed that 48% of Moroccan territory receives less than 100mm annually, while areas where the precipitation is more than 600mm do not exceed 6%. Arid, semi-arid and sub-humid zones potentially affected by desertification represent 42%. The comparison of different indices used showed that De Martonne aridity index seems to be satisfactory for regional studies. The derivation of the bioclimatic zones map, based on the diagram of Emberger, (Q2 and Tmin) showed the existence of five main types of climates in Morocco, ranging from humid to perarid. The per-humid bioclimatic stage is not significant and is limited to the crest of Rif mountains (<5km²). The thermal variations from "Temperate" to "Very hot" represent more than 70% of the territory.

INTRODUCTION

Le climat est l'un des principaux facteurs influençant la dégradation des sols et la végétation, ses caractéristiques sont évaluées en employant les paramètres qui agissent sur la disponibilité de l'eau à savoir les précipitations, les températures, l'insolation et le vent.

Les études portant sur la caractérisation des climats sont nécessaires pour évaluer les contraintes liées aux différents types du climat au regard des disponibilités en eau et ses conséquences sur l'agriculture et le développement en générale.

L'étude de l'aridité ou la classification des climats se base sur des indices dits climatiques et biogéographiques. De

ce fait, plusieurs indices bioclimatiques et d'aridité ont été proposés en se basant généralement sur la combinaison des précipitations (P), des températures (T_m, T_{max} et T_{min}) et du pouvoir évapo-transpirant de l'atmosphère (ETP). Selon les cas, les auteurs ont envisagé les rapports P/ETP, (P-ETP)/ETP ou encore P-ETP. Ces indices ont été développés en vue de délimiter spatialement les zones bioclimatiques et pour expliquer la distribution géographique de la végétation par la combinaison des différents facteurs climatiques (Gavilan, 2005).

La cartographie des bioclimats en utilisant les outils d'analyse spatiale et les systèmes d'information géographique permet de générer les cartes de distribution

¹ École Nationale d'Agriculture de Meknès, BP S/40 Meknès, Maroc, nmokhtari@enameknes.ac.ma

² Institut National de la Recherche Agronomique, CRRRA Tanger, Maroc, rachidmrabet@gmail.com

³ Université de Liège, (GxABT), Laboratoire d'Économie Rurale, 5030 Gembloux, Belgique, philippe.lebailly@ulg.ac.be

⁴ Université de Liège, (GxABT), Laboratoire de géopédologie, 5030 Gembloux, Belgique, laurent.bock@ulg.ac.be

spatiale des différents indices bioclimatiques et d'aridité et d'analyser la distribution de la végétation en relation avec les différents paramètres biophysiques (Topographie, exposition, altitude, précipitations, température...). L'identification et la délimitation des zones bioclimatiques à caractère homogène constituent une étape préliminaire nécessaire pour les études de vocation et de gestion des terres et de valorisation de l'utilisation du territoire en générale. En outre la connaissance des relations variabilité climatique et végétation permet de mieux instaurer des politiques d'adaptation aux phénomènes de sécheresse et d'agressivité des agents météorologiques.

La présente étude a pour objectif l'analyse de la variabilité spatiale des bioclimats et des indices d'aridité et de continentalité au Maroc. Dans ce sens, six différents indices ont été calculés en utilisant les données climatiques moyennées pour la période 1950-2000 issues de la base de données mondiale WorldClim. En outre, un intérêt particulier sera accordé à l'analyse des relations entre les aires de répartition de six espèces forestières caractéristiques du climat méditerranéen et les étages bioclimatiques du Maroc.

MÉTHODOLOGIE

La spatialisation pour une éventuelle régionalisation de la variabilité du climat au niveau national est très limitée et la faible densité d'observations fiables est un facteur critique (Born et al. 2005), en plus les coûts d'acquisition des données de l'ensemble des stations de mesure restent très élevés pour pouvoir établir des cartes climatiques de bonne qualité.

Aussi, la description du climat à l'aide de diagrammes climatiques à l'échelle d'une ou plusieurs stations de mesure décrivent seulement les caractéristiques des points d'observations locaux et ne donnent pas une idée sur la répartition spatiale des zones de conditions climatiques similaires. Pour palier à ce problème, les données climatiques utilisées dans le cadre de ce travail concernent deux bases de données bioclimatiques mondiales spatialisées et libres d'accès:

- Base de données Worldclim (Hijmans et al., 2005): Il s'agit de la base de données climatique mondiale libre d'accès (<http://www.worldclim.org>). Elle contient, en plus des données mensuelles interpolées relatives aux précipitations et aux températures pour l'ensemble du globe, un ensemble de 19 paramètres bioclimatiques. Ces données correspondent aux valeurs moyennes pour la période 1950-2000 pour une résolution de 30'' soit environ 1km.

- Base de CGIAR-CSI (Trabucco et al., 2009): Ces données produites en 2009 ont été téléchargées à travers le géoportail de CGIAR-CSI (<http://www.csi.cgiar.org>) et concernent l'indice d'aridité (IA) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) interpolées pour l'ensemble du globe. Elles correspondent, comme pour les données WorldClim, aux valeurs moyennées sur la période 1950-2000 avec la même résolution spatiale.

Les autres données numériques utilisées sont :

- Couche des positions géographiques des grandes villes du Maroc (Shapefile) ;

- Le modèle numérique de terrain STRM (Shuttle Radar Topography Mission). Ces données, produites par la NASA avec une résolution de 90m à l'équateur pour l'ensemble du globe, ont été téléchargées à partir du géoportail du Consortium pour l'information spatiale (CGIAR-CSI) (Version 4.1) (Jarvis et al., 2008) puis prétraitées ;

- Couche des formations forestières du Maroc, extraites à partir de la carte de la forêt du Maroc (Comité géographique du Maroc, 1958), numérisée et géoréférencée.

Pour cela, une démarche en trois étapes a été retenue. Il s'agit d'abord d'extraire à partir de la base de données Worldclim, sous forme de couches distinguées, l'ensemble des données nécessaires pour l'analyse du climat sous système d'information géographique (SIG), le traitement des données moyennant les outils d'analyse spatiale, la création des couches résultat et leur analyse et interprétation par croisement des couches obtenues ou disponibles (Climat, topographie, position géographique, formations végétales). Un intérêt particulier a été accordé à l'interprétation de la répartition des différentes espèces de végétation en fonction de l'indice bioclimatique d'Emberger.

Les indices bioclimatiques et d'aridité utilisés sont les suivants:

Indice bioclimatique d'EMBERGER

Parmi les indices bioclimatiques utilisés de façon traditionnelle en Afrique du Nord et ailleurs en Méditerranée (EMBERGER, 1931; GAUSSEN, 1954; DAGET, 1977; QUEZEL, 1979) on distingue l'indice bioclimatique d'Emberger. Celui-ci prend en compte les précipitations annuelles, la moyenne des Maxima de température du mois le plus chaud (M en °C) et la moyenne des minima de température du mois le plus froid (m en °C) (Emberger, 1955). Cet indice est donné par la formule:

$$Q2 = \frac{2000 * P}{(M + m + 546,4) * (M - m)}$$

Où :

P: la pluviométrie annuelle en mm

M: la température maximale du mois le plus chaud en °C (Juillet)

m: la température minimale du mois le plus froid en °C (Janvier)

Ce quotient, particulièrement adapté aux régions méditerranéennes, traduit le rapport entre la quantité des précipitations et la moyenne des extrêmes thermiques (Mois le plus chaud et le plus froid), le tout corrigé par l'amplitude thermique extrême (M – m). Emberger a remarqué que l'amplitude thermique est un facteur important de la répartition des végétations. La combinaison des quotients pluvio-thermiques obtenus (Q2) et les températures minimales du mois le plus froid (m) (facteur limitant) avec les observations faites sur la répartition de végétation méditerranéenne et plus particulièrement au Maroc a conduit Emberger à subdiviser l'aire du climagramme en zones caractéristiques par des aridités croissantes de haut en bas, ce sont les «étages bioclimatiques de végétation».

Les étages bioclimatiques de végétation retenus sont les suivants:

- Etage saharien ;
- Etage aride ;
- Etage semi-aride ;
- Etage sub-humide ;
- Etage humide ;
- Etage per-humide.

L'introduction de la variante température minimale allant de -5 à 12°C a permis de tracer le climagramme pluviométrique en fonction de la valeur de Q2, celui-ci a été plus tard amélioré et adapté pour l'ensemble du Bassin Méditerranéen (Sauvage, 1963).

Indices d'aridité

L'aridité se caractérise par un déficit pluviométrique presque permanent lié à une forte insolation, des températures diurnes élevées, une faible humidité de l'air et une évapotranspiration qui conduit à des déficits hydriques pendant la majeure partie de l'année. C'est un phénomène climatique structurel qui se différencie de la sécheresse, phénomène climatique qui survient aussi bien dans les milieux arides que dans les milieux plus humides.

Une région est considérée comme aride quand elle est caractérisée par un grave manque d'eau disponible, ayant pour conséquence de freiner, voire empêcher, la croissance et le développement de la végétation et la présence d'une vie animale. En conséquence, des environnements soumis à des climats arides sont caractérisés par une rareté de la végétation généralement bien adaptée au manque d'eau et constituée de xérophiles ou désertiques.

Les indices d'aridité (IA) sont des indicateurs quantitatifs du degré du manque d'eau à un endroit donné, la plupart sont de simples rapports hydro-thermiques fondés sur les hauteurs moyennes des précipitations et de la température. Les plus connus sont ceux de De Martonne (1926), Emberger (1931), Thornthwaite (1948), Dubief (1950), Capot-Rey (1951), Bagnouls et Gaussen (1952) et Birot (1953). D'autres indices font références à la demande évaporative de l'atmosphère (UNEP, 1997 ; Floret et Pontanier 1984). Ces indices sont en générale calculés annuellement (parfois mensuellement) et sont surtout utilisables à petite et moyenne échelle.

Suivant l'ampleur du déficit hydrique, plusieurs degrés d'aridité peuvent être différenciés et sont définis par des classes d'indices d'aridité conventionnelles applicables au zonage climatique. Il est généralement classique de distinguer au moins trois degrés dans l'aridité à savoir l'hyper-aride ou désertique, l'aride et le semi-aride. Mais, jusqu'à aujourd'hui, il n'y a pas d'accord universel sur les limites précises entre les classes d'aridité telles que le subhumide, le semi-aride, l'aride et le désertique.

Indice de de MARTONNE

L'indice d'aridité annuelle De Martonne (De Martonne, 1926) est défini comme suit :

$$I = P/T + 10$$

Où:

T: température moyenne annuelle en °C ;

P: précipitation moyenne annuelle en mm.

Cette indice, appelé parfois indice de sécheresse de De Martonne, peut être calculé aussi mensuellement et donne une indication sur le degré de sécheresse par rapport à la demande évaporative moyenne de l'atmosphère approché par la température.

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne a proposé six grands types de macroclimats allant des zones désertiques ou hyperarides ($I < 5$) aux zones humides à forêt prépondérante ($I > 40$). Les zones hyperarides sont caractérisées par des précipitations exceptionnelles.

Indice d'aridité de BAGNOULS GAUSSEN

L'index d'Ombrothermique traduit l'effet du stress hydrique sur le développement de la végétation et la formation de la biomasse (Bagnouls et Gaussen, 1953) et exprime la durée et l'intensité de la saison sèche. Il est employé pour identifier des phénomènes liés à la sécheresse (indiqués par des valeurs positives de BGI) et pour l'évaluation des zones sensibles à la désertification dans la région méditerranéenne (Kosmas et al, 1999).. Il est défini comme suit :

$$BGI = \sum_{i=1}^{12} (2T_i - P_i) \cdot K_i$$

Où:

T_i : température moyenne du mois *i* en °C ;

P_i : précipitation moyenne du mois *i* en mm ;

K_i: proportion du mois pendant laquelle $2T_i > P_i$.

Ainsi, il défini comme mois sec ou aride tout mois ayant le rapport entre les précipitations et la température moyenne du mois inférieur à deux, c'est-à-dire quand les pertes en eau (supposées causées par une température trop forte) sont supérieures aux apports (précipitations). Inversement, quand $P > 2T$, le mois est considéré comme humide. En région méditerranéenne, certains auteurs définissent un mois sec quand $P < 3T$ ou $P < 4T$ (Lebourgeois et Piedallu, 2005).

L'intégration dans cet indice de deux paramètres de nature différente moyennant le coefficient multiplicatif 2 s'explique par le fait que la valeur de $2T$ a été assimilée à la demande évaporative de l'atmosphère (ETP) (Daget, 1977). En somme, l'indice d'aridité Bagnouls Gaussen traduit la somme des déficits mensuels corrigés de leur concentration (Intégrale de la courbe $2T-P$ corrigé de la concentration mensuelle).

Indice d'aridité UNEP

L'indice d'aridité (UNEP, 1997) est un indicateur du degré d'aridité du climat à un endroit donné par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère. Il est défini comme suit :

$$AI = P/ETP$$

Où:

P : précipitation annuelle moyenne en mm ;

ETP: évapotranspiration potentielle annuelle moyenne en mm.

Cet indice est largement utilisé pour l'évaluation de la qualité du climat et traduit le déficit annuel entre la quantité des précipitations reçue (P) par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère (ETP), ce qui implique que plus l'indice est faible plus l'aridité est élevée et permet de classer les climats de l'hyperaride à l'humide selon les valeurs suivantes :

Hyperaride	$I < 0,05$
Aride	$0,05 < I < 0,20$
Semi-aride	$0,21 < I < 0,50$
Sub-humide sec	$0,51 < I < 0,65$
Sub-humide et humide	$I > 0,65$

Ainsi, Nous avons cherché à savoir lequel, parmi les indices suscités, qui permet de mieux différencier les types de climat du Maroc à travers le calcul de la matrice des corrélations entre les différents indices pour l'ensemble du Maroc et moyennant l'édition des cartes spécifiques.

Indices de continentalité

La continentalité résulte de la combinaison des facteurs thermiques et pluviaux pour distinguer les types de pluviosité : climats continentaux, semi-continentaux et maritimes. Deux indices de continentalité sont utilisés:

Indices de continentalité pluviale d'ANGOT

La continentalité pluviale et surtout pour le climat méditerranéen se caractérise par une concentration saisonnière des précipitations. L'indice d'Angot (Angot, 1906) mesure la concentration saisonnière des précipitations moyennant l'indice C qui est le rapport entre la quantité des précipitations des six mois les plus chauds et la quantité des précipitations des six mois les plus froids.

$$C = \frac{P_{6 \text{ mois} + \text{chauds}}}{P_{6 \text{ mois} + \text{froids}}}$$

Indices de continentalité thermique de GORCZINSKI

Sachant que l'amplitude thermique annuelle moyenne augmente avec l'éloignement de la mer, Gorczinski a établi un indice K (Gorczinski, 1920) qui tient compte de cette amplitude en fonction de la latitude. Plus tard, et compte tenu que l'effet de l'altitude comme celui de la latitude, se traduisent par une réduction de l'amplitude thermique (Ozenda, 1955), Daget (Daget, 1977) a proposé de caractériser la continentalité thermique du climat méditerranéen par l'indice de Gorczinski modifié K' qui intègre l'altitude moyennant la formule suivante:

$$K' = \frac{1,7.A}{\sin(\rho + 10 + 9.h)} - 14$$

Où:

A : Amplitude thermique moyenne annuelle en °C ;

ρ : Latitude en degré arc ;

h : Altitude en Kilomètre.

Ce coefficient, qui varie entre 0 à 100 et peut être exprimé en %, mesure la variation de la continentalité thermique par rapport à la position latitudinale corrigée de l'altitude du point et définit ainsi la rigueur des hivers et l'ardeur des étés.

La combinaison des deux indices de continentalité a permis à Daget de tracer sur un même graphique les limites entre les différents types de climats en partant des climats maritimes très peu contrastés avec des valeurs de C et de K' très faibles jusqu'au climats typiquement continentaux où les coefficients C et K' sont les plus élevés.

De point de vue répartition géographique des différentes espèces caractéristiques du pays nous avons sélectionné six espèces forestières à savoir, le cèdre, le chêne vert, le chêne liège, le Thuya, le genévrier et l'arganier en plus de l'alfa, graminée endémique des hauts plateaux. La carte des formations forestières du Maroc a été utilisée dans le cadre du SIG pour présenter les aires de répartition des différentes espèces sur le climagramme d'Emberger.

RESULTATS

Distribution des pluies

Au Maroc, la pluviométrie présente une grande variabilité spatiale. La couche d'information relative à la moyenne des précipitations annuelles sur la période de 1950-2000 (Données Worldclim), pour l'ensemble du Maroc, extraite à partir de la base de données Worldclim, montre que la moyenne des précipitations annuelles pour l'ensemble du Maroc varie globalement entre 16mm à 1182mm. Les valeurs les plus basses sont enregistrées au niveau de l'extrême Sud du pays et les valeurs les plus élevées sont localisées au niveau crêtes des montagnes du Rif. La répartition spatiale des pluies (Figure 1) montre un gradient altitudinale et longitudinale en relation avec les effets combinées des courants humides océaniques et de la barrière montagneuse de l'Atlas. On distingue, par ailleurs, l'existence de deux grandes dépressions des précipitations en relation avec des effets de site et la topographie qui sont la dépression de la vallée de Missour où les précipitations ne dépassent pas la valeur moyenne de 200mm et celle localisée au niveau de l'axe de Kalâa Sraghna, Marrakech à Chichaoua avec des précipitations moyennes de l'ordre de 250 à 300mm.

Selon le tableau 1, la répartition spatiale des pluies montre que 48% du territoire Marocain reçoit moins de 100mm annuellement, alors que les régions où il pleut plus de 600mm ne dépassent pas les 6%.

De point de vue localisation spatiale on note que l'ensemble du Sud Marocain y compris une partie des flancs du Haut Atlas et l'Anti Atlas oriental reçoit des précipitations inférieures à 100mm avec un gradient nord sud assez prononcé. Au Nord, c'est la chaîne Nord Ouest du Rif qui est la plus arrosée avec des précipitations moyennes pouvant atteindre plus de 1m annuellement.

Tableau 1 : Importance spatiale des classes de hauteur de précipitations

Pluie	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	>900
%	48,15	9,71	12,49	11,82	6,03	5,86	2,92	1,71	0,77	0,54

L'indice de continentalité pluviale d'Angot qui exprime la concentration saisonnière des précipitations entre le semestre le plus froid et le plus chaud, calculé en pourcent pour l'ensemble du Maroc, montre que les régions où la concentration des pluies pendant les six mois les plus chauds est la plus élevée sont situées au niveau de la vallée de Ziz et à l'extrême Sud du Maroc avec des pourcentages pouvant aller jusqu'à plus 200%. Ces régions sont caractérisées par une pluviométrie très faible et plutôt précoce, concentrée le plus souvent au niveau des derniers mois les plus chauds de l'année par rapport à la moyenne générale du pays située entre Mai à Octobre ; les effets combinés de la topographie, de la continentalité et des influences humides extratropicales pourraient être à l'origine de cette hétérogénéité de la répartition saisonnière des précipitations (Touchan et al. 2011 ; Knippertz et al. 2003 ; Dai et al. 2004).

Distribution des températures moyennes

La répartition spatiale des températures moyennes annuelles pour l'ensemble du Maroc (figure 2) montre un effet de continentalité combinée avec l'effet lié à l'altitude au niveau de la chaîne de l'Atlas et du Rif. En générale,

les températures moyennes annuelles varient de presque 0°C au niveau des crêtes des montagnes du Rif jusqu'à plus de 26°C à l'Extrême Sud Est du pays.

L'analyse de l'amplitude thermique entre la valeur maximale du mois le plus chaud et la valeur minimale du mois le plus froid à partir des données Worldclim (Bio07), montre que les amplitudes les plus extrêmes sont situées au niveau de la vallée de Drâa avec des valeurs annuelles moyennes pouvant atteindre 35°C entre la température minimale du mois de Janvier et celle maximale relative au mois de Juillet.

Continentalité

L'indice de continentalité thermique K' de Gorzinski varie entre 15 à 88 en allant du climat purement maritime au niveau des zones côtières des villes d'Essaouira et de Tarfaya avec des valeurs de K' entre 17 à 25 aux climats typiquement continentaux avec des valeurs de K' pouvant atteindre plus de 80 au niveau de l'extrême Sud Est du Pays (Vallées de Drâa et Ziz).

La carte des types de climat en fonction de la continentalité pluviale et thermique au sens de Daget (Daget, 1977)

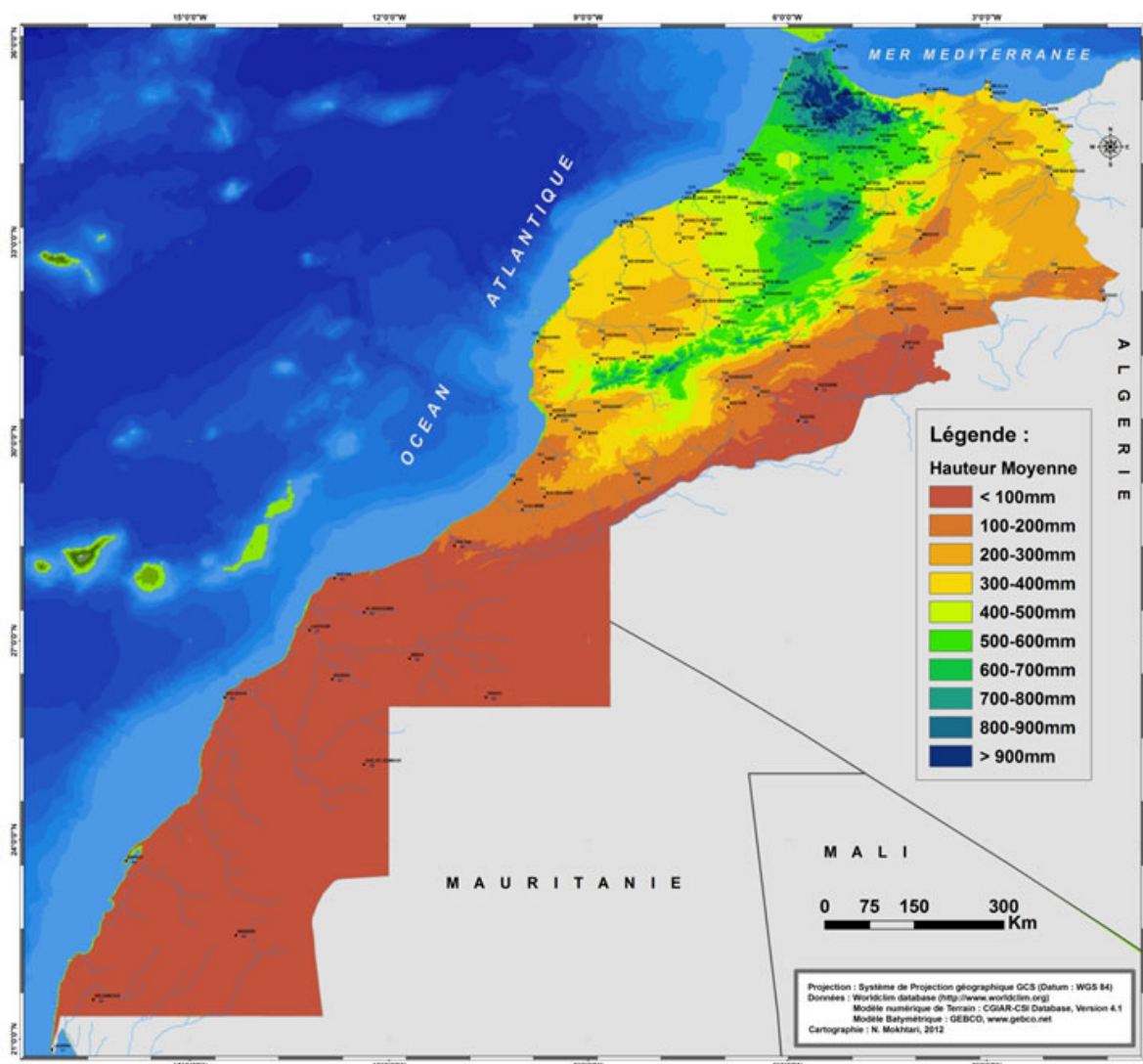


Figure 1 : Carte des hauteurs des précipitations annuelles (1950-2000)

permet de distinguer entre les climats méditerranéens et semi continentaux avec leurs trois variantes thermiques. Ainsi, on note que le climat Méditerranéen est largement dominant et étalé Nord Est Sud Ouest sur l'ensemble du Maroc sur 86% du territoire, sa variante méditerranéenne fortement contrastée est la plus représentée et occupe 61% par rapport à la superficie totale. Les climats semi continentaux sont localisés au Sud Est et à l'Extrême Sud du pays avec 14% de superficie, alors que les climats

maritimes et continentaux sont très peu représentés et ne dépassent pas 0,5% (tableau 2).

Etages bioclimatiques

L'influence combinée de la mer et de l'océan, la présence des montagnes d'atlas et Rif et du désert du Sahara au sud créent une gamme diverse de climats au Maroc (Maliha et al., 2008). La dérivation de la carte des étages

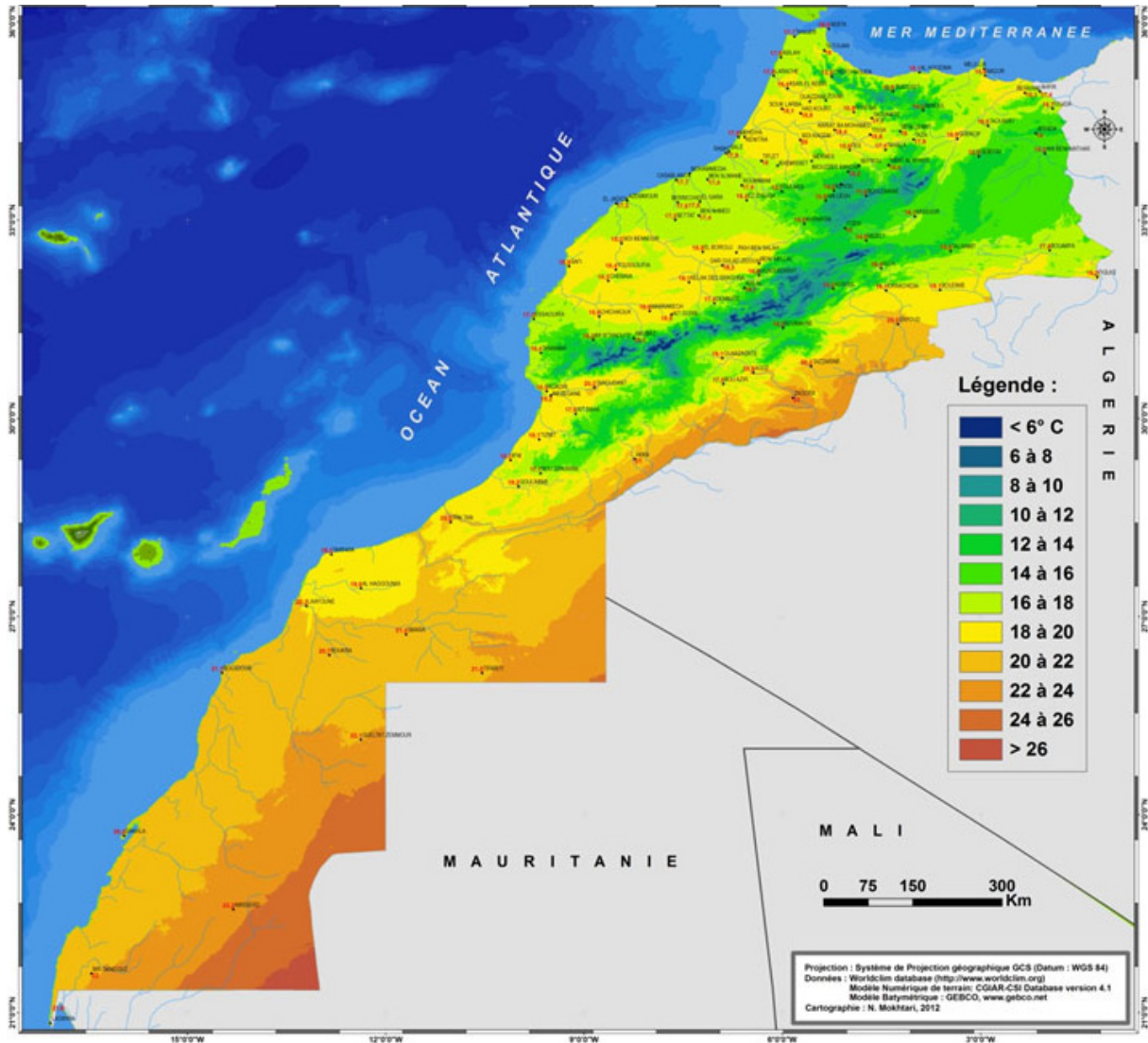


Figure 2 : Carte des températures moyennes annuelles

Tableau 2 : Importance des différents bioclimats selon la classification d'Emberger

C/K°	Contraste (Continentalité thermique K°)			Total
	Faible	Moyen	Fort	
Océanique	-	-	0,46	0,46
Méditerranéen	4,48	20,79	60,58	85,85
Semi-continentale	1,25	2,43	10,00	13,68
Continental	-	-	-	0,01
Total	5,73	23,22	70,58	100,00

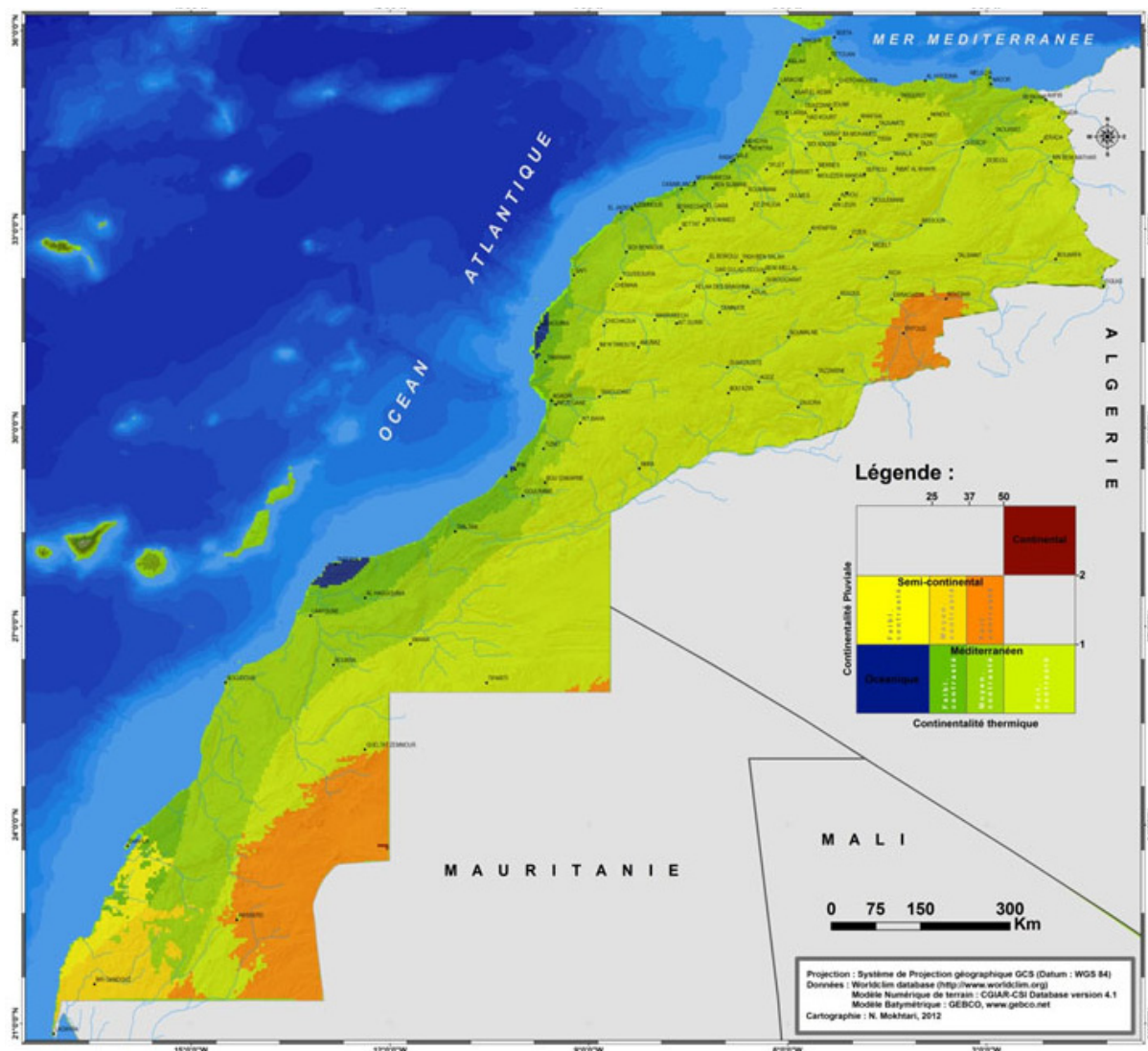


Figure 3 : Carte de continentalité selon la classification de Daget

Tableau 3 : Importance des différents bioclimats selon la classification d'Emberger

	T. froid	Froid	Frais	Tempéré	Chaud	T. Chaud	Total
Per-humide	-	*	-	-	-	-	0,00
Humide	0,07	0,17	0,11	0,01	-	-	0,36
Sub-humide	3,71	1,87	1,33	2,02	0,49	-	9,42
Semi-aride	1,12	5,12	5,63	7,85	2,24	0,01	21,96
Aride	0,11	1,06	4,98	5,49	0,96	0,04	12,65
Hyper-aride	-	0,51	4,44	10,62	10,36	29,70	55,62
Total	5,01	8,72	16,49	25,98	14,04	29,75	100,00

* Traces superficie inférieure à 5Km²

bioclimatiques, en se basant du le diagramme d'Emberger, (Q2 et Tmin) (figure 4) montre l'existence au niveau de l'ensemble du Maroc des 6 types de climats : le per-humide, l'humide, le sub-humide, le semi-aride, l'aride et le per-aride ou saharien avec des variantes relatives à la température minimale du milieu, soit un total de 27 étages bioclimatiques allant du per-humide froid au niveau des cimes des montagnes du Rif jusqu'à l'hyperaride très chaud au niveau de l'extrême Sud du pays. La répartition relative des superficies des différents étages bioclimatiques est donnée au tableau 3.

On note que le climat hyperaride occupe plus de 55% du territoire suivi du climat semi-aride avec 22%. Au niveau thermique, la variante « très chaud » est dominante avec presque 30% du territoire suivi du tempéré avec 26%. Ainsi, le pourcentage de superficie pouvant être potentiellement concerné par la désertification pour l'ensemble du Maroc est de l'ordre de 42% et regroupe le sub-humide, le semi-aride et l'aride. Il est important de noter que 55.62% du pays est hyper-aride ou désertique selon la classification d'Emberger.

L'analyse de l'indice d'aridité Q2 d'Emberger pour les

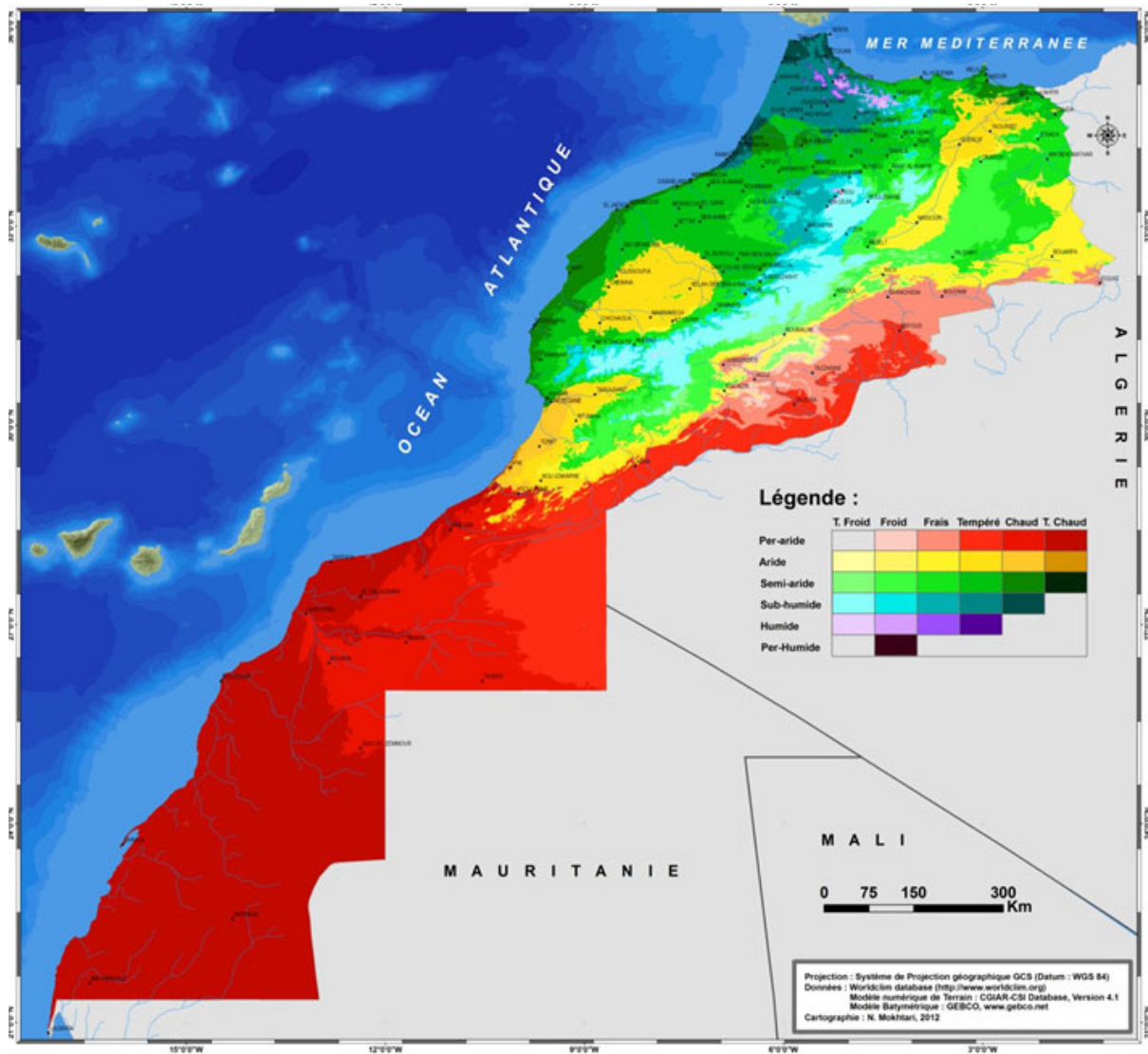


Figure 4 : Carte des bioclimats selon la classification d’Emberger

principales villes du Maroc montre que celui-ci est compris entre 3,86 (Lagwira) à 129,29 (Tanger), alors que la température minimale du mois le plus froid est située entre les valeurs de -3.6 (Ifrane) à 13,4 (Lagwira). Toutefois, selon Le Houerou (1989), ce quotient n’est pas très fiable en zone arides océaniques en raison de la faible amplitude thermique sur le littoral. La carte des bioclimats du Maroc, selon la classification d’Emberger, montre les étages suivants:

Étage per-aride

Il correspond au Sud et au Sud-ouest du Maroc pour 55% de superficie. Cet étage regroupe le Sud de la vallée de Ziz, les Hamadas et Ergs du Sud Marocain le long de l’Oued Drâa et le grand désert du Sahara occidental (Sud du Tronçon Goulmime-Errachidia), il se caractérise par une pluviométrie très faible ($P < 150\text{mm}$) avec un gradient Nord-sud assez prononcé en relation avec la variante thermique. Le nombre de mois secs est supérieur à 10. Cet étage se caractérise par une végétation climacique en forme de steppes rares et très éparées constituées de xérophytes bien adaptées au manque d’eau. L’extrême Sud à l’exception de la côte océanique, très chaud, est pratiquement désertique.

Les steppes ligneuses arides et sahariennes dominent et sont constituées de divers regroupements d’*Acacia raddiana*, *Acacia seyal*, *Balanites aegyptiaca*, *Anabasis aretioïdes*, *Euphorbia echunis*, *Euphorbia rejis-jubae*, *Euphorbia beaumierana*, *Rhustri partitum*, *Nitraria retusa*, *Tamaris articulata*, *Senecio anteuphorbium*.

Étage aride

Il correspond aux terrains en pente des versants Sud de l’Anti et du Haut Atlas y compris le sud de la vallée du Souss avec des altitudes comprises entre 800 et 1300m pour 13% de superficie. Cet étage regroupe également les deux grandes dépressions situées à l’intérieur du pays à savoir celle de la vallée de Moulouya en partant de Midelt jusqu’à Machrâa Hammadi et celle des Rhamna à partir de la ville d’Aït Ourir entre les rivières d’Oum Errabiâ et de Tensift jusqu’à la ville de Youssoufia parallèlement avec l’océan Atlantique. Cet étage se caractérise par une pluviométrie faible entre 150 à 350mm. Le nombre de mois secs est situé entre 8 à 11. Les variantes relatives à la température minimale du mois le plus froid sont liées plutôt à la continentalité en allant de la variante « très chaud » située sur les côtes de l’Atlantique et de la

Méditerranée vers celle « très froid » localisée aux abords des montagnes du Haut Atlas.

La végétation climacique de cet étage se compose d'espèces bien adaptées au manque d'eau mais plus denses et moins hétérogènes. Ainsi, au niveau des flancs océaniques de la région de Souss jusqu'à Sidi Ifni, caractérisées par des bioclimats arides très chauds à tempérés, la végétation ligneuse endémique est l'arganier, *Argania spinosa* en plus de *Acacia gummifera* et *Rhus tripartitum*.

Etage semi aride

Il correspond à l'ensemble du Maroc Atlantique Nord entre Bouznika et Agadir et son prolongement vers l'Est jusqu'à Taza, à la côte Méditerranéenne de El Jebha jusqu'à la frontière Algérienne et la région des hauts plateaux dont l'altitude varie de 1250 à 1400m en plus d'une bande de 20 à 140Km autour des montagnes de l'Atlas au dessus de l'étage aride. Cet étage qui occupe 22% de superficie est surtout dominé par les variantes « tempéré » à « froid » (80% de l'étage).

A signaler également la présence de cet étage au niveau de la chaîne de Saghro sur l'Anti Atlas sur des altitudes comprises entre 1800 à 2100m.

Concernant les précipitations, cet étage se caractérise par une pluviométrie variant entre 200 et 500mm, alors que le nombre de mois secs varie entre 5 à 7. La végétation climacique dominante est essentiellement composée à l'ouest de Matorrals de Thuya, *Tetraclinis articulata*, d'arganier, *Argania spinosa* et de forêts éparses de chêne liège, *Quercus suber*. Alors qu'au niveau des hauts plateaux c'est le domaine steppique, par excellence, de l'Alfa, *Stipa tenacissima*.

Etage subhumide

Il correspond aux zones de montagnes ou en pente du Moyen et du Haut Atlas dont l'altitude est supérieure à 700m au Nord du Moyen Atlas, 1000m au niveau du Haut Atlas et 1700 dans l'Anti Atlas. Cet étage forme un prolongement Nord Est à Sud Ouest en relation avec la chaîne de l'Atlas. Les variantes thermiques « chaud » et « tempéré » sont surtout localisées au niveau des versants Nord Ouest du Moyen Atlas sous une forme triangulaire entre les villes d'Oulmes, Zaouiât Chikh et Immouzer Kandar.

Au Nord, cet étage correspond à l'ensemble du nord de la rivière de Sebou sur la ligne de la ville de Taounate à Mehdia. Cet étage regroupe l'ensemble du bassin du Loukkos, se prolonge sur la côte Méditerranéenne jusqu'à la ville d'El Jebha et continue sur la côte Atlantique sous forme d'un bras océanique jusqu'à la ville de Bouznika au sud. Les variantes thermiques sont plutôt liées à l'exposition des versants par rapport aux influences humides océaniques, les régions ouest des versants étant plus arrosés et plus chauds.

Cet étage est caractérisé par des précipitations annuelles de 400 à 700mm et par un nombre de mois secs ($2T > P$) entre 3 à 5.

En altitude, la végétation caractéristique de cet étage

est le chêne vert, *Quercus ilex*. Cette espèce est répartie pratiquement sur l'ensemble de la chaîne de l'Atlas à partir des versants Sud du Haut Atlas au nord de la ville de Taroudant jusqu'au Parc National de Tazekka sur les hauteurs de la ville de Taza. D'autres espèces forestières sont aussi présentes dans cet étage tel que le cèdre, *Cedrus atlantica*, le chêne zène, *Quercus faginea*, le genévrier, *Juniperus thurifera* et le sapin, *Abies marocana*.

Par ailleurs, il est utile de signaler la présence aussi de cet étage au niveau de la chaîne de Bouiblanc y compris le versant Est du bassin de la Moulouya et sur les hauteurs de la chaîne de Zerhoune.

Etage humide

C'est l'étage exclusivement de montagne du Maroc (>700m), il occupe moins de 0,5% de la superficie totale du pays et se trouve essentiellement au niveau du Rif et du Moyen atlas et d'une manière très localisée au niveau du Haut Atlas sur des altitudes supérieures à 3000m. Les variantes « frais » et « tempéré » n'existent pratiquement qu'au niveau du Rif Occidental, alors qu'au niveau de l'Atlas c'est la variante « très froid » qui est dominante compte tenu de l'altitude et la continentalité.

Cet étage est caractérisé par des précipitations annuelles supérieures à 700mm et par un nombre de mois secs ne dépassant jamais 4.

Le climax de cet étage est formé par la cédraie qui, au niveau du Moyen Atlas, longe la ligne comprise entre Ifrane et Ain Louh en passant par Azrou et au niveau du Rif dans les zones de montagne entre Chefchaouen et Targuist. D'autres espèces sont aussi présentes tel que le chêne liège et le chêne vert.

Etage perhumide

Cet étage est localisé exclusivement sur les crêtes de la chaîne du Rif occidental (Monts Kelti et Bouhachem), sa surface est très faible (<5Km²) pour pouvoir parler d'un étage bioclimatique distingué au Maroc. La présence de cet étage est surtout liée à la diminution des températures sur sommets des montagnes et pas à une hausse significative des précipitations par rapport à l'ensemble du Rif occidental.

En générale, la représentation des formations végétales sur le climagramme d'Emberger (figure 5) permet de distinguer entre deux groupes d'espèces à savoir le cèdre et le chêne liège et un peu moins le thuya mieux adaptées aux climats humides et froids et le chêne vert moins exigeant en eau et plus adapté aux températures extrêmes (Tmin jusqu'à -14°C et Q2<100). Le genévrier est réparti sur des aires géographiques, plutôt limitées avec Q2 entre 23 et 51 et une température minimale entre -6,4 à 1.5°C.

Concernant l'Alfa, on note que son aire de répartition se présente sous forme d'un cône vertical limité à des valeurs de Q2 inférieurs à 85 et supérieures à 13 avec des températures minimales entre -13 à 8°C en fonction de la valeur de Q2. Ceci dénote que cette graminée pérenne est la mieux adaptée aux conditions d'aridité que l'ensemble des espèces étudiées à l'exception de l'arganier.

L'arganier est un arbre plutôt sensible aux températures froides extrêmes et n'existe pratiquement que sur les aires où la température minimale est supérieure à -4°C. Par contre, il est mieux adapté à l'aridité du milieu avec des valeurs minimales de Q2 pouvant atteindre 17 et toujours inférieures à 80. Le tableau suivant résume les exigences des six espèces forestières en plus de l'Alfa de point de vue température, bioclimats et altitude pour l'ensemble du Maroc.

Tableau 4 : Intervalles et limites des aires de répartition des principales formations forestières du Maroc

Espèces	Température Minimale °C	Q2 (Emberger)	Altitude maximal
Chêne vert	-14,8	25 à 100	4000
Chêne liège	-6,0	43 à 140	2320
Cèdre	-13,2	24 à 132	3650
Thuya	-9,7	26 à 118	2950
Genévrier	-6,4	23 à 51	2580
Arganier	-3,1	17 à 80	1930
Alfa	-12,6	13 à 84	3460



Figure 5 : Répartition bioclimatique des six espèces méditerranéennes sur le climagramme d'Emberger

L'ARIDITE

Indice bioclimatique d'Emberger

La carte bioclimatique d'Emberger pour l'ensemble du Maroc (Figure 4) montre que le climat présente un gradient d'aridité latitudinale de l'ordre de 8,6/100Km. Les régions les plus arides sont localisées à l'extrême sud du Pays avec des valeurs de Q2 de l'ordre de 2 (Saharien) alors qu'au niveau de l'extrême nord cet indice peut atteindre la valeur de 140 (Per-humide).

La différenciation des climats entre le per-humide et le saharien en se basant sur l'indice d'Emberger est mentionnée au niveau de la carte bioclimatique du Maroc basé sur le même indice avec la prise en compte de la variante relative à la température minimale du mois le plus froid (Janvier).

Indice d'aridité de De Martonne

La classification de l'indice De Martonne selon les quatre types de climat depuis l'humide jusqu'à l'hyperaride a permis de calculer la superficie relative de chaque climat sur l'ensemble du Maroc (figure 6).

Ainsi, selon cette classification, le climat hyperaride ($I < 5$) occupe un 53% de la superficie totale, suivi du climat semi-aride ($10 < I < 20$) avec 25%, puis du climat sub-humide ($I > 20$) et aride ($5 < I < 10$) avec environ 11% pour chacun des deux types de climats.

Tableau 5 : Importance des classes de climat selon l'indice de De Martonne

Classe	Types de climat	Pourcentage de la superficie totale
> 20	Humide et subhumide	11
10 à 20	Semi-aride	25
5 à 10	Arde	11
< 5	Hyperaride	53

Indice d'aridité de Bagnouls Gausson

Indice de Bagnouls Gausson Modifié

A défaut des données journalières de température et de précipitations nécessaires pour le calcul du coefficient K_i de chaque mois. En supposant l'existence d'une relation linéaire entre $2T_i - P_i$ et K_i , on a calculé K_i pour tout le pays en considérant pour le mois le plus sec (Juillet) et pour le pixel dont la valeur $2T - P$ est la plus faible correspond à un K_i minimum de 27 jours et sachant que $2T - P$ du mois de juillet varie de 72 à -3 et que sa valeur maximale est de 189, le modèle linéaire de calcul de K_i pixel par pixel et pour chaque mois devient comme suit:

- Si $2T - P \geq 0$ $K_i = 30$
- Si $2T - P < 0$ $K_i = 30 + \frac{27(2T - P)}{189}$

189

Pour valider les résultats obtenus concernant l'indice d'aridité de Bagnouls-Gausson, nous avons calculé sa corrélation avec

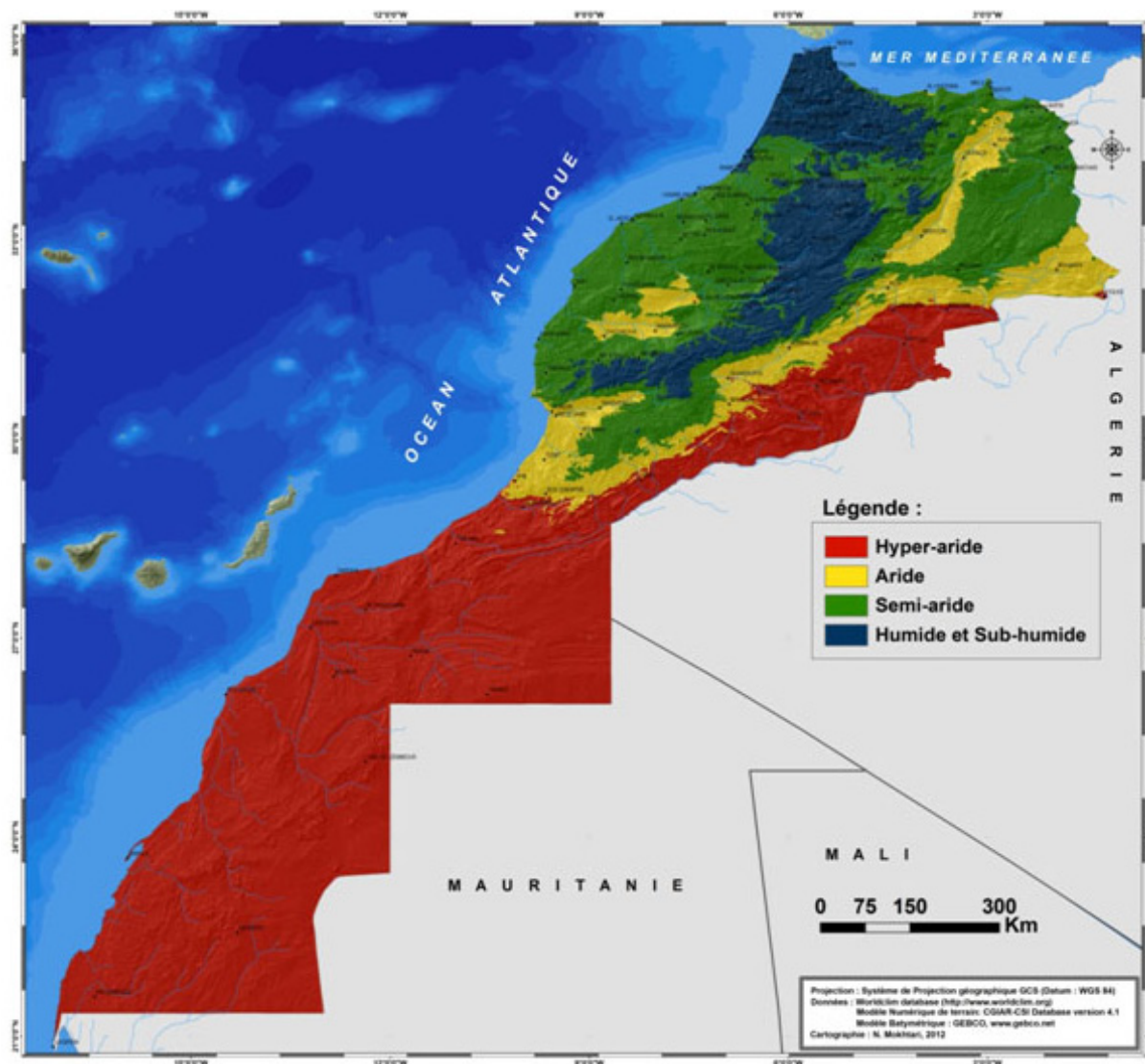


Figure 6 : Indice d'aridité de De Martonne

l'indice d'aridité UNEP (indice de référence) ($I = P/ETP$). Cet indice a été publié en ligne par le CGIAR-CSI sur la base des données Worldclim pour la même période. Ainsi, la corrélation linéaire entre les deux couches d'information est de -0.93 ce qui donne une assez bonne appréciation de la validité du modèle retenu pour le calcul de l'indice de Bagnouls-Gausson sur l'ensemble du Maroc.

Selon l'indice de Bagnouls Gausson Modifié on note que 49% de la superficie du Pays est caractérisé par un climat Hyperaride, 24% du semi-aride et 14% de l'aride et 13% de sub-humide et humide (tableau 6).

Tableau 6 : Importance des classes de climat selon l'indice de Bagnouls Gausson modifié

Classe	Climat	Pourcentage
< - 50	Humide et subhumide	13
- 50 à 150	Semi-aride	24
150 à 350	Aride	14
> 350	Hyperaride	49

Indice de Bagnouls Gausson simplifié

Pour palier aux conditions d'hypothèse concernant la

relation entre K_i et $2T_i - P_i$ relatifs au calcul de l'indice Bagnouls Gausson modifié, il est possible d'imaginer un indice BGI simplifié en se basant sur le déficit annuelle en demande évaporative de l'atmosphère ($2T - P$) et sur sa concentration annuelle à savoir la proportion des mois secs de l'année ($2T > P$) au lieu du calcul du déficit mensuel qui nécessite le calcul du coefficient K_i pour chaque mois (Nombre de jours). Ainsi, l'indice de Bagnouls Gausson simplifié peut s'écrire comme suit :

$$BGIS = (N + 1)/12 \cdot \sum_{i=1}^p (2T_i - P_i)$$

Où:

T_i : température moyenne du mois i en $^{\circ}C$;

P_i : précipitation moyenne du mois i en mm ;

N : nombre de mois où $2T > P$. (Mois Secs).

Le nombre de mois secs est calculé pour l'ensemble de l'année pixel par pixel en se basant sur la relation entre $2T$ et P . Si $2T$ est supérieure à P pour un pixel donné du mois la valeur 1 est affectée à ce pixel si non c'est la valeur 0. La somme des couches des mois de l'année permet d'extraire la carte du nombre de mois sec. Le calcul de l'indice simplifié peut être schématisé selon la figure 8.

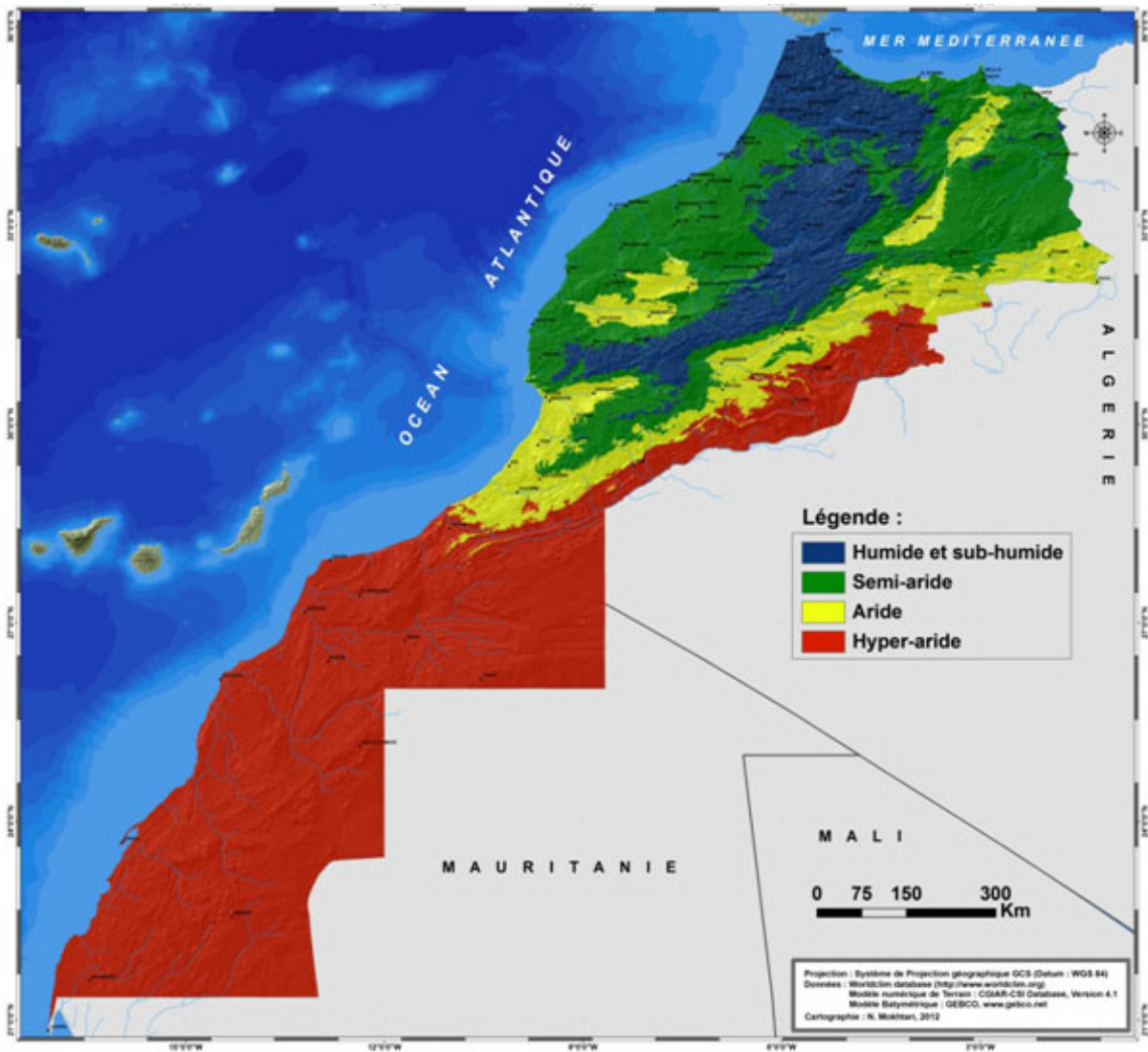


Figure 7 : Indice d'aridité de Bagnouls Gaussens Modifié

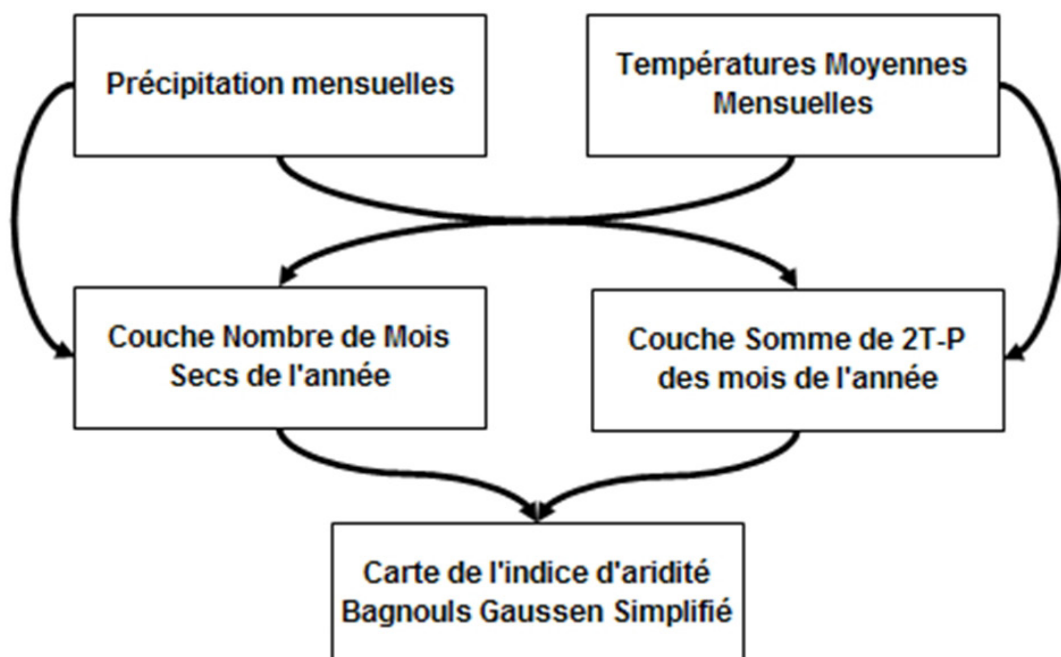


Figure 8 : Algorithme de calcul de l'indice d'aridité de Bagnouls Gaussens simplifié

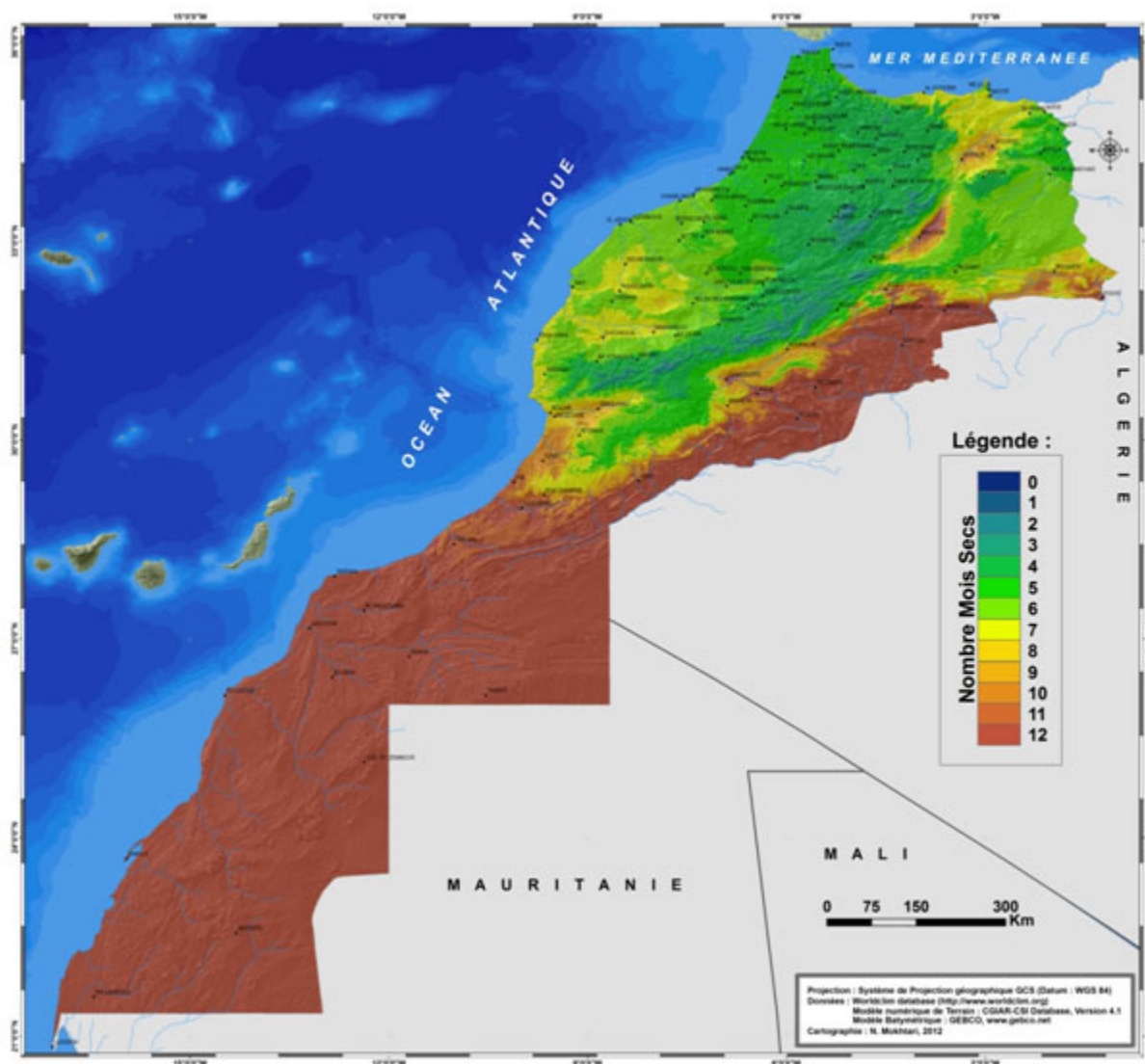


Figure 9: Carte du nombre de Mois secs

La carte du nombre de mois secs pour l'ensemble du Maroc (figure 9) montre que presque 52% du territoire présente 12 mois secs, alors que les zones où le nombre de mois secs ne dépasse pas 3 est de moins 0.5% ce qui témoigne de la grande aridité du milieu. Les régions où le nombre de mois secs ne dépasse pas 6 est d'environ 22% (tableau 7).

La carte relative à l'indice de Bagnouls Gausson simplifié (figure 10) montre que l'hyperaride occupe 53%, l'humide et le sub-humide se limitent aux régions du Nord-Ouest et des zones de montagne du Moyen et du Haut Atlas avec 12% de superficie alors que le semi-aride s'étend sur 27% de la superficie du Pays (tableau 8).

Indice d'aridité UNEP

La carte de l'indice d'aridité, P/ETP (figure 11), en considérant les normes de classification du climat en fonction des classes adoptés par l'UNEP montre que (tableau 9).

Selon cet indice, le climat Hyperaride occupe 45% du territoire suivi du semi-aride avec 30% et de l'aride avec 21%, le sub-humide et l'humide ne concernant que 4% de la superficie du pays.

Comparaison des différents indices d'aridité

Les cartes des différents indices d'aridité extraites pour l'ensemble du Maroc montrent une certaine hétérogénéité des étendus relatifs des différents types de climat, selon les différentes classes retenues par chacun des indices, en allant de l'hyperaride jusqu'à l'humide. Le tableau 10 résume les pourcents obtenus pour l'ensemble des indices d'aridité utilisés :

Ainsi, on note que l'hyperaride est compris selon les classifications entre 45 à 55%, l'aride entre 8 à 21%, le semi-aride entre 22 à 30% et le Sub-humide et l'humide entre 4 à 13%. En générale la classification UNEP, donne plus d'importance aux classes de l'aride et semi-aride au dépend du hyperaride et l'humide, alors que les autres classifications sont plus proches.

Selon, la matrice des corrélations linéaires (tableau 11), ces indices sont très fortement corrélés avec des coefficients de corrélations compris entre 0.88 à 0.98.

En général, l'indice d'aridité de Bagnouls Gausson modifié apparaît plus corrélé aux autres indices d'aridité que l'indice de Bagnouls Gausson Simplifié et on peut noter aussi que l'indice de De Martonne, indice le plus facile à calculer, donne une assez bonne estimation de

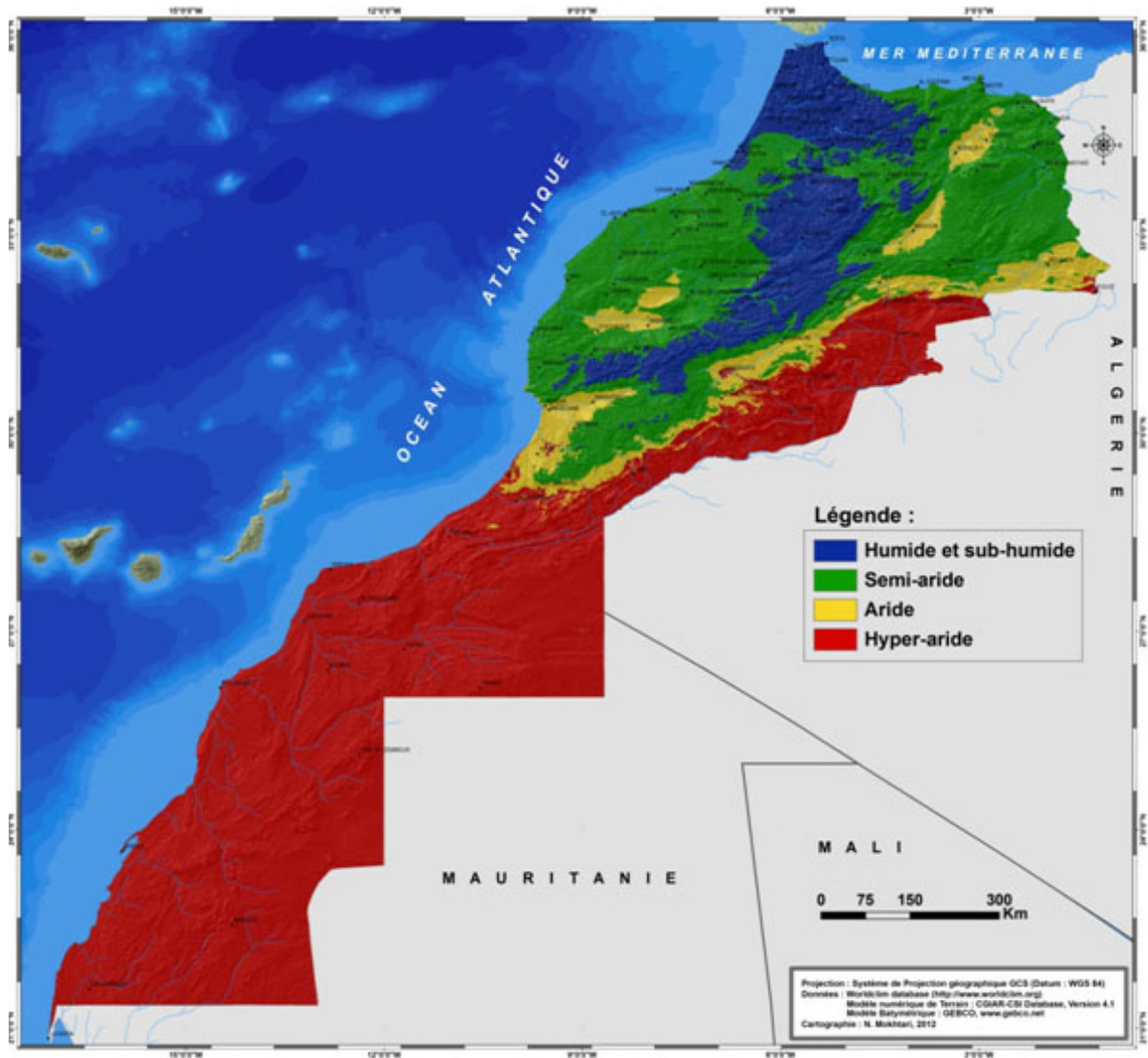


Figure 10 : Indice d'aridité de Bagnouls Gausson Simplifié

Tableau 7 : Importance spatiale du nombre de mois secs

Nombre de mois secs	< 3	3 à 6	6 à 9	9 à 11	12
%	0,34	21,53	20,28	6,3	51,55

Tableau 8 : Importance des classes de climat selon l'indice de Bagnouls Gausson simplifié

Classe	Climat	Pourcentage
< -60	Humide et subhumide	12
-60 à 110	Semi-aride	27
110 à 270	Aride	8
> 270	Hyperaride	53

Tableau 9 : Importance des classes de climat selon l'indice UNEP

Classe	Climat	Pourcentage
< 0,05	Hyperaride	45
0,05 à 0,2	Aride	21
0,2 à 0,5	Semi-aride	30
0,5 à 0,65	Sub-humide sec	3
> 0,65	Humide	1

l'aridité, sa corrélation linéaire avec l'ensemble des autres indices est toujours supérieure à 0.9.

Le modèle linéaire de régression pixel par pixel pour une grille de 5km² pour l'ensemble du Maroc entre l'indice de De Martonne et l'indice UNEP montre qu'il est possible d'estimer l'ETP à partir de l'indice de De

Martonne en s'appuyant sur la relation linéaire liant l'indice de De Martonne (P/T+10) et l'indice UNEP (P/ETP). L'ensemble des résultats des régressions linéaires pour l'ensemble des indices avec l'indice de De Martonne (Variable indépendante) est regroupé sur le tableau 12.

Les résultats obtenus montrent que les deux indices de

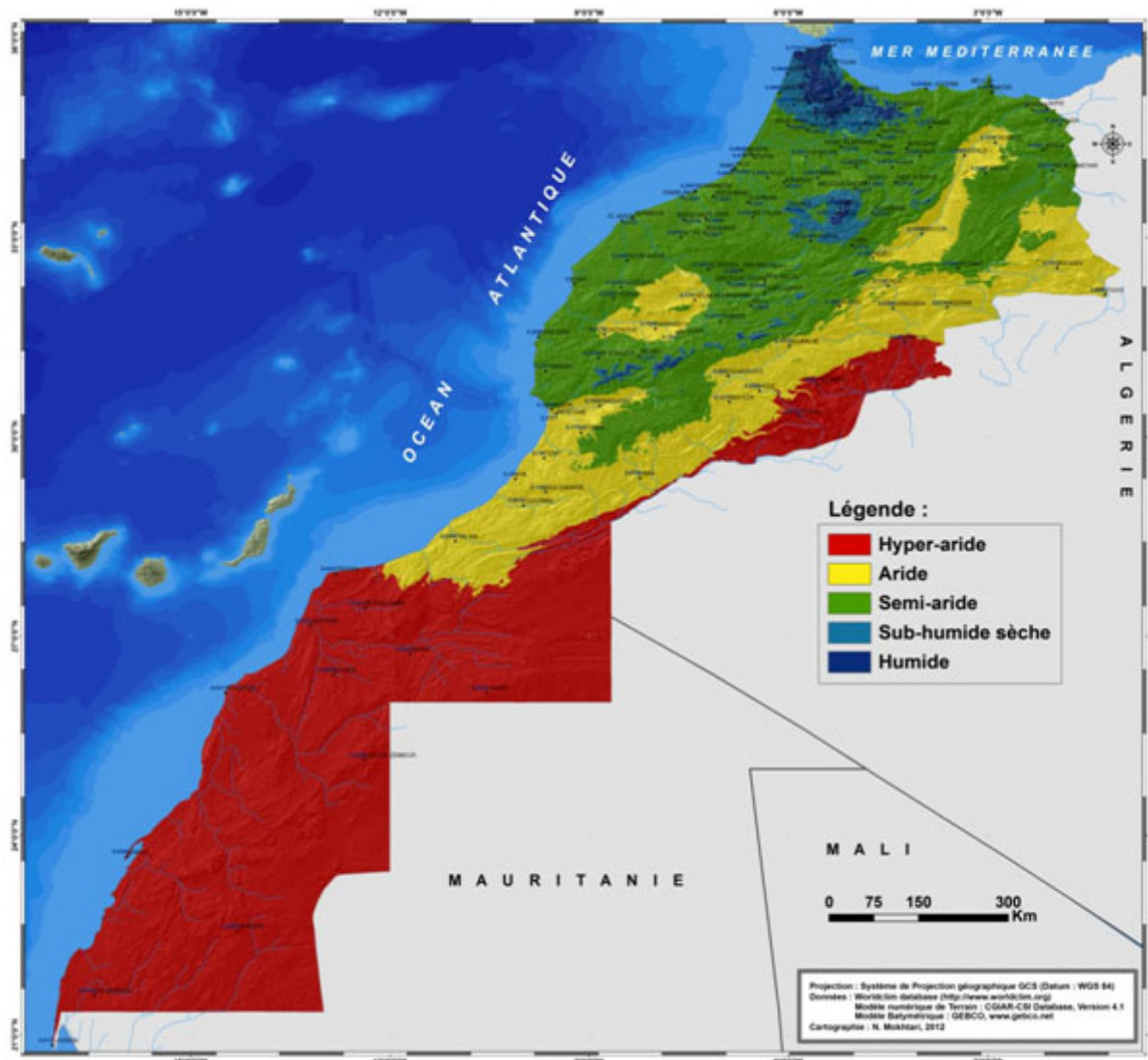


Figure 11 : Carte de l'indice UNEP (P/ETP)

Tableau 10 : Importance des classes de climat en fonction des différents indices d'aridité

Climat/Indice	EMBG	BGIM	BGIS	DEMAR	UNEP
Hyperaride	55	49	53	53	45
Aride	13	14	8	11	21
Semi-aride	22	24	27	25	30
Humide et Sub-humide	9	13	12	11	4

* EMBG : Emberger, BGIM : Bagnouls Gaussen Modifié, BGIS : Bagnouls Gaussen Simplifié, DEMAR : De Martonne

Tableau 11 : Matrice des coefficients de corrélation linéaire des différents indices d'aridité

	BGIM	BGIS	DEMAR	EMBG
BGIS	0,988			
DEMAR	-0,947	-0,912		
EMBG	-0,896	-0,895	0,931	
UNEP	-0,934	-0,916	0,982	0,980

Tableau 12 : Résultats des régressions linéaires des indices d'aridité avec l'indice de De Martonne

Indice	Constante	Pente	R ²
UNEP	0.006357 t = 149.76, P = 0.0000	0.017755 t = 5076.325, P = 0.0000	0.966
Log(BGIM)	6.91305 T = 12475.89, P = 0.0000	-0.041823 t = -922.819, P = 0.0000	0.959
Log(BGIS)	6.91394 T = 8625.378, P = 0.0000	-0.040247 t = -613.8763, P = 0.0000	0.913
EMBG	3.89948 T = 62.92815, P = 0.0000	2.508941 t = 495.0147, P = 0.0000	0.872

* EMBG : Emberger, BGIM : Bagnouls Gaussien Modifié, BGIS : Bagnouls Gaussien Simplifié, DEMAR : De Martonne
Log : Logarithme népérien.

Bagnouls Gaussien ont une tendance exponentielle par rapport à l'indice de De Martonne et que les relations linéaires obtenues sont fortement significatives avec des R² toujours supérieurs à 0.9 à l'exception de l'indice bioclimatique d'Emberger qui présente une moins forte corrélation.

Se référant à la relation entre l'indice de De Martonne et l'indice UNEP (indice de référence) exigeant d'estimation de l'ETP et compte tenu des coefficients de régression obtenus, il est possible d'adapter l'indice de De Martonne à l'indice UNEP en se basant sur les résultats de régression. Ainsi, l'indice d'aridité pouvant être utilisé pour l'ensemble du Maroc, comparable à celui de l'UNEP (~97% de la variance) et qui permet de s'affranchir de l'estimation de l'évapotranspiration potentielle peut être écrit comme suit (Coefficients*157):

$$\text{AIM} = 2,79.P/(T+10) + 1$$

CONCLUSION

Les résultats des analyses climatiques effectuées montrent que le Maroc est essentiellement un pays désertique avec 45 à 55% de la superficie, selon les indices, concernée par le climat l'hyperaride. Les régions arides, semi-arides et sub-humides potentiellement concernées par la désertification, occupent environ 42% de superficie.

La carte de l'indice bioclimatique d'Emberger a permis de classer les régions du Maroc en différentes zones bioclimatiques. Ainsi, ils s'est dégagé de la carte des bioclimats que l'ensemble du Sud Marocain y compris les flans sud de l'Anti Atlas, est classé en zone hyperaride avec les variantes allant du froid à très chaud. Par ailleurs, on distingue nettement les deux grandes dépressions à bioclimat aride tempéré à chaud, en relation avec la diminution localisée des précipitations, à savoir celles de la vallée de Missouri et des Rehamna (Axe Kalâa Sraghna-Marrakech-Chichaoua). On note aussi que l'étage per-humide n'existe que sous forme de petits îlots autour des crêtes de la chaîne du Rif avec des superficies ne dépassant pas les 5km². La variante du thermique en relation avec la température minimale du mois le plus froid est surtout liée à la continentalité par rapport aux effets océaniques et méditerranéens et en relation avec l'augmentation des altitudes.

La classification du climat basée sur le diagramme pluvio-

thermique de Daget permet de conclure que le Maroc est essentiellement un pays à climat méditerranéen fortement à moyennement contrasté sur plus de 84% du territoire. Le reste du pays (10% de superficie) est essentiellement à climat continental fortement contrasté.

La comparaison des différents indices d'aridité permet de conclure que l'indice de De Martonne, le plus facile à calculer, reste très satisfaisant pour des études de niveau national, sa corrélation linéaire avec l'ensemble des autres indices et particulièrement avec l'indice UNEP, basé sur l'estimation de l'ETP, est de l'ordre de 0.97.

Les résultats des régressions linéaires ont permis la spécification d'un indice d'aridité facile à calculer (AIM), valable à l'échelle du Maroc et comparable à l'indice UNEP permettant de s'affranchir de l'estimation de l'ETP.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Angot A. (1906). Etude sur le régime pluviométrique de la méditerranée. C.R. Congr. Soc. Sav.: 120-134.
- Bagnouls F. et Gaussien H. (1952). Les climats biologiques et leur classification, Ann. de Géog., n° 288
- Bagnouls F. et Gaussien H. (1953). Saison sèche et indice xéothermique. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse 88: 193-239.
- Birost P. (1953). La Méditerranée occidentale (in: Birost et Dresch, La Méditerranée et le Moyen Orient, coll. Orbis, Paris, P.U.F. t. 1).
- Born K., Piecha K. et Fink A. (2005). Zones de fluctuation du climat dans le nord-ouest du Maghreb, IMPETUS Atlas du Maroc, 13-14
- Capot-Rey R. (1951). Une carte de l'indice d'aridité au Sahara français (Bull. de l'Ass. Des Géogr. français, p. 73-76.
- Comité de Géographie du Maroc, (1958) Carte Forêts (Atlas du Maroc, planche n° 19), Rabat, Comité de Géographie du Maroc, 1958, 4 cartes planches en couleurs, établi par A. André, F. Joly sous la direction de A. Metro à ISC.
- Daget Ph. (1977). Le bioclimat Méditerranéen: Caractères généraux, modes de caractérisation. Vegetatio : 1-20.
- Dai A., Trenberth K.E. et Qian T. (2004). A global dataset of Palmer drought 765 severity index for 1870–2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. J. Hydrometeorol. 5, 1117–1130.

- De Martonne E. (1926). Aréisme et indice d'aridité. *Compt. Rend. Séances Acad. Sci.* 181 : 1395-1398
- Dubief J. (1950). Evaporation et coefficients climatiques au Sahara, *Trav. de l'Institut de Recherches Sahariennes*, t. VI. p. 13-44.
- Emberger L. (1931). Sur la formule climatique applicable en géographie botanique. *Compt. Rend. Séances Acad. Sci.* 191 : 389-390
- Emberger L. (1955). Une classification biogéographique des climats. *Rec. Trav. Lab. Bot. Zool. Fac. Sc de Montpellier* 7: 3-43.
- Floret C. et Pontanier R. (1984). Aridité climatique, aridité édaphique. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 131, Actual. Bot. 2/3/4, 265-275.
- Gausson H. (1954). Théorie et classification des climats et microclimats. *Actes VII Congr. Int. Bot. Paris*, pp. 125-130.
- Gavilan R. (2005). The use of climatic parameters and indices in vegetation distribution. A case of the Spanish Sistema Central. *Int. J Biometeorol*, 50:111-120
- Gorzinski W. (1920). Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la climatologie. *Geographic Annaler* 2 : 324-331.
- Hijmans RJ., Cameron SE., Parra JL., Jones PG. et Jarvis A. (2004). The WorldClim interpolated global terrestrial climate surfaces, version 1.3. Disponible sur <http://www.worldclim.org>
- Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Knippertz P., Christoph, M. et Speth, P. (2003). Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorol. Atmos. Phys.* 83, 67-88.
- Kosmas C., Gerontidis S.T., Detsis V., Zafirou T. H. et Marathianou M. (1999). Application of the MEDALUS methodology for defining ESAs in the Lesvos island. European Commission
- Lebourgeois F. et Piedallu, C. (2005). Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Rev. For. Fr.* LVII – 4: 331-356.
- Le Houerou H.N. (1989). Classification éoclimatique des zones arides (s.i.) de l'Afrique du Nord. *Ecologia Mediterranea*. XV (3/4) : 95-144.
- Maliha S. N., Deborah, J. C., William, G. K. & Samuel, S. (2008). Regional Assessment of Landscape and Land Use Change in The Mediterranean Region, Morocco Case Study (1981-2003). P.H. Liotta et al. (eds.), *Environmental Change and Human Security*, Springer Science + Business Media B.V. 143-165.
- Ozenda P. (1955). La température facteur de répartition de la végétation en montagne. *Ann. Biol.*, 31 (5-6), 295-312.
- Quezel P. (1979). La Région Méditerranéenne française et ses essences forestières. Signification écologique dans le contexte circum-méditerranéen. *Font Medit.* 1 (1): 7-18.
- Sauvage Ch. (1963). Le coefficient pluvio-thermique d'Emberger, son utilisation et la représentation géographique de ses variations au Maroc. *Ann. Ser. Phys. Globe Météo. Inst. SC.* Ch. 20: 11.
- Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Sabir, M., Attalah, S. et Aloui, A. (2011). Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Clim. Dynam.* 37, 237-252.
- Thorntwaite C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographic Review* 38: 55-94
- Trabucco A. et Zomer R.J. (2009). Global Aridity Index (Global-Aridity) et Global Potential Evapo-Transpiration (Global-PET) Geospatial Database. CGIAR Consortium for Spatial Information. Publié en ligne, disponible sur le Géoportail CGIAR-CSI à <http://www.csi.cgiar.org>.
- UNEP (1997) World Atlas of Desertification. Nick Middleton et Davis Thomas, London, Arnold pp : 182