

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université HADJ LAKHDAR  
Faculté des sciences de l'ingénieur  
Département d'hydraulique

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER en  
Hydraulique

Option : Construction hydrotechnique et environnement

## THEME

Calibrage spatial et temporel de quelques relations  
d'usage courant pour l'estimation de  
l'évapotranspiration de l'Algérie du Nord

Présenté par :

MAKHLOUFI ABDELHAMID

Ingénieur d'état en hydraulique

Devant le jury composé de :

Mr. BOUDOUKHA Abderrahmane	Professeur	U. Batna	Président
Mr. HOUICHI Larbi	MC/A	U. Batna	Rapporteur
Mr. AMARCHI Hocine	MC/A	U. Annaba	Examineur
Mr. BENKHALED Abdelkader	MC/A	U. Biskra	Examineur

2009 - 2010

## Remerciements

Avant tout, le grand merci au bon Dieu tout puissant qui m'a aidé le long de mon cursus d'étude.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à celui qui m'a aidé pour élaborer ce travail, Mr. HOUICHI Larbi, Maître de Conférences à l'université de Batna d'avoir accepté l'encadrement de ce travail et je veux le remercier bien pour ses conseils judicieux et sa disponibilité le long de l'élaboration de ce mémoire, ces recommandations qui m'ont permis de mener à bien ce modeste travail malgré ses empêchements.

Je tiens à remercier infiniment Mr. BOUDOUKHA Abderrahmane Professeur à l'université de Batna qui m'a fait l'honneur d'avoir accepté de présider le jury, qu'il reçoit d'avance mes sincères et profonds respects.

Mes remerciements à Mr. BENKHALED Abdelkader, Maître de Conférences à l'université de Biskra d'avoir accepté d'examiner mon modeste travail, à qui je lui adresse ainsi mon profond respect.

J'exprime ma reconnaissance à Mr. AMARCHI Hocine, Maître de Conférences à l'université d'Annaba pour sa volonté d'être présent en sa qualité d'examineur.

Je remercie sincèrement tous mes collègues qui m'ont aidé durant l'élaboration de ce mémoire.

Je ne saurais oublier à remercier infiniment Mr. Ouel Amara Arazki, chef de service de l'hydrologie au sein de l'ANRH, qui m'a généreusement facilité l'accès à la base de données qui a fait l'objet de traitement et analyse de mon travail.

Et enfin, mes remerciements distingués vont à mes parents pour leurs encouragements.

# TABLES DES MATIERES

Remerciements

Résumés

INTRODUCION GENERALE .....10

## Chapitre I

### Etude bibliographique

Introduction .....	12
I.1. Définition de l'évapotranspiration .....	12
I.2. Différents types de l'évapotranspiration.....	12
I.2.1. Evapotranspiration potentielle "ETP".....	12
I.2.2. Evapotranspiration maximale "ETM".....	13
I.2.3. Evapotranspiration réelle "ETR".....	13
I.3. Les facteurs déterminants de l'évapotranspiration .....	14
I.3.1. Température de l'air .....	14
I.3.2. L'insolation .....	14
I.3.3. La vitesse du vent .....	15
I.4. Méthodes de l'estimation de l'ET.....	15
I.4.1. Méthodes directes .....	15
I.4.1.1. Evapotranspiromètre ou case lysimétrique .....	15
I.4.1.2. Bacs d'évaporation .....	17
I.4.1.3. Evaporomètre Wild .....	18
I.4.1.4. Corps en porcelaine poreuse .....	19
I.4.1.5. Surface de papier humide "Evaporomètre Piche" .....	20
I.4.2. Méthodes indirectes .....	20
I.4.2.1. Formule de TURC .....	21
I.4.2.2. Formule de THORNTHWAITE.....	22
I.4.2.3. Formule de BLANEY-CRIDDLE .....	23
I.4.2.4. Formule de PENMAN ou formule dite : du bilan d'énergie .....	24
I.4.2.5. Formule de PENMAN modifiée.FAO.....	28
I.4.2.6. Ordre des paramètres et analyse en composantes principales .....	29
I.2.5. Formule dite ANRH.....	30
Conclusion.....	32

## Chapitre II

### Présentation de la zone d'étude

Introduction.....	33
II.1. Situation géographique.....	33
II.2. Climatologie .....	34
II.2.1. Température .....	35
II.2.2. La pluviosité .....	35
II.2.3. Les vents .....	36
II.2.4. L'humidité de l'air .....	36
II.2.5. La couverture végétale .....	36
II.3. Présentation des stations météorologiques.....	37
Conclusion .....	39

## CHAPITRE III

### CALCUL ET MODELISATION

INTRODUCTION .....	40
III.1. MATERIELS ET METHODES .....	40
III.2. CALCUL ET CALIBRAGE.....	41
III.3. ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION.....	43
III.3.1 Formule de Blaney-Criddle ancienne .....	43
III.3.1.1 démarches et calcul .....	44
III.3.1.2 exemple de calcul .....	45
III.3.2. Formule dite ANRH .....	48
III.3.2.1. Résultats des calculs et formulation .....	48
III.3.2.1.a. Aperçu sur la technique de Newton Raphson .....	48
III.3.2.1.b. Exemple de calcul .....	50
III.4. formule de BLANEY CRIDDLE MODIFIEE.....	57
III.3-1 Calcul et méthode.....	57
III.3-2 calcul et comparaison .....	59
III.4 Formule de Hargreaves .....	63
III.4.1 Démarches et principe de calcul.....	63
III.5 Formule de THORNTHWAITE .....	66
III.5-1 Démarches et calculs .....	66
III.5-1-2 Exemple de calcul .....	66
Conclusion .....	70

## Chapitre IV

### RESULTATS ET DESCUSSION

Introduction .....	71
IV. Visualisation des résultats .....	71
IV.1.1. Visualisation des nouveaux coefficients a et b issus de la relation initiale de B-C..	71
IV.1.2 Interprétation des résultats .....	86
IV.2 Réajustement de la formule de l'ANRH .....	88
IV.2.1 Visualisation des résultats « Coefficients Kss et Ksh » .....	88
IV.2.2 Cartographier des coefficients Kss et Ksh de l'ANRH .....	89
IV.2-3 Interprétation des résultats .....	91
IV.3 Introduction de la température effective à la formule de BCM .....	92
IV.3-1 Visualisation des résultats « Coefficients a et b» .....	92
IV.3-3 Interprétation des résultats.....	93
IV.4 Introduction de la notion de la température effective à la formule de Hargreaves.	93
IV.4.1 Visualisation des résultats « Coefficients a et b» .....	94
IV.4-3 Interprétation des résultats.....	94
IV.5 Concrétisation du calibrage de la formule de THORNTHWAITE.....	95
IV.5.1 Visualisation des résultats « Coefficients K» .....	95
IV.5.2 Cartographie des Coefficients «K» .....	95
IV.5.3 Interprétation des résultats .....	102
IV.6. Analyse et interprétation globales.....	102
Conclusion.....	109
CONCLUSION GENERALE .....	110

---

## LISTE DES FIGURES

Fig.1 : Case lysimétrique .....	16
Fig.2 : Bac d'évaporation Classe A.....	18
Fig.3 : Bac d'évaporation du Colorado .....	18
Fig.4: Evaporomètre Wild .....	19
Fig.5 : Atmomètre à sphère poreuse type « Livingston ».....	20
Fig.6 : Evaporomètre de Piche.....	20
Figure 7: Ordre des paramètres et analyse de la composante principale.....	30
Figure 8: Evolution du coefficient correctif mensuel .....	31
Figure 9 : Carte de situation de la région d'étude.....	34
Fig.10 : Répartition des valeurs de l'ET pour les deux séries.....	42
Fig11 : La droite de corrélation est sa valeur. Cas de la station Dar El-Beida Alger 2004.....	43
Fig.12 : l'organigramme des taches de calibrage.....	45
Fig.13 : Convergence vers la (racine $r$ ) par la méthode de N. Raphson.....	49
Fig.14: comparaison des trois formules après le calibrage.....	87
Fig.15: La droite de corrélation entre la formule d'ANRH <sub>m</sub> et PM. Cas de la station de Batna..	91
Fig.16: La droite de corrélation entre la formule d'ANRH <sub>m</sub> et PM.Cas de la station d'Annaba..	91
Fig.17: La droite de corrélation entre la formule de BCM et PM. Cas de la station d'Ain S. Batna.....	93
Fig.18: Disposition des ETP de Hargreaves initiale et Hargreaves modifié. Cas de la station de Batna-Ain Sekhouna.....	94
Figure 19: La droite de corrélation entre la formule de PM et THOR cas de la station Dar El- Beida. Alger.....	103
Figure 20: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna- ANRH INI.....	104
Figure 21: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna- ANRH MOD-.....	104
Figure22: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna- BCAJUS-.....	105

Figure23: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna- Hargreaves AJUS-.....	105
Figure24: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna -Thornthwaite AJUS-.....	106
Figure25: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Dar el Beida - ANRH INI-.....	107
Figure 26: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Dar el Beida - ANRH MOD-.....	108
Figure27: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Dar el Beida - BCAJUS-.....	108
Figure28: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Dar el Beida -Thornthwaite AJUS-.....	109

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs des coefficients a et b de l'équation $aF+b$ .....	24
Tableau 2 : Les valeurs de l'albédo en fonction du type de la surface.....	27
Tableau 3. Coefficients de corrélation entre les différents paramètres.....	29
Tableau 4. Coefficients correctifs régionaux (Kr).....	31
Tableau 5 : Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ANRH.....	32
Tableau 6. Les étages bioclimatiques en Algérie.....	35
Tableau 7 : les caractéristiques géographiques des stations.....	37
Tableau 8 : les moyennes interannuelles des paramètres climatologiques des stations.....	38
Tableau 9 : Valeurs d'erreur relative. Cas de la station Dar El-Beida.....	42
Tableau 10 : Caractéristiques géographiques de la station. Cas de la station Dar El-Beida.....	45
Tableau 11 : Calibrage des coefficients a et b du moi de janvier.....	46
Tableau 12 : Tableau des valeurs des coefficients a et b pour toutes les stations-mois.....	47
Tableau 14 : Exemple de calcul « cas de la station Dar el Beida –Alger.....	51
Tableau 15 : Tableau récapitulatif des coefficients saisonniers.....	57
Tableau 16 : Calibrage des coefficients a et b de la formule de B-C M pour tous les mois dans la station de Batna -Ain Sekhouna.....	59
Tableau 17: Tableau récapitulatif des coefficients a et b de la formule de B.C.M pour la station de Batna- Ain Sekhouna.....	63
Tableau 18: Exemple de calcul pour le mois de janvier .Cas de la station Batna-Ain Sekhoun65	
Tableau 19 : Tableau récapitulatif des coefficients obtenus. Cas de la station Batna-Ain Sekhouna .....	65
Tableau 20: Exemple de calcul sur le moisi de janvier. Station Batna-'Ain Sekhouna. Introduction de Teff.....	65
Tableau 21: Tableau récapitulatif des nouveaux coefficients obtenus. Cas de la station Batna- Ain Sekhouna.....	66
Tableau 22: Caractéristiques géographiques de la station Dar El-Beida (Alger).....	66
Tableau 23: Calcul de l'ETP mensuelle par THORNTHWAITE. Station Dar el Beidha.....	67
Tableau 24: Exemple de calcul du coefficient K de correction pour le mois de Janvier Cas de la station Dar El-Beida (Alger).....	69
Tableau25: Tableau récapitulatif des coefficients de correction K des stations considérées au Nord Algérien.....	70
Tableau 26: Récapitulation des performances des méthodes d'estimation de l'ETP envers celle de PM pour la station de Batna.....	104

Tableau27: Récapitulation des performances des méthodes d'estimation de l'ETP envers celle de PM pour la station de Dar el Beida.....107

## LISTE DES CARTES

Carte 1: Carte de coefficient a pour le mois de Janvier.....	73
Carte 2: carte de coefficient a pour le moi de Février.....	74
Carte 3: carte de coefficient a pour le moi de Mars.....	74
Carte 4: carte de coefficient a pour le moi d'Avril.....	75
Carte 5: carte de coefficient a pour le moi de Mai.....	75
Carte 6: carte de coefficient a pour le moi de Juin.....	76
Carte 7:carte de coefficient a pour le moi de Juillet.....	76
Carte 8: carte de coefficient a pour le moi d'Aout.....	77
Carte 9: carte de coefficient a pour le moi De Septembre.....	77
Carte 10:carte de coefficient a pour le moi d'Octobre.....	78
Carte 11:carte de coefficient a pour le moi de Novembre.....	78
Carte 12: carte de coefficient a pour le moi de Décembre.....	79
Carte 13:carte de coefficient b pour le moi de Janvier.....	79
Carte 14: carte de coefficient b pour le moi de Février.....	80
Carte 15:carte de coefficient b pour le moi de Mars.....	80
Carte 16: carte de coefficient b pour le moi d'Avril.....	81
Carte 17: carte de coefficient b pour le moi De Mai.....	81
Carte 18: carte de coefficient b pour le moi De juin.....	82
Carte 19: carte du coefficient b pour le moi De juillet.....	82
Carte 20:carte du coefficient b pour le moi d'Aout.....	83
Carte 21:carte du coefficient b pour le moi de Septembre.....	83
Carte 22: carte du coefficient b pour le moi d'Octobre.....	84
Carte 23: Carte du coefficient b pour le moi de Novembre.....	84
Carte 24: Carte du coefficient b pour le moi de Décembre.....	85
Carte 25:Carte représentative de la répartition du coefficient Kss sur le nord de l'Algérie.....	90
Carte 26:Carte représentative de la répartition du coefficient Ksh sur le nord de l'Algérie.....	90
Carte 27: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de janvier .....	96
Carte 28: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Février.....	96
Carte 29: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Mars.....	97
Carte 30: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois d'Avril.....	97
Carte 31: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Mai.....	98
Carte 32: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Juin.....	98
Carte 33: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Juillet.....	99
Carte 34: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois d'Aout.....	99
Carte 35: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Septembre.....	100
Carte 36: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois d'Octobre .....	100
Carte 37: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Novembre.....	101
Carte 38: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Décembre.....	101

## LISTE DES ABREVIATIONS

**ACP:** Analyse en Composantes Principales.

**ANRH:** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

**BCI:** Blaney Criddle Initiale.

**BCM:** Blaney Criddle Modifiée.

**EQ:** Erreur Quadratique.

**ET:** Evapotranspiration.

**ET<sub>0</sub>:** Evapotranspiration de référence.

**ETP:** Evapotranspiration Potentielle.

**ETR:** Evapotranspiration Réelle.

**ET<sub>HAR</sub>:** Evapotranspiration Calculée par la formule de Hargreaves.

**ET<sub>HAR.M</sub>:** Evapotranspiration Calculée par la formule de Hargreaves Modifiée.

**FAO:** Food and Agricultural Organization.

**NGA:** Nivellement Générale de l'Algérie.

**OMM:** Organisation Mondiale de Météorologie.

**ONM:** Office Nationale de Météorologie.

**PM:** Penmen Monteith.

## LISTE DES PRINCIPAUX INDICES

a: albédo	(%).
E : Tension maximale de la vapeur d'eau dans l'air	(millibars).
Ea: pouvoir évaporant de l'air	(millibars).
ETP: Evapotranspiration potentielle mensuelle	(mm).
F: Force évaporante	(mm/mois)
h : Durée d'insolation réelle	(heures).
H : Durée astronomique du jour	(heures/moi).
Hr: L'humidité relative moyenne de l'air	(%).
I: L'indice thermique	(-)
Ig : Radiation (insolation) solaire globale	(quelques calories/cm <sup>2</sup> /jour).
Iga: Radiation maximale Astronomique (théorique)	(quelques calories/cm <sup>2</sup> /jour).
Km : Coefficient mensuel	(-).
Kr : Coefficient régional	(-)
Qh : Flux de chaleur.	(-)
P: Durée d'éclairement	(%)
r: coefficient de corrélation	(%)
RN : Rayonnement net.	(-)
t : Température moyenne mensuelle	(°C).
T : Température	(°K).
T <sub>eff</sub> : la température effective	(°C).
U : Vitesse moyenne journalière du vent mesurée à 2 mètres au dessus de la surface	(m/s).
Y : l'ordonnée de Lambert	(Km).
Z : Altitude de lieu	(m).
$\sigma$ : Constante de Stephan-Boltzman	(cal/cm <sup>2</sup> /j).
$\Delta$ : Pente de la courbe de tension	(millibar/°Celsius).
$\gamma$ : Constante psychrométrique.	(-).

## RESUME

L'évapotranspiration est une composante très importante qui rentre en jeu dans le bilan hydrique, elle comprend deux termes essentiels : l'évaporation des surfaces du sol humide et des plans aquatiques ainsi que la transpiration physiologique des végétaux et des plantes.

Cette combinaison complexe de ce phénomène lui rend difficile à manipuler les valeurs exactes de ce dernier, cette complexité revient à l'absence des appareils sophistiqués qui nous permettent d'évaluer sans ambiguïté les valeurs de l'évapotranspiration; par conséquent le recours à l'utilisation des formules empiriques est devenu impératif, mais ces relations nécessitent parfois plusieurs paramètres climatiques pour avoir une exactitude souhaitable afin d'exploiter ces valeurs dans plusieurs disciplines notamment l'hydrologie, l'agriculture et la gestion des ressources en eau.

Dans cette contribution nous avons fait un calibrage spatial et temporel de quelques relations d'usage courant pour l'estimation l'évapotranspiration pour le cas du nord de l'Algérie, cette étude a pour objet de valoriser l'information thermométrique en se basant toujours sur la formule de *PEMEN MONTEITH* de référence et fournir une cartographie fiable et à usage facile.

\_\_\_\_\_ :

(الغطاء النباتي).

هذا الازدواج في المصطلح جعل منه ظاهرة معقدة و صعبة التقييم بسبب غياب أو نقص الآلات الفعالة للقياس الصحيح و الدقيق لهذه الظاهرة.

بيد أن العودة إلى استعمال العلاقات الرياضية المجردة و التجريبية أصبح ضرورة لا محيص عنها من أجل تقييم هذه الظاهرة، فهذه العلاقات تعتمد على عدة معطيات مناخية من بينها درجة الحرارة، سرعة الرياح، رطوبة الهواء و كذا عدد الساعات المشمسة في اليوم كما هو الحال في علاقة

"

"

### **Abstract:**

The evapotranspiration phenomenon is one of the hydrological quotients entered in the water cycle, it contains two parts: the first represents evaporation of saturated ground and aquatic areas, while the second terminology is transpiration, which is a physiological operation of the vegetal species.

This complicated permutation of this phenomenon has then specified one, when it was very complicated in reality computed. However, the obligation to return to many empirical relations for estimating this notion of water cycle becomes indispensable, but these relations required sometimes several climatic elements to attain exact results to use in evapotranspiration in various areas like hydrology, agricultural hydraulics and management.

In this research, we were calibrating some formulas commonly used to estimate the evapotranspiration data in month scale and geographic zone on north Algeria. Using Penman-Monteith reference formula, the calibration gives some maps characterized by an easy learning.

## INTRODUCTION GENERALE

La notion de l'évapotranspiration est très importante dans le domaine de l'agronomie et de la construction hydrotechnique, la certitude dans son évaluation a un impact évident dans le bilan hydrique et notamment dans la modélisation conceptuelle qui aboutit aux évaluations des ressources. Cependant la certitude de l'ETP nécessite la mesure de plusieurs paramètres en relations étroites avec sa valeur à l'échelle journalière et mensuelle, ce qui n'est pas le cas pour plusieurs stations de mesure où la température demeure l'unique paramètre à maîtriser. La collecte des données au niveau des stations climatologiques du nord de l'Algérie a encouragée d'aller plus loin dans l'idée de calibrage temporel à l'échelle mensuelle et spatial de quelques relations connues par le passé et à usage courant en vue de leur adaptation aux conditions climatiques de la zone d'étude. La présente étude prendra en charge le calage des paramètres formant diverses formulations et fournira en conséquence une cartographie à usage facile et pratique de l'ETP en tous points de la zone en question dépourvue de moyens de mesure.

La détermination de la valeur exacte de la quantité d'eau évapotranspirée par les instruments de mesure directe (lysimètres, bacs de l'évapotranspiration,..) nécessite un personnel d'autant qualifié outre les moyens de mesure très sophistiqués, mais malheureusement ce n'est pas toujours le cas car la mesure de la température, la vitesse des vents, l'humidité de l'air, l'insolation...etc, échappe souvent à la maîtrise..

Pour cela, la nécessité de déterminer l'ETP par des méthodes de calcul indirecte par le biais des formules fournies par plusieurs auteurs, s'avère très utile.

Plusieurs formulations ont été proposées par les auteurs durant le XX<sup>ème</sup> siècle, mais chacun a adopté sa formule pour certaines régions bien déterminées, ce qui mène à apporter souvent des coefficients d'ajustement adoptés pour la région concernée.

Dans le présent travail, nous allons faire recours à ces formules d'usage courant pour estimer l'évapotranspiration potentielle pour le cas du nord de l'Algérie, à savoir : Penman-Monteith, Thornthwaite, Blaney-Criddle, dite ANRH et Hargreaves.

Puis, il devient impératif de comparer les résultats de ces modèles avec les valeurs obtenues par l'application de la formule de Penman-Monteith de référence c'est la phase qualifiée de calage ou calibrage.

L'objectif souhaité est d'essayer d'avoir une cartographie représentative de certains coefficients d'usage courant pour l'estimation de l'évapotranspiration pour la zone d'étude citée avec des coefficients correctifs correspondants pour chaque secteur et chaque formule et d'en tirer en finalité des conclusions constructives et de perspectives pour les études ultérieures.

# CHAPITRE I

## ETUDE BIBLIGRAPHIQUE

### Introduction

Les estimations relatives à l'évaporation des nappes d'eau libre du sol, ainsi que la transpiration des végétaux, revêtent une grande importance dans les études hydrologiques.

La détermination de l'évapotranspiration avec une précision suffisante est un problème commun à ceux qui, à titres divers (Agronomes, Hydrologues, Météorologistes), s'occupent des problèmes de gestion des ressources en eau, des liaisons entre consommation en eau et production végétale (Bouchet et Robelin 1969 ; Puech et al.1976) ou de la dépendance de l'ET à l'égard des facteurs climatiques et des caractéristiques de régulation des couverts végétaux (Katerji et Perrier 1983).

Les moyens techniques actuels ne permettent pas encore de mesurer directement l'évaporation et l'évapotranspiration sur de très grandes surfaces. On a cependant mis au point plusieurs méthodes d'évaluation indirecte qui fournissent des résultats acceptables. (*Guide pratique hydrologique p134*).

Pour ces raisons et autres, on doit recourir à ce phénomène par définitions, ce qui fait l'objet de présent chapitre.

### I.1. Définition de l'évapotranspiration

Le phénomène de l'évapotranspiration ; est un phénomène hydrologique trop compliqué à cause de sa difficulté à gérer, Il traduit la quantité de l'eau perdue par l'intermédiaire d'un processus combiné de l'atmosphère et les plantes (physio-énergétique) donc il comprend deux termes : évaporation et transpiration.

***Evaporation*** : est l'ensemble des phénomènes de transformation de l'eau en vapeur par un processus spécifiquement physique.

***Transpiration*** : est le phénomène physiologique de la transformation de l'eau en vapeur par les êtres vivants notamment les végétaux.

### I.2. Différents types de l'évapotranspiration

#### I.2.1. Evapotranspiration potentielle "ETP"

C'est une valeur de l'évapotranspiration maximale de référence pouvant représenter la demande climatique. On la définit comme l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, contenu et homogène dont l'alimentation en eau n'est pas exacte et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique. L'ETP ainsi définie correspond,

sensiblement, à l'évapotranspiration d'une herbage ou d'un gazon en pleine croissance (mais non épié), fauché régulièrement, correctement fumé et bien enraciné, sur un sol maintenu à une humidité proche de la capacité au champ (mais sans excès d'eau).

Thornthwaite a défini l'évapotranspiration potentielle comme étant «la perte d'eau qui se produirait pour les besoins de la végétation couvrant un sol bien alimenté en eau». Penman a proposé que cette définition soit modifiée et qu'il y soit précisé que la surface du sol soit entièrement couverte d'une végétation riche. Ainsi modifiée, cette définition est en général satisfaisante, mais elle perd tout son sens en hiver sous les latitudes septentrionales.

Penman recommande que l'évaporation annuelle d'eau libre calculée selon ses propres équations soit multipliée par un facteur de 0,75 (variant de 0,8 en été à 0,6 en hiver) pour obtenir la valeur de l'évapotranspiration potentielle. Dans certaines conditions, l'évapotranspiration potentielle peut être égale à l'évaporation d'une surface d'eau libre. Dans certaines applications, l'évaporation d'une étendue d'eau libre peut être utilisée comme un indice de l'évapotranspiration potentielle, par exemple dans l'étude des conditions d'humidité du sol, à des fins de prévision d'approvisionnement en eau. (*Guide des pratiques hydrologiques « chapitre 38, page 543, édition WMO-N 168 »*)

Le terme d'ETP a une large utilisation dans plusieurs domaines de l'agriculture et de l'hydrologie tels que l'irrigation, la modélisation agro- météorologique et la modélisation hydrologique.

### **I.2.2. Evapotranspiration maximale "ETM"**

C'est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif donné et dans des conditions climatiques données c'est-à-dire la couverture végétale n'est pas nécessairement totale.

### **I.2.3. Evapotranspiration réelle "ETR"**

C'est l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans des conditions réelles données : l'alimentation en eau de la plante peut être limitée par des conditions d'ordre physique (suction du sol), chimique (concentration des solutions), biologique (régulation stomatique) (**C.T.G.R.E.F.**).

L'effet d'un déficit d'humidité dans le profil du sol constitue un élément important dans les relations entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle. Il y a peu de doute que la vitesse de ressuyage d'une zone hétérogène initialement saturée décroît avec le temps, de façon approximativement logarithmique, en raison des variations de la profondeur d'enracinement et de la densité de la zone d'enracinement, de la pente et de l'état de la surface du sol, etc.

### **I.3. Les facteurs déterminants de l'évapotranspiration**

Plusieurs paramètres qui entrent en jeu dans le phénomène de l'ET, ces facteurs peuvent conditionner l'évolution dans le temps et dans l'espace, mais on peut le regrouper en deux catégories bien distinctes suivant qu'ils sont propres à l'atmosphère ou à la surface mise en évaporation elle-même :

- Les paramètres caractérisant l'état de l'atmosphère au voisinage de la surface évaporante et son aptitude à provoquer l'évaporation ; ces paramètres régissent le pouvoir évaporant de l'atmosphère (évapotranspiration potentielle).

- Les paramètres caractérisant la nature et l'état de la surface évaporante (surface d'eau libre, neige, glace, sol nu, végétation) ainsi que son aptitude à alimenter l'évaporation et à répondre plus ou moins rapidement aux variations du pouvoir évaporant de l'atmosphère.

Les principaux facteurs du pouvoir évaporant sont :

- La température de l'air.
- Degré hygrométrique ou pression de vapeur d'eau de l'air.
- L'insolation.
- La vitesse du vent.

#### **I.3.1. Température de l'air**

La tension de vapeur saturante de l'eau croît avec l'augmentation de la température de celle-ci. Le taux d'évaporation est donc, pour un même déficit hygrométrique de l'air, une fonction croissante de la température de l'eau ou de la surface évaporatoire.

Lorsqu'on mesure la température de l'air, il faut s'assurer que les thermomètres sont placés à l'abri du soleil, sans que pour autant leur ventilation naturelle s'en trouve diminuée. Des écrans spéciaux contre le rayonnement ont été conçus pour les thermomètres à thermocouples.

#### **I.3.2. Degré hygrométrique ou pression de vapeur d'eau de l'air**

L'humidité de l'air ou le degré hygrométrique de l'air, est un élément très important, représente la proportion de vapeur d'eau contenu dans l'atmosphère par rapport à la quantité maximale qui peut être fixe à une température considérée.

Les mesures du degré hygrométrique de l'air sont effectuées au même endroit que les mesures de la température, Les appareils les mieux adaptés pour l'enregistrement sont des psychromètres.

#### **I.3.3. L'insolation**

Le rayonnement solaire est l'un des facteurs primordiaux qui intervient dans le phénomène de l'évapotranspiration, sous l'action des rayons pénétrés à travers l'atmosphère vers la surface mise en évaporation.

L'évaporation absorbe de la chaleur qui est fournie principalement par le rayonnement solaire transformé plus ou moins sélectivement en énergie calorifique par la surface évaporante.

Dans les grandes nappes d'eau par exemple, l'échauffement des couches profondes absorbe, au printemps et au début de l'été, une partie de la chaleur incidente qui n'est plus disponible pour l'évaporation; inversement, en automne et en hiver, la chaleur ainsi emmagasinée vient augmenter l'évaporation que produirait le seul rayonnement solaire.

Pour mesurer le rayonnement de grandes longueurs d'onde, on utilise des radiomètres à plaque. Ces appareils ne sont pas sélectifs : ils mesurent tous les rayonnements, quelle que soit leur longueur d'onde.

#### **I.3.4. La vitesse du vent**

Le vent assure le renouvellement de l'air plus ou moins saturé au contact de la surface évaporatoire par de nouvelles couches ayant une température et une humidité généralement plus faibles. Il favorise donc l'évaporation, d'autant plus que sa vitesse et sa turbulence sont grandes ; toutefois, si ces paramètres atteignent une valeur limite au dessus de laquelle la vapeur d'eau est dispersée au fur et à mesure de sa formation, tout accroissement de ceux-ci, au-delà de cette limite, sera sans effet (G. Réméniéras).

On utilise en pratique un radeau ancré sur lequel sont fixés les appareils nécessaires. N'importe quel type d'anémomètre capable de mesurer ou d'enregistrer à distance fournira des indications suffisantes sur la vitesse moyenne journalière du vent.

#### **I.4. Méthodes de l'estimation de l'ET**

L'estimation de la valeur exacte et réelle de l'évapotranspiration reste toujours le but des chercheurs (agronomes, hydrologues, et les ingénieurs hydrauliciens). Plusieurs méthodes ont été utilisées pour calculer ou estimer la valeur de l'ET. Mais en générale il existe deux méthodes qui nous permettent de connaître cette composante essentielle du bilan hydrique surtout dans les domaines d'irrigation ainsi que la gestion des ressources hydriques ; dans notre étude il s'agit de la valeur de l'ET climatique (régionale).

En outre, on peut classer ces méthodes en deux types parues qui sont :

- La méthode directe « instruments et appareils »
- La méthode indirecte « utilisation des formules empiriques ».

##### **I.4.1. Mesure directe**

###### **I.4.1.1. Evapotranspiromètre ou case lysimétrique**

L'évaporation peut être mesurée en une station avec tous les autres termes du bilan hydrique dans un dispositif appelé lysimètre ou évapotranspiromètre qui empêche les mouvements latéraux et permet de mesurer l'infiltration profonde. Les apports (pluie, irrigation) sont

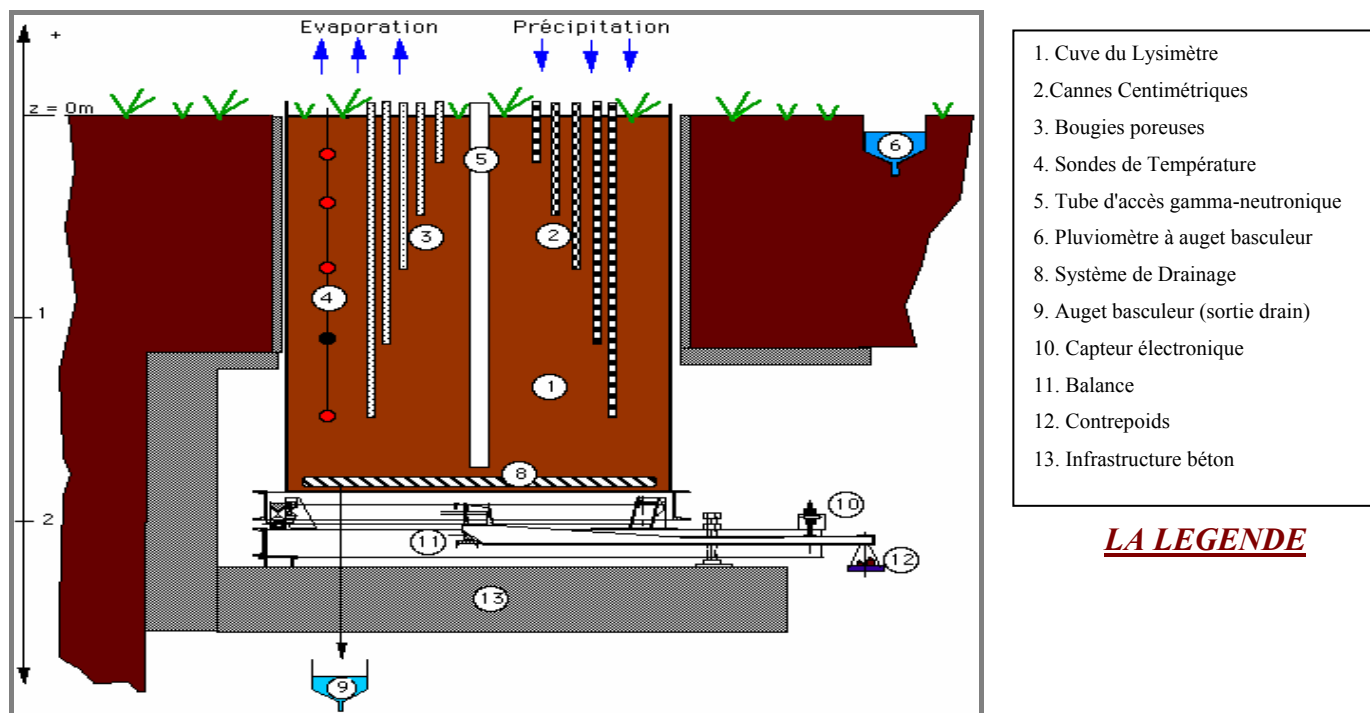
également mesurés ainsi que l'humidité aux différentes profondeurs. Il est alors possible d'évaluer les variations de stock d'eau et l'évapotranspiration.

Ces dispositifs sont coûteux et difficile à gérer. Il est donc réservé aux stations de recherche et aux installations importantes d'irrigation disposant de techniciens qualifiés. Il s'agit d'une cuve enterrée placée au milieu d'une parcelle irriguée, qui sert d'anneau de garde, et dans laquelle on reconstitue un sol recouvert de la même culture dans les mêmes conditions. La culture dans la cuve est arrosée avec un léger excès d'eau, et l'eau de drainage est récupérée au moyen d'un tuyau se déversant dans un bac de récupération (Fig n°1).

La détermination de l'ETP à partir des mesures sur l'évapotranspiration se fait par différence entre les apports et les pertes

$$ETP = \text{pluie} + \text{Irrigation} - \text{Drainage} \pm \Delta R$$

Les variations de réserve du sol ( $\Delta R$ ) seront négligeables en valeur relative si l'alimentation en eau est régulière, et si la période de calcul est suffisamment longue (une semaine à dix jours au minimum).



**LA LEGENDE**

*Figure 1 : Case lysimétrique.*

### a. Mise en œuvre de la case lysimétrique

La mise en œuvre d'une installation de mesure de l'ETP doit être doté d'un certain nombre de conditions, si l'on veut aboutir à des résultats acceptables dont les plus importants sont:

- ✓ Le site de la zone irriguée doit être dégagée et représentative de la région étudiée, suffisamment éloignée de tout objet susceptible de perturber le rayonnement, le régime de turbulence, ou les échanges advectifs (bâtiments, relief, plan d'eau,...).
- ✓ L'environnement doit être homogène, de 1000 m<sup>2</sup> de surface.
- ✓ l'irrigation et l'entretien doivent être réguliers.
- ✓ La surface de la cuve: doit être de 2 à 3 m<sup>2</sup> au minimum.
- ✓ Le remplissage de la cuve se fait d'une manière que le sol doit être suffisamment filtrant, meuble, sans risques d'immersion.
- ✓ La végétation doit présente le moins possible de limitations d'évapotranspiration d'ordre physiologique. On choisit habituellement des graminées fourragères ou de gazon.

### **b. les mesures effectuées sur les cases lysimétrique**

L'irrigation doit être journalière, la fertilisation et les coupes régulières, les bilans doivent être établies sur des périodes de manière à avoir  $\Delta R = 0$  ( $\Delta R$  est mesuré, soit par pesée de la case lysimétrique, soit par mesure neutronique). La précision des mesures obtenues avec une case lysimétrique est le plus souvent de l'ordre de **10%**, même avec une conduite soignée. Par contre, le moindre laisser-aller peut aboutir à des distorsions de l'ordre de 30 % à 40%, ou plus. Ce n'est qu'avec des cases lysimétriques pesés que l'on peut atteindre des précisions de l'ordre du **1/2 mm** d'évaporation (pesée piézométrique ou dynamométrique), ou même de l'ordre de **0.05 mm** d'évaporation (pesée par bascule mécanique). Seuls de tels dispositifs peuvent permettre d'envisager des mesures d'ETP pour des périodes de 24 h, ou même de suivre l'évolution de l'ETP au cours de la journée (C.T.G.R.E.F).

#### **I.4.1.2. Bacs d'évaporation**

Malgré l'intérêt évident de leur normalisation, les bacs d'évaporation utilisés dans les divers pays sont de formes, de dimensions et de caractéristiques différentes, car les spécialistes ne sont pas d'accord sur le meilleur type à employer.

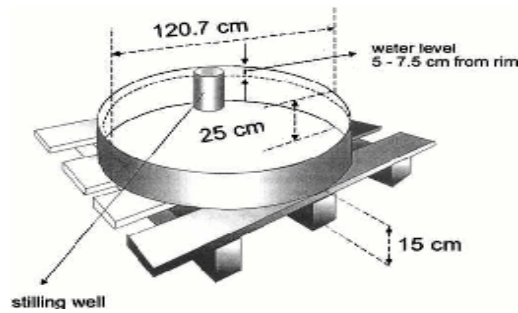
On peut classer ces appareils en trois catégories suivant qu'ils sont disposés à la surface du sol, enterrés dans celle-ci ou installés de façon à flotter sur une nappe d'eau.

##### **a. Les bacs placés au-dessus du niveau du sol " Bac classe A "**

Ces bacs présentent l'avantage d'une installation très simple et leurs résultats ne risquent pas d'être faussés par le rejaillissement des gouttes de pluie qui tombent sur le terrain avoisinant, par contre, ils sont très sensibles aux variations de la température de l'air et aux effets de l'insolation.

Le bac dit "Classe A", utilisé par Weather bureau, U.S.A" est constitué d'un cylindre métallique de 120.7 cm de diamètre et de 25.4 cm de hauteur. Dans ce cylindre, on maintient une

épaisseur d'eau de 17.5 à 20 cm. Le cylindre est supporté par un support à 15 cm du sol. Le support doit permettre une bonne aération sous le bac (ANRH – Juin 2002).

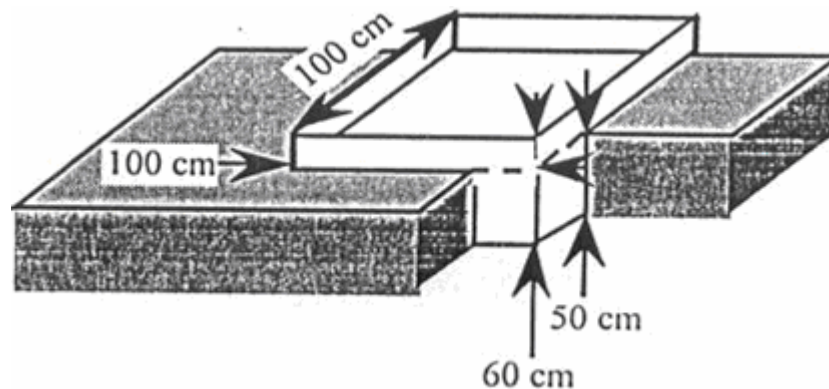


**Figure 2 : Bac d'évaporation Classe A.**

### b. Les bacs enterrés "Bac colorado"

Ces bacs sont moins sensibles aux influences de la température ambiante et du rayonnement solaire sur les parois, mais bien que leur bord dépasse le niveau du sol d'environ une dizaine de cm. Les gouttes de pluies ayant rebondi sur le sol et les débris qu'ils recueillent peuvent être la cause d'erreurs de mesure.

Le bac " colorado " enterré se présente sous la forme d'un parallélépipède, dont la section droite est un carré de 100 cm de côté, sa profondeur est de 60 cm ; il est enterré de 50 cm (ANRH – Juin 2002) (fig n°03).



**Figure 3 : Bac d'évaporation du Colorado**

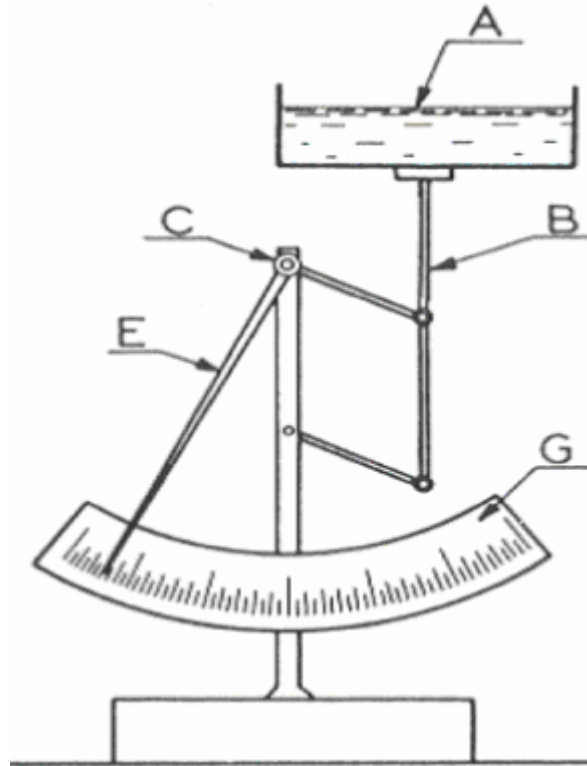
### c. Les bacs flottants

Ces bacs sont particulièrement utilisés quand on veut étudier l'évaporation de grandes surfaces d'eau (lacs ou rivières). Leur installation peut être difficile (problèmes d'amarrage et de stabilité sur un plan d'eau de niveau variable). Les mesures sont évidemment moins aisées qu'à terre et sont trop souvent faussées les jours où il y a de grand vent par l'eau introduite dans le bac par les vagues ou déversé sous l'action des mouvements de roulis (G.Rémériéras).

#### I.4.1.3. Evaporomètre Wild

Il est constitué par une balance du type "pèse-lettres" dont le plateau supporte un petit bassin contenant de l'eau (surface : 250 cm<sup>2</sup> ; profondeur : 35 mm), on note ou on enregistre les variations de poids du bassin (voir fig n° 04).

Il présente deux principaux inconvénients : le volume d'eau est très faible et le rôle thermique des parois est prépondérant, le vent peut faire osciller le bassin et fausser les mesures. (G. Réméniéras).



*Figure 4: Evaporomètre Wild*

#### **I.4.1.4. Corps en porcelaine poreuse**

Ceux sont des sphères, des cylindres ou des plaques de porcelaine blanche poreuse saturée d'eau. Le taux d'évaporation d'un tel système est parfois considéré comme celui des plantes. A titre d'exemple, le schéma de l'atmomètre de Livingston.

C'est une sphère creuse de porcelaine poreuse d'environ 5 cm de diamètre et d'un centimètre d'épaisseur. Cette sphère est remplie d'eau distillée provenant d'un réservoir gradué qui assure en permanence l'alimentation de la sphère et permet la mesure du volume d'eau évaporée. (G.Réméniéras) (fig n° 05)

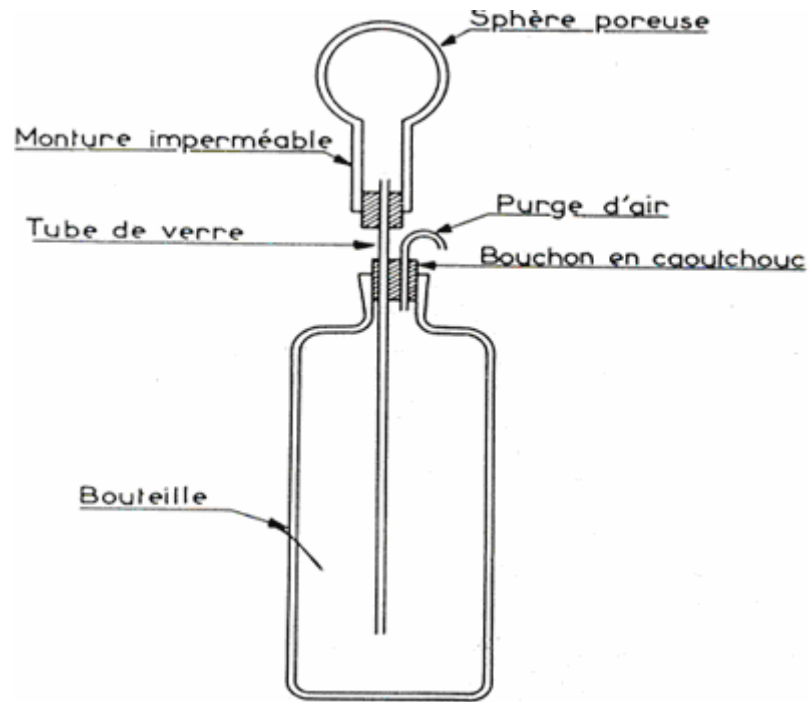


Figure 5 : Atmomètre à sphère poreuse type « Livingston »

#### I.4.1.5. Surface de papier humide "Evaporomètre Piche"

Il est constitué par un tube cylindrique en verre en forme de U de 25 cm de long et 1.5 cm de diamètre. Ce tube gradué est fermé à sa partie supérieure, tandis que son orifice inférieur est obturé par une feuille circulaire de papier filtre normalisé de 30 mm de diamètre et 0.5 mm d'épaisseur fixée par capillarité et maintenue par un ressort. L'appareil ayant été rempli d'eau distillée, celle-ci est évaporée progressivement par la feuille de papier filtre. La diminution du niveau de l'eau dans le tube permet de calculer le taux d'évaporation. (G.Réméniéras)

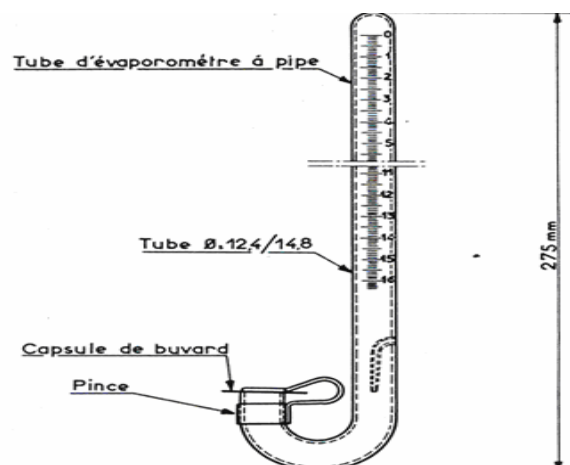


Figure 6 : Evaporomètre de Piche.

#### I.4.2. Méthodes indirectes :

Vu la complexité de la mise en œuvre d'un dispositif de mesure de l'ETP et à défaut de mesures directes, il est toujours préférable d'utiliser à des méthodes d'estimation. On dispose en

effet actuellement de formules et de méthodes suffisamment variées, et adaptées à différents climats. De plus, une bonne estimation vaut mieux qu'une mauvaise mesure. Nous allons essayer de passer en résumé les principales formules d'estimation de L'ETP.

#### I.4.2.1. Formule de TURC

L.Turc rechercha à partir de 1945 une expression algébrique représentant au mieux l'évaporation mensuelle et même décadaire observée sur les cases lysimétrique de Versailles, Rothamsted, Groningen et d'autres stations situées en Ecosse, en Afrique du Nord et aux Indes. Il aboutit ainsi, vers 1953, à une formule complexe donnant l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'insolation et de la température.

En 1962, L.Turc a proposé les formules simplifiées suivantes (A. Halimi):

- 1) Lorsque l'humidité relative mensuelle est supérieure à 50%, on peut évaluer avec une approximation suffisante l'évapotranspiration potentielle mensuelle d'un périmètre irrigué par la formule suivante :

$$ETP = \frac{0.40(Ig + 50)t}{t + 15} \quad (1.1)$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

Ig : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale (quelques calories/cm<sup>2</sup>/jour).

t : Température moyenne mensuelle du mois considéré (°C).

Le coefficient 0.40 est le résultat du produit 0.013 j

Donc:

- Pour le mois de 31 jours on a : 0.013 x 31 = 0.40
- Pour le mois de 30 jours on a : 0.013 x 30 = 0.39
- Pour le mois de février le coefficient est 0.37

La radiation solaire globale n'est mesurée qu'en un petit nombre de stations on devra souvent l'évaluer à partir de la radiation maximale théorique Iga, calculée d'après les données astronomiques et d'après le rapport h/H de la durée d'insolation effective (mesuré par un héliographe) à la durée du jour astronomique (en heures).

On emploie souvent la formule suivante dérivée de celle d'Angström :

$$Ig = Iga(0.18 + 0.12 \frac{h}{H}) \quad (1.2)$$

Avec :

- $h$  : Durée d'insolation réelle (heures).
- $H$  : Durée astronomique du jour (heures).
- $I$  et  $H$  ne dépendent que de la latitude.

2) Si l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieure à 50%, on multiplie l'ETP calculée par le facteur correctif suivant :

$$K = 1 + \frac{50 - Hr}{70} \quad (1.3)$$

Où

- $Hr$  est l'humidité relative moyenne de l'air pendant le mois considéré (%).

En pratique, le terme correctif ci-dessus n'intervient que dans le cas des climats désertiques ou subdésertiques.

#### I.4.2.2. Formule de THORNTHWAITE

Cette formule déjà assez ancienne (1944) est basée sur de nombreuses expériences effectuées sur des cases lysimétriques, elle ne fait intervenir que la température.

L'évapotranspiration potentielle est donnée par la relation suivante :

$$ETP = Ct^a \quad (1.4)$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration mensuelle en centimètre pour un mois fictif de 30 jours et une durée théorique d'ensoleillement de 12 heures sur 24.

- $t$  : Température moyenne mensuelle du mois considéré (°C).
- $C$  et  $a$  : sont des fonctions de l'indice thermique annuel, variant d'un lieu à l'autre.
- $a$  : est calculé par la relation suivante :

$$a = 67.5 \times 10^{-8} I^3 - 77.11 \times 10^{-6} I^2 + 0.0179 I + 0.492 \quad (1.5)$$

Dans laquelle  $I$  est l'indice thermique annuel égal à la somme des 12 indices thermiques mensuels (i)

$$I = \sum_{i=1}^{12} t_i = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{t_i}{5} \right)^{1.514} \quad (1.6)$$

$t$  : Température moyenne mensuelle (°C).

La valeur de "a" est donnée par l'expression de L. SERRA de 1954 par simplification de la formule de THORNTHWAITE :

$$a = 0.016 I + 0.5 \quad (1.7)$$

Le terme  $C$  varie en sens inverse de  $I$  et en définitive l'équation  $ETP = C t^a$  peut s'écrire :

$$ETP = 1.6 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^a \quad (1.8)$$

### I.4.2.3. Formule de BLANEY-CRIDDLE

C'est l'une des plus anciennes car en 1931 Harry Blaney pensait que l'ETP dépendait de deux facteurs essentiels :

- La force évaporante  $F$ .
- L'humidité relative de l'air ou le déficit de saturation.

A ce moment là, les auteurs ont envisagé une régression linéaire entre l'ETP et la température ; ensuite ils ont remarqué que l'ETP ne dépend pas seulement du potentielle énergétique  $F$ , dépensé pour actionner le déficit de saturation  $H$  mais aussi de la structure de la surface qui libère les molécules d'eau. Ce dernier est appelé facteur de correction  $K$  qui dépend directement du type de la plante.

Ainsi la première formule s'écrit :

$$ETP = F \cdot K (114 - H) \quad (1.9)$$

En 1945, les mêmes auteurs Harry Blaney et Wayne Criddle ont remarqué que le facteur  $H$  joue un rôle moins important que prévu vis-à-vis du potentielle énergétique et à l'état de liaison de l'eau à la surface évaporante, alors pour simplifier le calcul, ils éliminèrent le  $H$  de leur formule qui devient ainsi :

$$ETP = K F \quad (1.10)$$

Où :

$K$  : Coefficient propre à la couverture végétale considérée.

La formule de l'ETP climatique s'écrit de la manière suivante:

$$ETP = aF + b \quad (1.11)$$

Avec:

- ✓  $F$  : en mm/mois.  $F = P (0.46 t + 8.13)$
- ✓  $P$  : Durée d'éclairement en %
- ✓  $T$  : Température moyenne mensuelle en °C
- ✓  $a$  et  $b$ : Coefficients de correction en fonction de trois paramètres climatiques: l'humidité relative, la vitesse du vent et l'insolation effective (rapport des heures d'insolation et de la durée astronomique de jour), les valeurs de  $a$  et  $b$  sont données par le tableau suivant:

**Tableau 1: Valeurs des coefficients  $a$  et  $b$  de l'équation  $aF+b$ .**

Insolation effective	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)
----------------------	-----------------------	-----------------------

		Faible<20%		Moyenne 20-50%		Elevée>50%	
		a	b	a	b	a	b
<b>Elevée 0.70-0.90</b>	Faible 0-2	1.59	-2.02	1.45	-2.18	1.16	-1.96
	Modérée 2-5	1.77	-1.84	1.59	-2.11	1.25	-1.88
	Elevée 5-8	2	-1.86	1.73	-2.04	1.36	-2
<b>Modérée 0.45-0.70</b>	Faible 0-2	1.45	-2	1.3	-2.07	1.05	-1.84
	Modérée 2-5	1.66	-1.98	1.45	-2	1.14	-1.84
	Elevée 5-8	2.05	-2.23	1.57	-1.98	1.21	-1.8
<b>Faible 0-0.45</b>	Faible 0-2	1.25	-1.79	1.13	-1.71	0.89	-1.7
	Modérée 2-5	1.45	-1.91	1.23	-1.75	0.96	-1.66
	Elevée 5-8	1.61	-1.88	1.36	-1.82	1.02	-1.59

Enfin ; en 1998 (*Allen et al*) propose une nouvelle formulation pour l'estimation de l'ET déduit de la forme publiée en 1977 par (*Doorenbos et Pruitt*):

$$ETP=(a+8.13bP)+(0.46bP)T_{eff} \quad (1.12)$$

Avec:

$T_{eff}$ : c'est la température effective d'après *Camargo et al. (1999)* qui est donnée par la formule suivante :

$$T_{eff}=0.5*K(3T_{max}-T_{min}) \quad (1.13)$$

- K : coefficient de calibrage de *Thorntwhaite* qui dépend de la culture irriguée ou de l'espèce traité ; s'il s'agit d'une grande étendue ce coefficient prend la valeur de **0.69**, tandis qu' il prend la valeur de **0.72** s'il s'agit d'une étude agricole d'une parcelle de moindre importance.
- $T_{min}$  et  $T_{max}$  : ce sont des températures minimales et maximales du moi considéré en C°.

#### I.4.2.4. Formule de PENMAN ou formule dite : du bilan d'énergie

La formule donnée par le physicien anglais PENMAN découle directement du bilan d'énergie. Son intérêt est donc primordial quand à la compréhension du phénomène physique. De plus, elle donne les meilleures estimations de l'ETP, et ceci sous tous les climats. Elle possède un seul inconvénient qui est de nécessiter un nombre assez important d'informations climatiques.

L'équation simplifiée du bilan d'énergie, appliquée à une surface mise en évapotranspiration de caractéristiques déterminées, et non limitée en eau, s'écrit de la manière suivante:

$$RN = Qh + ETP \quad (1.14)$$

Avec :

RN: Rayonnement net.

- ✓ Qh: Flux de chaleur.
- ✓ ETP: Evapotranspiration potentielle.
- ✓ Qh et EP peuvent s'exprimer de la façon suivante :

$$Q_h = \gamma f(u) (T_s - T_a) \quad (1.15)$$

$$ETP = f(u) (e_s - e_a) \quad (1.16)$$

Cette dernière expression peut être transformée, en appelant  $\Delta$ , la pente de la courbe de vapeur d'eau saturante au voisinage de la température  $T_a$ .

$$\Delta = \frac{e_s - E}{T_s - T_a}$$

E étant la tension de vapeur d'eau saturante à la température  $T_a$ .

L'expression devient alors :

$$ETP = f(u) [(e_s - E) + (E - e_a)]$$

$$D'où ETP = \Delta f(u) (T_s - T_a) + f(u) (E - e_a)$$

En éliminant  $Q_h$ , on obtient :

$$RN - ETP = \gamma f(u) (T_s - T_a)$$

$$ETP = \frac{\Delta}{\gamma} (RN - ETP) + f(u) (E - e_a)$$

$$D'où ETP = \frac{\Delta RN + \gamma f(u)(E - e_a)}{\Delta + \gamma} \quad (1.17)$$

On convient d'appeler «pouvoir évaporant de l'air » la quantité:

$$E_a = f(u) (E - e_a)$$

C'est l'évaporation qui se produirait si la température de surface était égale à la température de l'air.

$$ETP = \frac{\Delta RN + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (1.18)$$

RN et  $E_a$  étant exprimés dans la même unité qu'ETP (mm).

Cette expression montre que l'évapotranspiration potentielle est en fait la moyenne pondérée de deux termes :

1. Le premier, RN (rayonnement net) représente l'énergie radiative.
2. Le second,  $E_a$  (pouvoir évaporant de l'air) représente l'énergie dite advective (ou indirecte).

Le calcul de l'ETP par la formule de PENMAN exige l'estimation préalable du rayonnement net RN et du pouvoir évaporant de l'air  $E_a$  ainsi que celle des coefficients  $\Delta$  et  $\gamma$ .

**a. Estimation du rayonnement net :**

Le rayonnement net RN est donné par l'expression :

$$RN = I_g (1-a) + RA - RT \quad (1.19)$$

Avec :

- $I_g$  : rayonnement global
- $a$  : albédo.
- $RA$  : rayonnement atmosphérique.
- $RT$  : rayonnement terrestre.

**b. Détermination du rayonnement global  $I_g$  :**

On emploie souvent la formule suivante dérivée de celle d'Angström :

$$I_g = I_g a (0.18 + 0.12 \frac{h}{H})$$

Avec:

- $I_g a$  : Rayonnement solaire qui atteindrait le sol en l'absence d'atmosphère, c'est une donnée astronomique indépendante du climat ( $\text{cal/cm}^2/\text{j}$ ).
- $h$  : Durée d'insolation réelle (heures).
- $H$  : Durée d'insolation maximale théorique (heures).

**c. Détermination de l'albédo**

L'albédo qui est le rapport de l'énergie solaire réfléchiée par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, avec 0 correspondant au noir, pour un corps sans aucune réflexion, et 1 au miroir parfait, pour un corps diffusant dans toutes les directions et n'absorbant rien du rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit.

Dans le tableau suivant on donne les valeurs de l'Albédo en fonction de type de la surface d'étude :

**Tableau 2 : Les valeurs de l'albédo en fonction du type de la surface**

Type de surface	Albédo (0 à 1)
-----------------	----------------

Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Glace	environ 0.60
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90
Miroir	1

La valeur de l'albédo généralement retenue pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle est de 20%.

#### d. Détermination du rayonnement de courte longueur d'onde RA - RT :

Le rayonnement de courte longueur de l'onde peut être estimé par la formule de BRUNT :

$$RA - RT = -q\sigma T^4 \quad (1.20)$$

Avec :

T : Température moyenne journalière (° Kelvin).

$\sigma$  : Constante de Stephan-Boltzman =  $1.18 \times 10^{-7}$  cal/cm<sup>2</sup>/j.

$$q = (0.56 - 0.08 \sqrt{e}) (0.10 + 0.90 \frac{h}{H})$$

e : Tension moyenne journalière de la vapeur d'eau dans l'air (millibars).

**N.B.**: La valeur obtenue pour le rayonnement net est en calories /cm<sup>2</sup>/jour. Elle doit ensuite être convertie en mm d'évaporation (1mm d'évaporation équivaut à 59 cal/cm<sup>2</sup>)

On aura donc, en mm/jour :

$$RN = \frac{1}{59} [(1 - a) I_g - q \sigma T^4]$$

#### e. Estimation du pouvoir évaporant de l'air

Le pouvoir évaporant s'évalue de la manière suivante:

$$Ea = f(u) (E - e)$$

E : Tension maximale de la vapeur d'eau dans l'air (millibars).

$$F(u) = 0.26 (1 + 0.54 u)$$

U : Vitesse moyenne journalière du vent mesurée à 2 mètres au dessus de la surface évaporante (m/s).

Donc la formule de PENMAN prend la forme suivante et numérotée (1.21):

$$ETP = \left[ \frac{Iga}{59} (1 - a) \left( 0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0.56 - 0.08 \sqrt{e}) \left( 0.10 + 0.90 \frac{h}{H} \right) \right] \frac{\frac{\Delta}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} + \frac{0.26}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} (E - e) (1 + 0.54 u)$$

:

Avec:

- ✓ ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/j).
- ✓ e : est estimée à partir de l'humidité relative Hr en% et de la température t en degré Celsius par la relation suivante :

$$e = 0.061 Hr 10^{\left( 7.5 \frac{t}{238 + t} \right)}$$

- ✓  $\Delta$  : Pente de la courbe de tension de vapeur saturante pour la température de l'air T.

$$\Delta = \frac{6.149}{T} \exp \left( 19.511 \frac{t}{T} \right) \left( \frac{6463}{T} - 3.927 \right)$$

Avec:

- $\Delta$  : en millibar/°celsius.
- t : Température en (°C).
- T : Température en (°K).
- $\gamma$  : Constante psychrométrique.

$$\gamma = 0.6605 - 0.826 10^{-4} Z$$

Avec:

- $\gamma$  : en millibar /°C
- Z : Altitude de lieu (m).

$$E = 6.107 \times \left( 10^{7.5 \frac{t}{238 + t}} \right)$$

#### I.4.5. Formule de PENMAN modifiée FAO

La formule de PENMAN a été modifiée par de nombreux auteurs de façon à en simplifier l'écriture ou en adapter les paramètres à des régions particulières. Parmi ces formules modifiées on utilise fréquemment la formule dite de PENMAN-FAO (N°5) recommandée pour les régions sèches et arides. Cette formule a la forme suivante numérotée (1.22) (A. Halimi):

$$ETP = \left[ \frac{Iga}{59} (1 - a) \left( 0.25 + 0.45 \frac{h}{H} \right) - \frac{\sigma}{59} T^4 (0.56 - 0.08 \sqrt{e}) \left( 0.10 + 0.90 \frac{h}{H} \right) \right] \frac{\frac{\Delta}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} + \frac{0.26}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} (E - e) (1 + 0.864 u)$$

Les paramètres qui changent sont:

- $\left( 0.25 + 0.45 \frac{h}{H} \right)$  au lieu de  $\left( 0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$ .

- $(1 + 0.864 u)$  au lieu de  $(1 + 0.54 u)$ .

#### I.4.6. Ordre des paramètres et analyse en composantes principales

Notre travail s'articule au premier degré sur l'utilisation de la température (l'information thermométrique d'une manière générale) ou bien on utilise les formules qui sont basées sur l'utilisation de l'information thermométrique, cette idée est basée sur une approche mathématique et statistique qui l'on s'appelle l'analyse en composantes principales.

Cette procédure plus au moins récente consiste à trouver les relations très étroites entre les paramètres d'une série statistique, d'une relation mathématique ou une formule empirique bien connue.

Cette procédure nous permettra de définir l'ordre d'influence des paramètres qui jouent un rôle considérable de proche en proche par ordre de priorité dans le comportement du phénomène de l'évapotranspiration. Ces paramètres sont : la température  $T(C^\circ)$ , l'insolation  $Ins(h)$ , l'humidité de l'air  $Hr(\%)$  et la vitesse du vent  $V (m/s)$ ....etc. » .

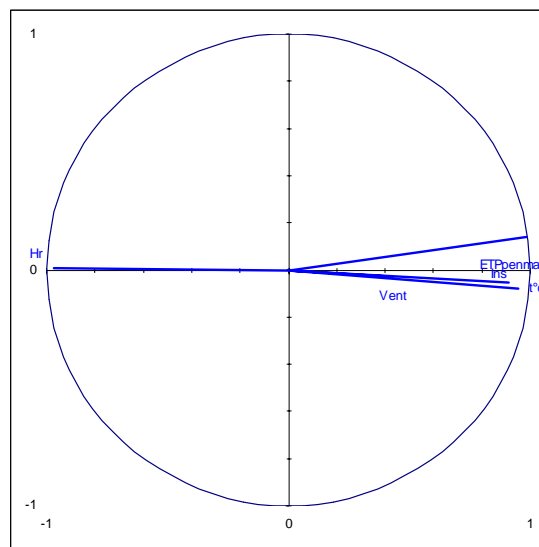
Les résultats de cette analyse sont obtenus par un utilitaire développé sous Excel: (ACP.xls établie par J. Vaillé) qui sont regroupés dans le tableau 4 et illustrés par les schémas de la figure 09 sur des cercles de corrélations.

**Tableau 3. Coefficients de corrélation entre les différents paramètres.**

Corrélation	ETP <sub>PENMAN</sub>	t°C	Vent	Ins	Hr
ETP <sub>PENMAN</sub>	<i>1</i>	0.9410	0.4120	0.8890	-0.9394
t°C	0.9410	<i>1</i>	0.2785	0.8378	-0.8978
Vent	0.4120	0.2785	<i>1</i>	0.1505	-0.4116
Ins	0.8890	0.8378	0.1505	<i>1</i>	-0.8681
Hr	-0.9394	-0.8978	-0.4116	-0.8681	<i>1</i>

D'après le tableau 4, on constate que la corrélation entre l'ETP et la température possède la plus grande valeur comparée aux autres paramètres ( $r=0.941$  soit  $r=94.1\%$ ) qui sont par ordre en influence positive: l'insolation avec  $r=88.9\%$  et en influence inverse l'humidité de l'air, avec  $r=-93.94\%$ ).

D'après cette constatation on peut dire que le choix de faire évaluer l'évapotranspiration potentielle en fonction seulement de la température et l'insolation et mathématiquement est réellement très justifié.



**Figure 7: Ordre des paramètres et analyse de la composante principale.**

Finalelement ; on peut minimiser le nombre des paramètres qui régissent le phénomène de l'ETP en se basant sur l'analyse en composantes principales, cette dernière procédure nous permettra de définir le regroupement des paramètres climatiques les plus commodes pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle en cas d'étude climatique à grande d'échelle, en y recours à utiliser des formules empiriques qui valorisent l'information thermométrique selon la facilité d'acquisition on peut prendre en considération pour le calcul le paramètre de la température (mesure directe) et l'insolation (en fonction de l'emplacement géographique), ce qui le cas pour la relation dite ANRH et autres, sans empêcher l'humidité de l'air en sens inverse.

### **I.5. Formule dite ANRH**

Il arrive souvent que les données climatiques ne soient pas disponibles pour permettre le calcul de l'ETP. Dans ce cas, on peut utiliser la relation de l'ETP de l'ANRH, qui permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle à partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante de la position géographique.

Elle est développée en 2002 sous la direction du Professeur J.P.Laborde et elle s'écrit sous de la forme suivante :

$$ETP_{ANRH} = Kr \times Km (H - 187) (0.032 t + 0.077) \quad (1.23)$$

Avec :

- ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/mois).
- Km : Coefficient mensuel dont ses valeurs sont données à la figure 8.
- Kr : Coefficient régional qu'on peut lire sur le tableau 4.
- t : température moyenne mensuelle pour le mois considéré (°C).

- H : Durée théorique mensuelle d'insolation (heures/mois) et elle est exprimée en fonction de l'ordonnée (Y) de Lambert selon la formule suivante :

$$H_i = a_i Y + b_i \quad (1.24)$$

Avec :

- Y : l'ordonnée de Lambert de la zone (Km).
- $a_i, b_i$  sont donnés dans le tableau 5

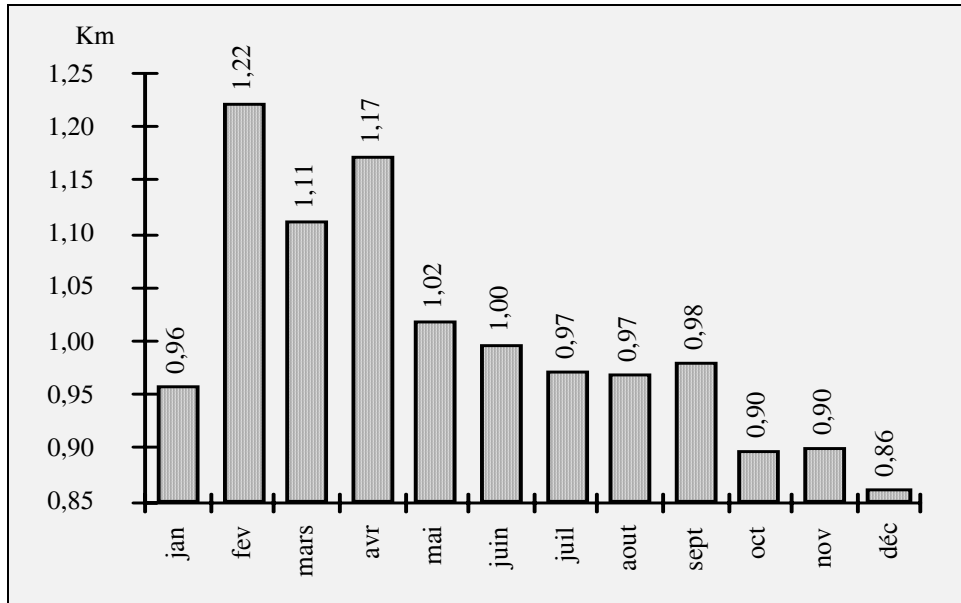


Figure 8: Evolution du coefficient correctif mensuel

Tableau 4. Coefficients correctifs régionaux (Kr).

STATION	Kr	Nom	Kr	Nom	Kr
Aïn Sefra	1,21	DellysAfir	0,87	Mostaganem	0,87
Annaba	0,91	Djelfa	1,10	Msila	1,12
Arzew	0,97	El Kheiter	1,15	Naama	1,11
Barika	1,24	ElBayadh	1,23	Oran	0,99
Batna	1,12	ElMilia	0,79	OumElBouaghi	0,92
BBAreridj	1,07	Ghazaouet	0,81	Saida	1,01
Béchar	1,32	Guelma	0,83	Setif	1,04
Bejaia	0,92	JijelAer	0,79	SidiBelAbbes	0,94
BeniSaf	0,88	Jijelport	0,79	Skikda	0,86
Biskra	1,26	KsarChellala	1,09	SoukAhras	0,99
Bou Saada	1,10	Maghnia	0,93	Tebessa	1,00
Bouira	1,04	Mascara	0,95	Tenes	0,95
Chlef	0,93	Mecheria	1,14	Tiaret	1,08
Constantine	0,91	Medea	1,05	TiziOuzou	0,83
DarElBeida	0,89	Miliana	0,97	TlemcenZen	0,93

**Tableau 5 : Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ANRH**

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ai	-0.022	-0.01	-0.001	0.01	0.02	0.025	0.02	0.014	0.003	-0.008	-0.019	-0.025
bi	315	307	371	389	429	429	436	414	370	351	311	308

### Conclusion:

Dans ce chapitre on a essayé d'illustrer toutes les procédés et formules qui ont été utilisées dans la littérature pour l'estimation de la valeur de l'ET, en mettant l'accent sur les appareils, les instruments de mesure, ainsi que toutes les relations mathématiques délivrées par plusieurs auteurs en cas d'absence de mesure.

La nécessité de recours à l'utilisation des formules empiriques reste toujours indispensable en cas de l'absence de plusieurs paramètres météorologiques. Mais leurs application est recommandée, et conditionnée par plusieurs disciplines et précautions pour y arrivé à des résultats acceptables en comparant avec de celui obtenus par les instruments de mesure.

L'amélioration des formules est toujours souhaitable afin d'aboutir à des utilisations de sans lacunes majeures et risque d'ambiguïté ou résultats faux surtout s'il s'agit d'un projet de grande importance comme la mobilisation des ressources en eau notamment en Algérie qui est classée par l'OMS comme un pays pauvre d'eau.

## CHAPITRE II

### PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

#### Introduction

L'Algérie ; est l'un des plus grandes pays de l'Afrique, elle possède une superficie totale de 2.381.741 Km<sup>2</sup>, d'où le deuxième pays du continent après Soudan, cette vaste superficie qui sa donne une biodiversité et même un climat variable, elle s'étende du nord au sud sur une longueur de 1900km. Tandis qu'elle arrive à 2200km de frontière Algéro-libyenne aux frontières Algero-Marocains

L'Algérie est limitée au Nord par la Mer Méditerranée, au Sud par le Mali et le Niger, à l'Ouest par le Maroc, le Sahara Occidental et la Mauritanie et à l'Est par la Tunisie et la Libye.

L'Algérie est subdivisée en 48 Wilayas (départements). Les deux chaînes montagneuses importantes, l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud, séparent le pays en trois types de milieux qui se distinguent par leur relief et leur morphologie, donnant lieu à une importante diversité biologique.

Les zones urbaines et périurbaines telliennes qui n'occupent que 4 pourcent du territoire national sont les plus peuplées (80 pourcent de la population totale). Les régions steppiques (9 pourcent du territoire), localisées au-delà de l'Atlas Tellien, constituent les vraies zones de parcours et la population, composée essentiellement d'agropasteurs, représente environ 12 pourcent de la population totale. Le reste de la population (8 pourcent) se disperse dans les régions sahariennes qui s'étalent sur 87 pourcent du territoire.

Dans la présente étude ; on prend en considération la partie nord du pays (le Système Tellien, les Hautes Plaines steppiques).

#### II.1.1 Situation géographique

La zone d'étude est la partie nord du pays qui se situe entre deux milieux totalement différents la mer méditerranée et le Sahara. Elle se compose de deux types de climat subhumide et semi aride. Elle s'étale entre la latitude (32° Nord) et (37°Nord) au nord de l'équateur et entre (01°50' Ouest) et (8° Est) de la ligne méridienne internationale de Greenwich.

Elle est limitée géographiquement par :

- La méditerranée au nord.
- Le Sahara Algérien au sud.
- La Tunisie à l'Est.
- Le Maroc à l'Ouest.

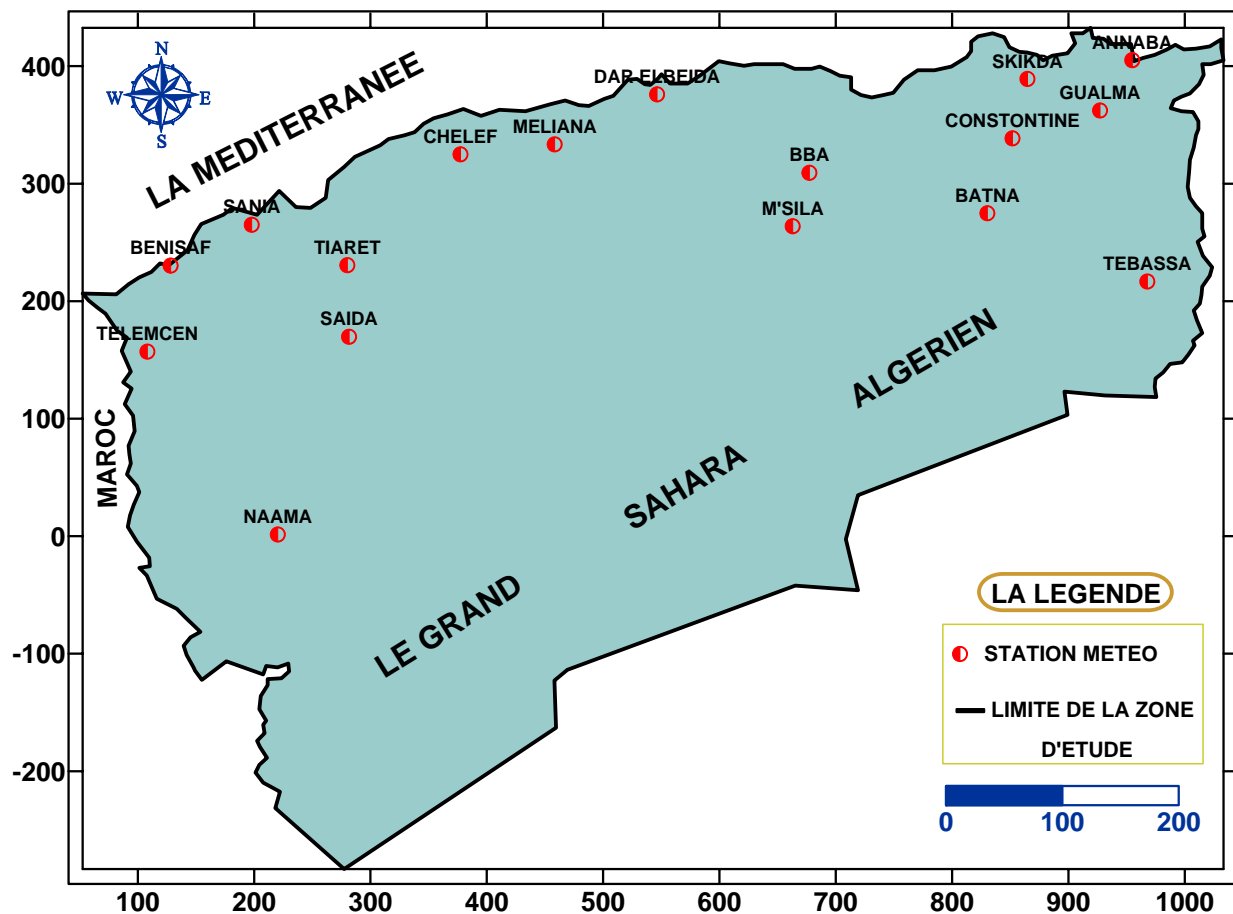


Figure 9 : Carte de situation de la région d'étude.

## II.2. Climatologie

Le climat est de type méditerranéen sur toute la frange nord qui englobe le littoral et l'Atlas tellien (des étés chauds et secs, des hivers humides et frais), semi-aride sur les hauts plateaux au centre du pays, et désertique dès que l'on franchit la chaîne de l'Atlas saharien. Les écarts de température dans une même journée peuvent être considérables, c'est le cas dans le Sahara où le mercure peut osciller d'un extrême à l'autre en l'espace de quelques heures seulement (au-delà de 40 °C le jour, au-dessous de 5 °C la nuit.).

Le climat en Algérie représente tous les bioclimats méditerranéens depuis le très humide au Nord jusqu'au aride au Sud pour les étages bioclimatiques, et depuis le froid jusqu'au chaud pour les variantes thermiques.

Le tableau ci après montre la situation climatique en Algérie :

**Tableau 6. Les étages bioclimatiques en Algérie**

Etages bioclimatiques	Pluviosité annuelle (mm)	Superficies en (ha)	Pourcentage de la superficie totale
Très HUMIDE	1 200 – 1 800	185,275	0.08
HUMIDE	900 - 1 200	773,433	0.32
SUB-HUMIDE	800 – 900	3,401,128	1.42
SEMI-ARIDE	600 – 300	9,814,985	4.12
ARIDE	300 – 100	11,232,270	4.78
SAHARIEN	< 100	212,766,944	89.5

### II.2.1. Température

- La moyenne des températures minimales de mois la plus froide "min" est comprise entre 0 et 9°C dans les régions littorales et entre – 2 et + 4°C dans les régions semi-arides.
- La moyenne des températures maximales du mois le plus chaud "Max" varie avec la continentalité, de 28°C à 31°C sur le littoral, de 33°C à 38°C dans les Hautes Plaines steppiques et supérieure à 40°C dans les régions sahariennes.

### II.2.2. La pluviosité

Les précipitations sont la composante primordiale du bilan hydrique.

En Algérie, elles accusent une grande variabilité mensuelle et surtout annuelle. Cette variabilité est due à l'existence de gradients (DJELLOULI, 1990) qui sont :

- **Un gradient longitudinal** : la pluviosité augmente d'Ouest en Est (450 mm/an à Oran plus de 800 mm/an à Annaba). Ce gradient est dû à deux phénomènes : à l'Ouest, la Sierra Nevada espagnole et l'Atlas marocain agissent comme écran et éliminent ainsi l'influence atlantique, à l'Est, les fortes précipitations sont attribuées aux perturbations pluvieuses du Nord de la Tunisie.
- **Un gradient latitudinal** : les précipitations moyennes annuelles varient de 50mm dans la région du M'Zab à 1200mm à Jijel. Cette diminution du littoral vers les régions sahariennes est due à la grande distance traversée par les dépressions qui doivent affronter sur leur parcours les deux chaînes atlasiques.
- **Un gradient altitudinal universel** : qui varie en fonction de l'éloignement de la mer.

### **II.2.3. Les vents**

La notion du vent est liée avec sa vitesse, donc il est très important dans le phénomène de L'ET, car il représente le mécanisme de transfert des échanges thermiques entre le flux saturé de l'eau et celui qui vide ou sec.

La vitesse du vent est essentielle pour nous permettre de calculer l'évapotranspiration d'une zone donnée.

Pour la zone d'étude, on a souvent des directions dominantes du vent, tels qu'on constate la direction du S-SW vers le N-NE (SIROCO) pendant la période de l'été tandis qu'on remarque des directions du N-NW sur la partie Ouest du pays et E-NE sur la partie Est de la zone d'étude.

### **II.2.4. L'humidité de l'air**

La notion d'humidité de l'air est très important dans le phénomène de l'ET, il s'agit du degré hygrosopique (le degré de saturation de l'air en vapeur d'eau, elle est exprimé en pourcentage). Elle est liée à la température et la turbulence de l'air.

En Algérie du nord qui constitue de deux types de climat, un climat subhumide ou méditerranéen qui est caractérisé par le facteur d'humidité plus au moins importante (supérieur à 50% pendant toute l'année elle atteint jusqu'à 85% pendant l'hiver) qui reste une propriété remarquable de la région côtière, par conséquent elle diminue du nord vers le sud de la zone d'étude.

Le second type de climat est de type semi aride qui caractérise la région des hauts plateaux, il est caractérisé par une température considérable en été (supérieure à 35°C) et baisse au dessous du 0° C en Hiver cette variation de la température engendre une variation de degré de saturation de l'air, elle arrive jusqu'à 75% pendant la période de précipitation mais elle est inférieure à 50% pendant la période de l'été.

### **II.2.5. La couverture végétale**

La végétation est de type méditerranéen dans le nord du pays. La forêt (chênes-lièges, caroubiers, pins...) et le maquis dominant tout le long du littoral et sur les flancs de l'Atlas tellien et différentes sortes de fleurs et de plantes poussent dans les jardins et vergers (jasmin, rosier, géranium, romarin...). Hormis l'alfa, très peu de plantes poussent sur les hauts plateaux au centre du pays. Dans les Oasis du Sahara, d'ingénieux systèmes d'irrigation permettent aux paysans de

cultiver, en dehors des palmiers dattiers, toutes sortes de fruits et de légumes dans leurs plantations.

### II.3. Présentation des stations météorologiques

Le territoire Algérien est composé de 17 grands bassins hydrographiques, composés à leur tour des sous bassins versants secondaires ou élémentaires ; chaque bassin représente une région différente et possède une superficie importante et plusieurs stations bien réparties.

Sauf le grand bassin de Sahara qui n'est pas pris pas en considération dans le présent mémoire; le reste des bassins constitue la zone d'étude, dans notre cas on a essayé de prendre une station représentative de chaque grand bassin de sorte que nous couvrons tout le nord du territoire national d'une manière rationnelle et régulière.

Le déroulement des travaux de ce mémoire est articulé sur les données météorologiques recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques « ANRH » et celles fournies par l'Office Nationale des Météorologie « ONM ».

Les paramètres qui ont été recueillies et qui sont la température moyenne mensuelle, la vitesse des vents, l'humidité relative de l'air, et l'insolation globale sont pris pour au moins 10 ans pour chaque station. Les caractéristiques géographiques, l'emplacement et les caractéristiques climatologiques de chaque station sont reportés dans les tableaux suivants :

**Tableau 7 : les caractéristiques géographiques des stations.**

<i>N° STA</i>	<i>NOM</i>	<i>INDICATEUR</i>	<i>LAT</i>	<i>LONG</i>	<i>ALTITUDE</i>
1	<b>ANNABA</b>	360	36°50	07°49E	3
2	<b>BBA</b>	444	36°04	04°40E	928
3	<b>BATNA</b>	468	35°43	06°21E	827
4	<b>TELEMCEN</b>	530	34°57	01°27W	210
5	<b>MAGHNIA</b>	522	34°49	01°47W	513
6	<b>SKIKDA</b>	355	36°53	07°58E	680
7	<b>SAIDA</b>	536	34°52	05°15E	1009
8	<b>TEBASSA</b>	475	35°25	08°20E	17
9	<b>SANIA</b>	490	35°38	00°36W	889
10	<b>GUALMA</b>	403	36°28	07°28E	227
11	<b>BENISAF</b>	518	35°18	01°21W	68
12	<b>CHELEF</b>	425	36°13	01°20E	143
13	<b>CONSTONTINE</b>	419	36°17	06°37E	694
14	<b>DAR ELBEIDA</b>	390	36°41	03°13E	25
15	<b>MELIANA</b>	430	36°18	02°14E	137
16	<b>M'SILA</b>	467	35°40	04°30E	441
17	<b>NAAMA</b>	557	33°16	00°18W	1166

**Tableau 8 : les moyennes interannuelles des paramètres climatologiques des stations.**

station	paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	MOYENNE
ANNABA	T C°	11.2	11.9	12.9	14.8	18	21.5	24.6	25.4	23.6	19.9	15.5	12.4	17.6
	Hr (%)	74.9	73.4	73.6	72.3	73.5	71.8	68.7	70.2	70.6	71.9	73.8	75	72.5
	V (m/s)	3.7	3.4	3.5	3.6	3.4	3.6	3.6	3.6	3.4	3	3.3	3.5	3.5
	INS (h)	4.9	5.7	6.2	7.2	8.8	10.2	11.4	10.4	8.3	7	5.4	4.8	7.5
BBA	T C°	5.4	6.6	9.2	11.4	15.8	22.3	25.9	25.7	21.5	15.6	10.5	6.5	14.7
	Hr (%)	73.8	70.8	66.6	60.6	59.4	47.3	38.4	42.3	53.6	58.5	71.4	77.1	60
	V (m/s)	2.6	2.9	3.3	3.4	3.5	3.5	3.3	3	3	2.9	2.9	3	3.1
	INS (h)	6.3	6.6	7.1	8.2	9.5	10.6	11.6	10.5	8.6	7.5	6.5	5.9	8.2
BATNA	T C°	5.1	6.7	8.9	11.4	15.9	21.5	25.1	24.6	20.8	15.3	9.5	6.8	14.3
	Hr (%)	71.5	68.5	64.3	62.3	57.7	50.3	42.6	45.7	56.9	62.8	69.7	71.5	60.3
	V (m/s)	3.4	3.6	3.8	4	3.8	3.8	3.7	3.4	3.1	3.1	3.2	4	3.6
	INS (h)	5.8	6.5	7	7.7	9	10.5	11.3	10.3	8.5	7.4	6.4	5.6	8
TELEMCEN	T C°	9.7	11.1	12.6	14.1	16.8	20.7	25.3	26	22.4	18.3	13.8	11.9	16.9
	Hr (%)	68.6	69.6	69.8	66.9	68.5	62.1	55.6	54	59.9	66	66.1	69.1	64.7
	V (m/s)	2.2	2.5	2.7	2.6	2.4	2.3	2.3	2.4	2.1	2.2	2.3	2.7	2.4
	INS (h)	5.9	6.5	7	8	8.9	10.1	11.1	10.2	8.7	7.4	6.8	5.9	8
MAGNIA	T C°	9.2	11	12.7	14.2	17.4	21.8	25.7	26	22.9	18	13.7	11.1	17
	Hr (%)	72	69.4	70.5	66.6	65	60.8	54.8	56.6	63.2	68.4	70.1	71.2	65.7
	V (m/s)	2.5	3.1	3.1	2.9	2.6	2.4	2.5	2.5	2.2	2.3	2.6	3	2.6
	INS (h)	6.7	6.9	7.4	8.3	9	9.8	10.7	9.9	8.5	7.5	7.2	6.2	8.2
SKIKDA	T C°	11.9	12.4	13.6	14.9	18.1	21.1	24.2	24.9	23.3	20	16.1	13.4	17.8
	Hr (%)	74.1	73.3	73.5	73.9	74	73.5	71.5	73.8	73.5	74.1	72.3	72.5	73.3
	V (m/s)	3.4	3	3	3	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.8	3.2	3.5	3
	INS (h)	4.8	5.7	6.3	7	8.8	9.9	11.2	10	8	6.7	5.4	4.6	7.4

station	paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	MOYENNE
<b>SAIDA</b>	<b>T C°</b>	7.8	9.2	11.2	12.7	16.8	22.1	26.7	26.5	22.2	16.8	12.3	9.1	16.1
	<b>Hr (%)</b>	64.8	66.5	63.1	61.9	57.6	49.2	37.4	40.4	50.6	60.5	64.2	68.1	57
	<b>V (m/s)</b>	2.5	2.6	2.8	3	2.8	2.7	2.7	2.5	2.3	2.2	2.4	2.7	2.6
	<b>INS (h)</b>	6.2	7	7.3	8.2	9.3	10.4	11.1	10.1	8.9	8.2	6.7	6	8.3
<b>TEBESSA</b>	<b>T C°</b>	6.2	7.9	9.9	12.3	16.9	22	25.5	25	21.4	16	10.6	7.7	15.1
	<b>Hr (%)</b>	68.9	65	62.8	61.1	56.4	49.3	42.1	47.2	55.9	61.6	65.8	68.8	58.8
	<b>V (m/s)</b>	2.7	2.7	2.9	3.2	2.8	2.7	2.6	2.4	2.3	2.1	2.3	2.5	2.6
	<b>INS (h)</b>	5.3	6	6.6	7.4	8.8	9.9	11.2	9.8	8.1	7.1	6.1	5.3	7.6
<b>O/SANIA</b>	<b>T C°</b>	10.4	11.9	13.5	15.1	17.9	21.5	24.6	25.4	22.9	18.9	14.5	12.1	17.4
	<b>Hr (%)</b>	74.7	74	70.5	68.8	68.4	66.5	65.3	65.1	67.9	70.5	72.3	75.2	69.9
	<b>V (m/s)</b>	3.1	3.6	4.2	4.5	4.4	4.4	4.2	3.9	3.6	3.5	3.1	3.3	3.8
	<b>INS (h)</b>	6.4	6.9	7.5	8.4	9.3	10.3	11	10.2	8.6	7.5	6.7	5.7	8.2
<b>GUELMA</b>	<b>T C°</b>	9.2	10.1	11.8	13.8	19	22.6	26.5	27.6	24.2	19.9	14.2	10.7	17.5
	<b>Hr (%)</b>	75.9	75.9	75.2	72.5	70	60.8	53.5	52.9	62.3	69.2	74.6	77.1	68.3
	<b>V (m/s)</b>	2	1.9	2	2.3	1.8	2	1.9	1.8	1.8	1.5	1.7	1.8	1.9
	<b>INS (h)</b>	5.1	5.8	6	7.1	8.9	9.7	11.1	10.3	8	6.6	5.4	4.8	7.4
<b>BNI SAF</b>	<b>T C°</b>	12.6	13.2	14.4	15.9	18.3	21.5	24.2	25.2	23	19.6	16.3	14.4	18.2
	<b>Hr (%)</b>	71.8	72.9	73.4	71.4	71.9	73.3	72.8	72.2	73.9	74.9	71.6	71.5	72.6
	<b>V (m/s)</b>	3.5	3.3	3.2	3.4	2.8	2.7	2.2	2	2.1	2.7	3	3.5	2.9
	<b>INS (h)</b>	6.2	6.8	7.8	8.5	9.1	9.6	10.4	9.5	8.5	7.4	6.9	5.8	8
<b>CHELEF</b>	<b>T C°</b>	9.8	11.5	13.5	15.6	20	25.3	29.4	29.4	25.7	20	15.2	11.4	18.9
	<b>Hr (%)</b>	77.2	75.8	71	65.7	59.2	51.6	45.4	47.8	56.6	66.2	73.1	77.4	63.9
	<b>V (m/s)</b>	2	2.3	2.7	3.2	3.3	3.2	3.1	2.9	2.6	2.5	2.3	2.4	2.7
	<b>INS (h)</b>	5.9	6.2	7.1	8.2	9.5	10.8	11.6	10.7	8.8	7.4	6.2	5.4	8.2
<b>CONSTANTINE</b>	<b>T C°</b>	6.6	8	9.7	11.8	16.3	21.3	25.1	25.1	21.5	16.3	11	8.1	15.1
	<b>Hr (%)</b>	75.6	73.6	70.3	70.4	67.7	57.7	48.3	51.8	60.8	67	73	75.5	66
	<b>V (m/s)</b>	2.3	2.5	2.6	2.5	2.2	2.1	2.1	2	2	2	2.3	2.6	2.3
	<b>INS (h)</b>	5.2	5.8	6.4	7.2	8.7	10.5	11.5	10.1	8.2	6.8	5.6	5	7.6
<b>DAR ELBEIDA</b>	<b>T C°</b>	10.6	11.4	12.9	14.2	17.5	21.4	24.8	25.5	23.2	19.2	14.9	12.4	17.3
	<b>Hr (%)</b>	75.3	75.3	74.2	73.8	74.3	70.1	67.1	68.4	69.6	71.9	73.9	74.8	72.4
	<b>V (m/s)</b>	2.9	3.1	3.1	3.3	3	3.2	3.2	3	2.8	2.9	2.8	3.4	3.1
	<b>INS (h)</b>	5.5	5.9	6.8	7.6	8.6	10	11.1	10.1	8.4	6.9	5.8	5	7.6
<b>MELIANA</b>	<b>T C°</b>	8.6	9.7	11.6	13.2	16.7	22.2	26.9	26.5	22.7	17.4	12.7	10	16.5
	<b>Hr (%)</b>	72	70.7	65.9	63.8	62	53.4	44.3	47.5	56.4	65	70.8	74.1	62.1
	<b>V (m/s)</b>	2.3	2.6	2.8	3.1	3.1	3.3	3	2.9	2.6	2.5	2.1	2.4	2.7
	<b>INS (h)</b>	5.3	5.9	6.8	7.5	8.9	10.6	11.6	10.7	8.8	7	5.9	4.8	7.8

## Conclusion

La zone d'étude, à cause de sa étendu très vaste lui à donné un caractère bioclimatique très varie, ce qui nous induit de prévenir la complexité d'étudier et par conséquent de nécessité de séparer en plusieurs régions distinctes.

Cette biodiversité et à cause de la variabilité climatique du nord au sud et de l'Est à le Ouest nous mène de dire que ce caractère joue un rôle considérable sur le comportement du phénomène de l'évapotranspiration le long de toute la région d'étude.

**CHAPITRE III****CALCUL ET MODELISATION****Introduction**

Dans les deux chapitres précédents ; on a présenté la partie bibliographique ainsi que la situation et la présentation de la zone d'étude qui est la partie Nord du territoire nationale ce qui nous mettra au point sur la situation géographique et ces caractéristiques climatologiques.

Dans ce qui suit ; nous allons présenter la recette de notre étude qui est basée sur les données climatologiques récoltées auprès des services concernées notamment l'agence nationale des ressources hydrauliques "ANRH" et l'office national de météorologie "ONM" .

**III.1. Matériels et méthodes**

Toute recherche nécessite une rénovation, actualisation des informations ou formulation d'une théorie. Dans notre cas, qui concerne la modélisation du phénomène naturel baptisé ETP, les données nécessaires sont :

- a) Les températures moyennes, minimales et maximales à l'échelle mensuelle.
- b) La vitesse du vent enregistrée.
- c) L'humidité de l'air ou le degré hygrosopique exprimée.
- d) L'insolation globale.
- e) L'albédo qui est pris égal à 0.20 (voir chapitre 1).

La méthodologie de calcul vise à calibrer quelques formules d'usage courant pour l'estimation de l'évapotranspiration sur le nord du territoire nationale; cette partie vise aussi à réajuster la formule dite ANRH en introduisant un troisième coefficient correctif.

La cible, comme cela a été dit, c'est de répondre au problème de l'insuffisance des paramètres climatologiques nécessaires pour évaluer l'ET qui est toujours un paramètre très important dans le bilan hydrique ; à cet effet on valorise l'utilisation l'information thermométrique en cas de l'absence de tous ces paramètres et en présence d'un seul paramètre de température «  $T_{\min}$  ,  $T_{\max}$  et  $T_{\text{moy}}$  » par l'application de plusieurs formules sur l'étendu de la zone d'étude reformulées temporairement et spatialement en comparaison bien entendu avec la formulation référentielle de PENMAN- MONTEITH .

Les relations à examiner sont:

1. La formule de BLANEY CRIDDLE sous sa forme ancienne qui utilise la température moyenne comme paramètre essentiel.

2. La formule de l'ANRH en introduisant un troisième terme correctif.
3. La formule de BLANEY CRIDDLE MODIFIEE en introduisant la notion de température effective.
4. La formule de HARGREAVES
5. La formule de THORNTHWAITE.
6. Ainsi qu'une modélisation purement mathématique basée sur le séries de Fourier concernant et à titre indicatif et typique les trois stations synoptiques à savoir: Batna, Dar El-Beida et Sania - Oran.

### III.2. Calcul et calibrage

Il s'agit, comme ci indiqué de faire un calcul de l'évapotranspiration potentielle par plusieurs formules puis les faire calibrer en se basant sur la relation de PENMAN MONTEITH de référence, Cependant le seul handicap qui nous confronte c'est bien l'utilisation de cette relation, qui est recommandé pour l'estimation de la valeur de l'ETP journalière, alors notre contexte d'étude est cerné par la donnée à l'échelle mensuelle. Pour remédier à ce problème d'échelle il faut y à avoir une procédure pour la transition de la valeur journalière vers la valeur mensuelle.

La corrélation entre les valeurs obtenues par la somme des l'évapotranspirations journalières pour un mois donné et celles de la valeur obtenue par l'utilisation des paramètres moyens mensuels et la valeur du jour médian « le 15<sup>ème</sup> jour de chaque mois » du mois considéré montre que cette dernière est de l'ordre de 98 à 99% avec une erreur maximale qui ne dépasse pas 3%.

A ce moment on peut garder les valeurs moyennes des autres paramètres pour le calcul de l'ETP moyenne mensuelle :

- La température moyenne
- La vitesse du vent.
- L'insolation.
- L'humidité relative.

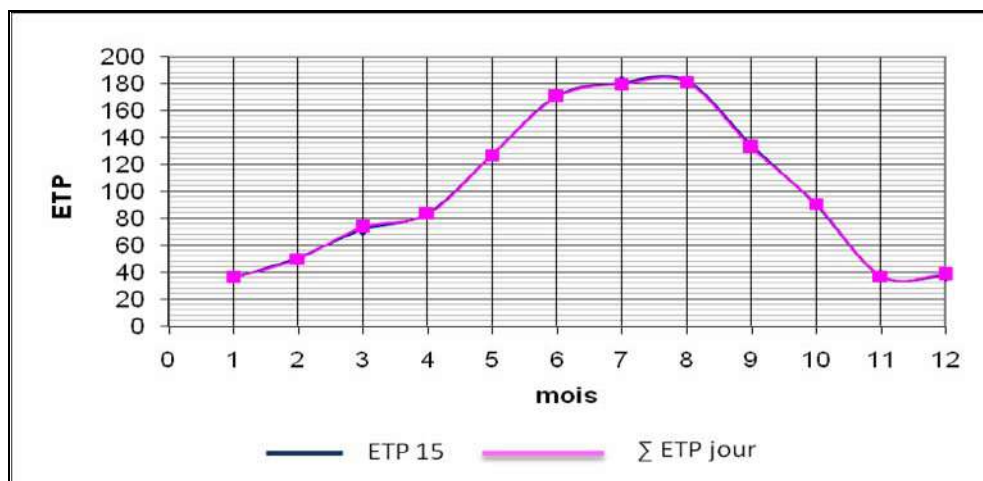
Remarque:

Cette corrélation se fait sur les résultats de la somme des valeurs de l'ETP journalière des 12 mois de l'an 2004 pris comme exemple et les valeurs obtenues par l'utilisation des paramètres

moyennes de chaque mois, les tableaux ci-dessous montrent les résultats de corrélation pour la station météorologique Dar El-Beida – Alger prise aussi comme exemple.

**Tableau 9 : Valeurs d'erreur relative. Cas de la station Dar El-Beida.**

Mois	ETP <sub>moy</sub> 15 <sup>eme</sup> jour	$\sum$ ETP <sub>JOUR</sub>	$\Delta$ ET "erreur"
Janvier	35.8	35.8	-0.15761
Février	50.7	49.8	1.85325
Mars	71.5	73.6	-2.88615
Avril	83.3	83.0	0.32181
Mai	126.8	126.5	0.17928
Juin	170.7	170.2	0.24107
Juillet	180.8	179.6	0.67839
Aout	182.0	181.1	0.48545
Septembre	133.8	132.8	0.76067
Octobre	90.1	90.5	-0.49342
Novembre	37.5	37.1	0.90312
Décembre	37.4	38.1	-1.95632



**Figure 10: Répartition des valeurs de l'ET pour les deux types de calcul.**

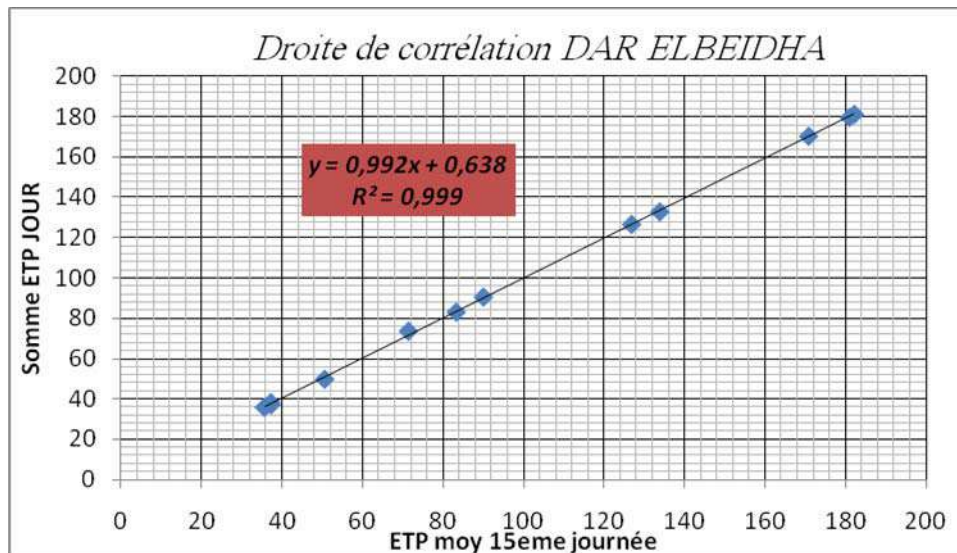


Figure 11: La droite de corrélation. Cas de la station DAR El-Beida Alger, l'an 2004.

#### Remarque :

En comparant les deux courbes, on constate qu'elles prennent la même allure et elles sont presque superposées l'une sur l'autre ce qui nous permet d'utiliser la valeur médiane de chaque moi pour l'estimation de l'évapotranspiration moyenne mensuelle.

### III.3. Estimation de l'évapotranspiration

#### III.3.1. Formule initiale de BLANEY-CRIDDLE

La formule de BLANEY-CRIDDLE est la plus ancienne relation utilisée pour l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle car en 1931 Harry Blaney pensait que l'ETP dépendait de deux facteurs essentiels :

- La force de l'énergie évaporante.
- L'humidité relative de l'air ou le déficit de saturation.

La formule délivrée en 1945, par les auteurs Harry Blaney et Wayne Criddle indique que le deuxième facteur joue un rôle moins important que prévu vis-à-vis du potentielle énergétique et à l'état de liaison de l'eau à la surface mise en évaporation, la forme définitive de l'ETP est la suivante (relation (1.11), chapitre I) :

$$ETP = a P (0.46 t + 8.13) + b$$

Avec :

- ✓ a et b sont les coefficients à ajuster
- ✓ P : durée d'éclairement en %
- ✓ t : température moyenne mensuelle en°C.

**III.3.1.1 démarche et calcul**

La procédure de calibrage s'appuie sur l'enchaînement suivant :

- 1- Calcul de l'ETP par la formule de PENMAN MONTEITH.
- 2- Calcul de l'ETP par la formule de BALNEY-CRIDDLE en prenant les valeurs des coefficients a et b égales à l'unité.
- 3- Calculer l'erreur quadratique entre les deux formules pour chaque mois.
- 4- Déduire la valeur moyenne de l'erreur quadratique pour toute la série, chaque tableau a une valeur moyenne du mois considéré.
- 5- En utilisant le solveur de l'Excel, on peut résoudre le système d'équations suivant :
 
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser l'erreur quadratique moyenne } EQ = \sum (ET_{PM} - ET_{BC})^2 / n ; \text{ arrêter le calcul si } EQ_n \approx \\ EQ_{n+1} \end{array} \right.$$
- 6- Déduire les valeurs des coefficients a et b puis remplir le tableau récapitulatif qui sera la base des données pour la l'étape suivante qui est la cartographie des coefficients a et b.
- 7- Comparaison les résultats obtenus avec ceux obtenus par la formule de PENMAN MONTEITH.

L'organigramme suivant montre la démarche de calibrage de la formule de BALNEY-CRIDDLE.

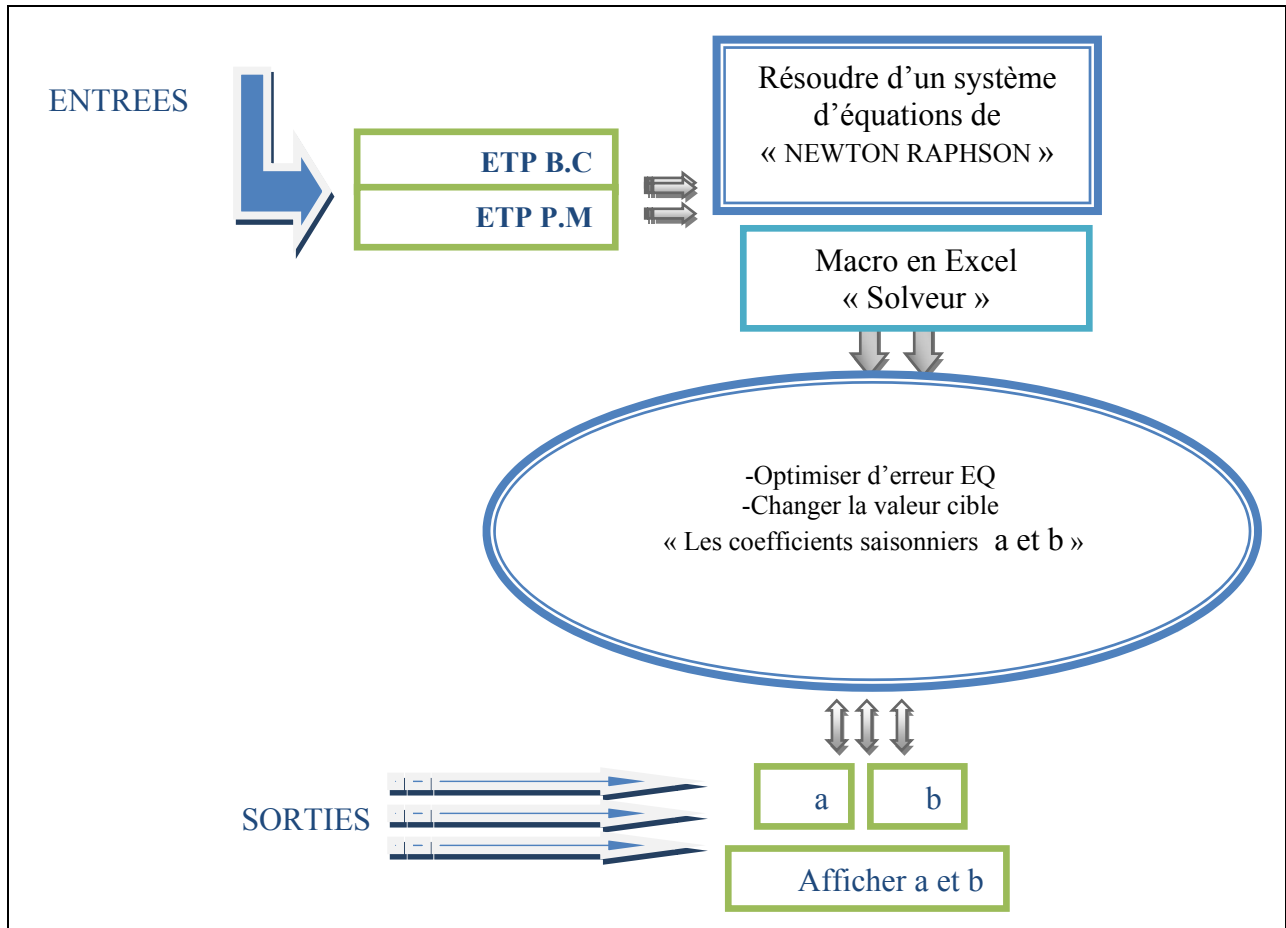


Figure 12: L’organigramme de calibrage

III.3.1.2. Exemple de calcul

L’exemple de calcul concerne la station Dar El Beidha – Alger, dont les caractéristiques géographiques sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau 10 : Caractéristiques géographiques de la station. Cas de la station Dar El-Beida

Nom de la station	Latitude	Longitude	Altitude (mNGA)
DAR ELBEIDA	36°41	03°13E	25

Cet exemple est l’application numérique pour le mois de Janvier où les résultats des opérations effectuées sont reportés dans le tableau suivant:

Tableau 11 : Calibrage des coefficients a et b du moi de janvier

Année	janvier						a	b				
		ETP penman	t°C	Vent	Ins,	Hr	1.88	-132.54	ETP <sub>ANRH</sub>	EQ	durée th jour	P% mensuelle
1975	43.95	11.17	3.06	6.11	71.00	43.34	0.3718	9.89	7.00	42.12	3.3841	
1976	33.22	9.32	2.86	5.55	78.00	37.43	17.7457	9.89	7.00	30.89	5.3920	
1977	47.75	12.12	4.13	4.00	76.00	46.38	1.8663	9.89	7.00	47.88	0.0164	
1978	53.74	10.02	4.37	5.26	69.00	39.68	197.7721	9.89	7.00	35.16	345.2240	
1979	57.07	13.46	4.11	4.37	71.00	50.67	41.0453	9.89	7.00	56.00	1.1477	
1980	42.03	11.05	3.18	4.59	74.00	42.95	0.8349	9.89	7.00	41.36	0.4510	
1981	46.72	9.57	3.92	6.42	71.00	38.23	72.1363	9.89	7.00	32.42	204.7106	
1982	52.23	12.38	3.50	5.14	69.00	47.22	25.0423	9.89	7.00	49.47	7.6041	
1983	29.16	9.64	1.31	7.10	70.00	38.46	86.4900	9.89	7.00	32.85	13.6068	
1984	43.49	11.18	3.73	4.53	76.00	43.38	0.0124	9.89	7.00	42.18	1.7137	
1989	26.21	10.10	1.80	5.58	82.00	39.93	188.3154	9.89	7.00	35.64	88.9622	
1991	31.24	10.00	2.30	6.06	78.00	39.61	70.0248	9.89	7.00	35.03	14.3717	
1992	28.43	9.40	1.90	5.35	78.00	37.70	85.7799	9.89	7.00	31.40	8.8042	
1993	22.96	9.00	1.30	7.00	81.00	36.42	181.1707	9.89	7.00	28.98	36.2455	
1994	32.37	11.00	2.90	5.39	82.00	42.80	108.8272	9.89	7.00	41.09	75.9934	
1995	31.76	10.80	2.30	5.74	79.00	42.17	108.1832	9.89	7.00	39.88	65.8372	
MOY	38.90					41.65	74.1012			38.90	54.5915	

De la même façon ; on répète la procédure pour les autres mois et les autres stations.

**Tableau 12 : Tableau des valeurs des coefficients a et b pour toutes les stations-mois**

N. STA	X.lambert (Km)	X.lambert (Km)	Janvier		Fév		Mars		AVRIL		Mai		Juin	
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
ANNABA	954.843	405.119	0.74	-24.56	1	-36.9	1.17	-53.83	1.24	-50.21	1.93	-169.98	0.52	82.45
BBA	677.3	309.256	-0.13	39.08	1.23	-50.02	0.66	15.03	0.91	7.3	1.5	-71.17	1.68	-97.87
BATNA	830.281	274.83	1.49	-72.36	1.28	-46.11	0.8	6.8	2.05	-123.79	3.26	-336.89	2.49	-240.17
TELEMCEN	108.219	157.068	1.11	-58.99	1.37	-70.21	0.21	62.68	2.29	-185.59	1.88	-153.84	1.23	-46.22
SKIKDA	864.734	389.128	0.89	-40.43	1.49	-88.53	-0.51	145.82	0.86	-9.85	2.16	-212.45	0.39	94.73
SAIDA	281.583	169.726	1.67	-97.05	0.77	-10.59	1.06	-28.18	1.3	-45.28	1.83	-129.74	1.56	-89.84
TEBASSA	967.789	216.735	1.37	-68.89	2.02	-112.18	1.3	-53.96	1.87	-116.35	2.71	-271.96	2.29	-225.5
SANIA	197.91	265.035	1.43	-88.93	1.72	-101.31	0.25	71.66	2.37	-187.09	1.73	-114.21	1.72	-115.56
GUALMA	927.125	362.281	1.86	-129.62	1.42	-82.46	0.38	27.35	1.8	-134.12	1.64	-133.51	1.29	-67.86
BENISAF	128.201	230.286	1.75	-120.5	2.41	-180.01	-0.48	157.34	-0.76	228.56	0.1	131.89	1.07	-26.77
CHELEF	377.367	324.969	0.43	-7.9	1.01	-43.88	2.1	-166.08	1.78	-119.68	1.61	-102.08	2.44	-265.54
CONSTONTINE	851.858	338.569	1.04	-52.04	1.11	-46.34	0.72	-2.3	1.44	-77.77	1.31	-68.79	1.44	-83.48
DAR ELBEIDA	546.37	375.998	1.88	-132.54	1.66	-100.66	0.21	59.37	0.9	-9.99	1.38	-82.25	1.16	-35.14
MELIANA	458.303	333.452	0.67	-22.43	1.6	-89.84	1.73	-110.02	1.27	-48.92	1.97	-157.7	1.94	-156.25
M'SILA	662.927	263.795	2.47	-161.38	1.25	-43.33	0.15	95.64	2.57	-192.4	0.67	101.33	1.24	9.31
NAAMA	220.324	1.466	3.09	-189.95	2.61	-150.92	3.74	-302.78	-1.97	376.2	2.11	-162.25	1.93	-137.33
TIARET	280.11	230.638	1.33	-61.07	1.96	-99.87	1.44	-60.09	-2.61	430.26	2.15	-160.65	2.19	-181.25
N. STA	X.lambert (Km)	X.lambert (Km)	Juillet		Aout		Septembre		Octobre		Novembre		Décembre	
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
ANNABA	954.843	405.119	0.84	43.55	1.8	-136.79	1.32	-73	1.36	-92.81	0.46	6.03	0.33	10.31
BBA	677.3	309.256	0.4	160.89	1	21.95	1.03	-11.62	0.67	12.63	0.37	11.78	0.41	-4.44
BATNA	830.281	274.83	0.6	122.63	1.83	-127.2	1.22	-40.23	1.05	-35.03	0.98	-38.4	1.42	-70.18
TELEMCEN	108.219	157.068	1.54	-100.32	1.68	-127.04	0.55	49.55	1.13	-58.41	1.13	-60.41	1.29	-77.67
SKIKDA	864.734	389.128	0.81	35.65	2	-201.55	1.27	-76.06	1.24	-82.41	1.24	-76.76	1.43	-92.86
SAIDA	281.583	169.726	1.06	14.02	1.26	-36.85	0.91	2.42	1.4	-86.53	1.07	-50.98	1.37	-77.62
TEBASSA	967.789	216.735	1.3	-39.18	1.91	-166.14	1.41	-81.89	1.49	-99.53	0.91	-35.34	0.75	-25.97
SANIA	197.91	265.035	1.3	-36.79	1.83	-142.89	0.67	40.14	1.79	-140.64	1.14	-62.77	0.84	-37.79
GUALMA	927.125	362.281	1.77	-159.46	1.11	-28.73	1.32	-85.04	2.09	-205.4	0.88	-49.4	0.58	-25.05
BENISAF	128.201	230.286	-0.17	215.93	0.99	-18.49	1.12	-52.08	-0.6	174.66	-0.23	86.04	0.75	-24.11
CHELEF	377.367	324.969	1.24	-19.46	0.34	156.1	0.76	27.43	2.18	-203.94	1.38	-95.71	1.14	-73.62
CONSTONTINE	851.858	338.569	2.19	-228.44	0.97	0.54	1.82	-152.66	1.41	-97.76	0.98	-49.73	0.96	-48.46
DAR ELBEIDA	546.37	375.998	1.35	-62.54	1.09	-19.76	0.24	95.49	1.06	-52.31	1.32	-86.87	1.23	-74.82
MELIANA	458.303	333.452	0.86	58.02	0.95	27.31	1.25	-53.15	1.49	-103.57	0.7	-23.68	0.81	-38.82
M'SILA	662.927	263.795	1.98	-156.07	-0.02	267.71	0.53	91.88	2.81	-261.18	2.16	-156.19	0.69	-15.16
NAAMA	220.324	1.466	1.35	-53.39	-3.02	803	3.55	-394.43	0.24	62.68	0.46	5.73	-0.31	56.8
TIARET	280.11	230.638	3.2	-403.07	4.57	-655.72	0.94	11.4	1.16	-44.95	2.77	-195.76	1.5	-84.09

### III.3.2. Formule dite ANRH

Elle est développée en 2002 sous la direction du Professeur J.P.Laborde et elle s'écrit sous de la forme suivante (relation (1.23), Chapitre I) :

$$ETP_{ANRH} = K_r K_m (H - 187)(0.032 t + 0.077)$$

Avec:

- $ETP_{ANRH}$  évapotranspiration potentielle exprimé en millimètre par mois ;
- $K_r$  est un coefficient régional que l'on peut lire sur le tableau 4 (chapitre I);
- $K_m$  est un coefficient mensuel dont les valeurs sont données à la figure 8 (chapitre I);
- $t$  est la température moyenne mensuelle pour le mois considéré et exprimée en °C.
- $H$  est la durée théorique mensuelle d'insolation (en heures par mois) et elle s'exprime

en fonction des Y Lambert selon la formule suivante :

$$H_i = a_i Y + b_i$$

- $Y$  étant la coordonnée Lambert zone Nord-Algérie (en km)

Les paramètres mensuels  $a_i$  et  $b_i$  sont donnés dans le tableau 5 (voir chapitre I).

L'objectif de cette partie est de faire une comparaison entre les résultats calculés par la présente formule et celle de PENMAN-MONTEITH.

On parle d'une amélioration si l'erreur quadratique diminue lors d'un ajout d'un nouveau paramètre de correction et en conséquence la relation de l'ANRH devient :

$$ETP_{ANRH} = K_s K_r K_m (H - 187)(0.032 t + 0.077) \quad (3.1)$$

Avec:

- $K_s$  : représente le troisième coefficient saisonnier correctif.
- Ce coefficient prend l'indice «  $K_{ss}$  » pour la saison sèche, et «  $K_{sh}$  » pour la saison humide.

#### III.3.2.1. Résultats des calculs et formulation

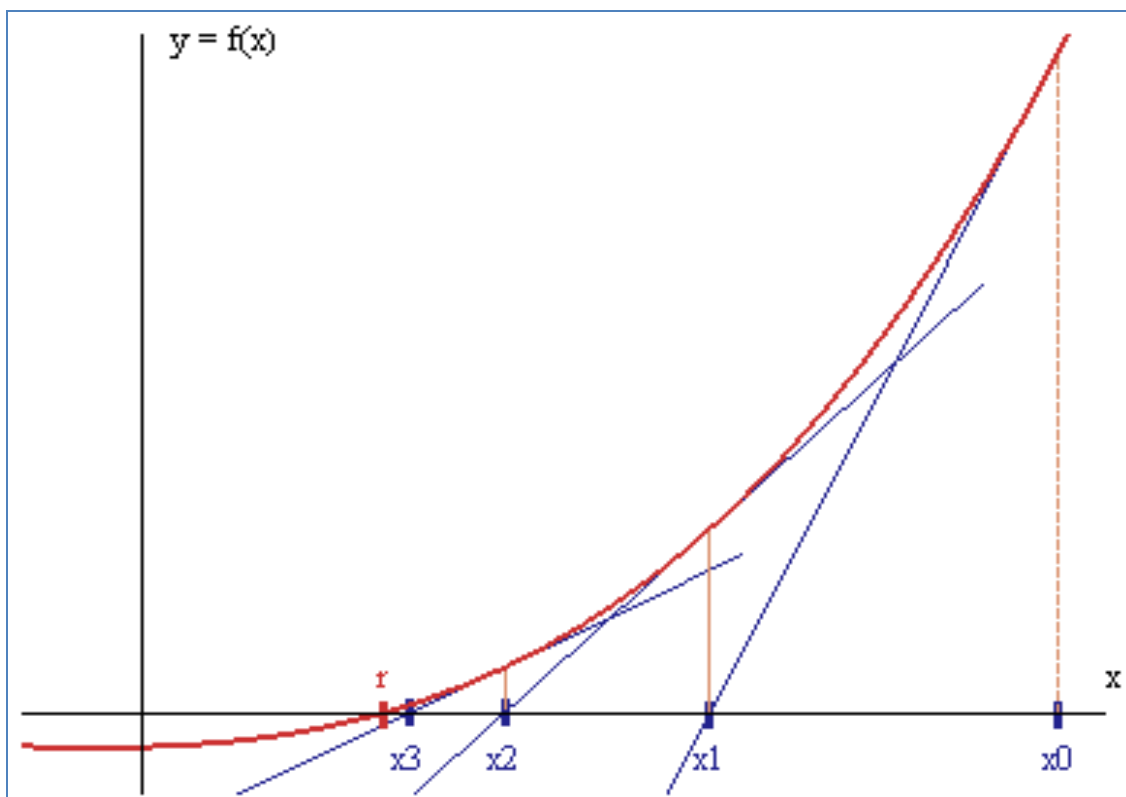
Cette partie d'étude est consacrée à la reformulation moyennant la méthode de Newton-Raphson pour estimer comme nouveaux paramètres les coefficients saisonniers «  $K_{ss}$  et  $K_{sh}$  » en réduisant l'erreur quadratique de chaque saison en utilisant toujours le solveur de l'Excel.

##### III.3.2.1.a. Aperçu sur la technique de Newton-Raphson :

La méthode de Newton-Raphson est basée sur l'utilisation de la tangente en un point de la courbe d'une fonction  $f$ . Plus précisément, le choix d'une première valeur  $x_0$  approchée d'un zéro

réel à localiser détermine un premier point  $(x_0, f(x_0))$  sur la courbe qui sera considéré comme un premier point de tangence. Ce nombre  $x_0$  est appelé amorce (racine de départ) du procédé itératif Si de Newton-Raphson.

L'abscisse  $x_1$  du point d'intersection de la première tangente avec l'axe des  $x$  sera considérée comme une deuxième valeur approchée du zéro à localiser. À son tour, cette valeur permettra de considérer un deuxième point de tangence  $(x_1, f(x_1))$ . À nouveau, l'abscisse  $x_2$  du point d'intersection de la deuxième tangente avec l'axe des  $x$  sera considérée comme une troisième valeur approchée du zéro. En poursuivant ce procédé itérativement, on obtiendra, sous certaines conditions, une séquence de différentes valeurs  $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots$  qui vont se rapprocher de plus en plus d'un zéro réel de la fonction  $f$  (voir la fig.11).



*Figure 13 : Convergence vers la (racine r) par la méthode de N. Raphson.*

La méthode de Newton-Raphson pour estimer une racine de la fonction  $f(x)$  s'écrit comme suit : Soit  $X_0$ , une première estimation de la racine. On détermine les  $X_n$  selon la formule suivante :

$$X_n = X_{n-1} - f(X_{n-1})/f'(X_{n-1}) \text{ pour } n \geq 1$$

**Conditions d'arrêt :**

- Si  $|X_n - X_{n-1}| < \text{EPSILON}$  alors  $X_n$  est le résultat de l'estimation de la racine
- Si  $n > \text{MAX\_ITER}$  alors la méthode diverge ou n'a pas la convergence assez rapide pour fournir un résultat.

- Si  $f'(X_{n-1})=0$ , il y aura division par zéro.

**Remarque :**

Les indices  $X_n$ ,  $X_{n-1}$  représentent  $EQ_n$  et  $EQ_{n-1}$  entre la formule dite ANRH et celle de PENMAN-MONTEITH, on peut arrêter les itérations lorsque  $|EQ_n - EQ_{n-1}| \leq \text{zéro} (\varepsilon ; \text{Epsilon})$  puis nous pouvons afficher la valeur cible qui est le coefficient saisonnier qui prend deux valeurs l'une correspond à la saison sèche et l'autre se caractérise la saison humide ( $K_{ss}$  et  $K_{sh}$ ).

**III.3.2.1.b. Exemple de calcul**

Pour l'illustration, nous présenterons à titre d'exemple la station Dar El-Beida Alger.

Le calcul prend l'enchaînement suivant :

1. Calcul des ETP moyennes mensuelles de chaque mois par PENMAN-MONTEITH.
2. Calcul des ETP moyennes mensuelles de chaque mois par la formule de l'ANRH.
3. Calcul de l'erreur quadratique entre les deux formules pour chaque mois.
4. Calcul de la moyenne de l'erreur quadratique saisonnière entre les deux formules pour les deux saisons ( $EQ_{ss}$  et  $EQ_{sh}$ ).
5. Déduction des valeurs des coefficients saisonniers en utilisant la macro "solveur" de l'Excel.

**Remarque :**

On peut estimer la valeur moyenne de l'erreur quadratique saisonnière par la sommation des valeurs des erreurs quadratiques mensuelles de chaque mois qui appartient à la saison considérée donc on peut écrire :

$$EQ = \sum EQ_{saisonnière}$$

Les mois formant la saison sèche sont : Avril, Mai, Juin, Juillet, Aout, et Septembre.

Les mois formant la saison humide sont : Janvier, Février, Mars, Octobre, Novembre, et Décembre.

Les résultats de calcul sont reportés dans les tableaux ci-après :

Tableau 14 : Exemple de calcul « cas de la station Dar el Beida -Alger

JANVIER	kr	km	a	b	H	Ksh	Kss	
31	0.89	0.96	-0.0218	315	306.72	0.976	1.023	
Date	Année	ETPpenman	t°C	V <sub>vent</sub> (Km/h)	Ins(h)	Hr(%)	ETP <sub>ANRH</sub> (mm)	EQ
15/01/1975	1975	43.95	11.17	3.06	6.11	71	43.36	0.355653
15/01/1976	1976	33.22	9.32	2.86	5.55	78	37.44	17.84317
15/01/1977	1977	47.75	12.12	4.13	4	76	46.4	1.827386
15/01/1978	1978	53.74	10.02	4.37	5.26	69	39.69	197.4277
15/01/1979	1979	57.07	13.46	4.11	4.37	71	50.68	40.84514
15/01/1980	1980	42.03	11.05	3.18	4.59	74	42.96	0.859327
15/01/1981	1981	46.72	9.57	3.92	6.42	71	38.24	71.93596
15/01/1982	1982	52.23	12.38	3.5	5.14	69	47.24	24.89666
15/01/1983	1983	29.16	9.64	1.31	7.1	70	38.47	86.71099
15/01/1984	1984	43.49	11.18	3.73	4.53	76	43.39	0.009641
15/01/1989	1989	26.21	10.1	1.8	5.58	82	39.94	188.6539
15/01/1991	1991	31.24	10	2.3	6.06	78	39.62	70.22961
15/01/1992	1992	28.43	9.4	1.9	5.35	78	37.71	85.99557
15/01/1993	1993	22.96	9	1.3	7	81	36.43	181.4735
15/01/1994	1994	32.37	11	2.9	5.39	82	42.82	109.1031
15/01/1995	1995	31.76	10.8	2.3	5.74	79	42.18	108.4542
	MOY	38.9					41.66	
FEVRIER	kr	km	a	b	H			
28	0.89	1.22	-0.011	307	302.82			
Date	Année	ETPpenman	t°C	V <sub>vent</sub> (Km/h)	Ins(h)	Hr(%)	ETP <sub>ANRH</sub> (mm)	EQ
15/02/1975	1975	57.76	11.14	3.33	6.66	71	53.18	21.00972
15/02/1976	1976	49.73	11.32	3.55	4.12	77	53.9	17.43735
15/02/1977	1977	58.76	12.85	3.42	5.69	75	59.92	1.347646
15/02/1978	1978	68.33	13.89	3.76	6.03	69	64	18.73055
15/02/1979	1979	71.81	12.59	5.16	4.63	70	58.89	167.0364
15/02/1980	1980	51.08	12.29	2.75	5.88	76	57.7	43.77518
15/02/1981	1981	54.04	10.76	3.52	5.79	74	51.71	5.422076
15/02/1982	1982	48.48	11.4	3.03	4.96	77	54.21	32.89908
15/02/1983	1983	49.85	10.03	2.84	5.41	72	48.85	1.008677
15/02/1984	1984	55.87	10.62	4.03	4.46	73	51.13	22.40128
15/02/1990	1990	50.05	10.9	2.5	8.36	77	52.25	4.845729
15/02/1991	1991	42.88	10.3	3.2	4.5	81	49.89	49.17016
15/02/1992	1992	44.19	10.1	2	7.17	77	49.11	24.22418
15/02/1993	1993	36.99	10.2	1.9	5.5	84	49.5	156.5948
15/02/1994	1994	59.4	12	3.6	7.25	74	56.57	8.026392
15/02/1995	1995	48.43	12.7	1.7	7.96	78	59.32	118.5111
	MOY	52.98					54.38	

<b>MARS</b>	<b>kr</b>	<b>km</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>H</b>			
<b>31</b>	<b>0.89</b>	<b>1.11</b>	<b>-0.0012</b>	<b>371</b>	<b>370.54</b>			
<b>Date</b>	<b>Année</b>	<b>ETPpenman</b>	<b>t°C</b>	<b>V<sub>vent</sub> (Km/h)</b>	<b>Ins(h)</b>	<b>Hr(%)</b>	<b>ETP<sub>ANRH</sub>(mm)</b>	<b>EQ</b>
15/03/1975	<b>1975</b>	<b>90.17</b>	11.98	4.24	6.08	71	<b>81.47</b>	<b>75.71197</b>
15/03/1976	<b>1976</b>	<b>84.9</b>	11.7	3.05	7.14	71	<b>79.84</b>	<b>25.65495</b>
15/03/1977	<b>1977</b>	<b>86.08</b>	12.81	2.55	8.24	73	<b>86.15</b>	<b>0.005453</b>
15/03/1978	<b>1978</b>	<b>86.34</b>	12.75	2.9	7.17	71	<b>85.83</b>	<b>0.259192</b>
15/03/1979	<b>1979</b>	<b>84.96</b>	12.66	3.57	5.77	72	<b>85.32</b>	<b>0.130882</b>
15/03/1980	<b>1980</b>	<b>95.05</b>	13.33	3.74	6.8	70	<b>89.07</b>	<b>35.70053</b>
15/03/1981	<b>1981</b>	<b>85.52</b>	14.58	2.96	6.22	74	<b>96.17</b>	<b>113.3412</b>
15/03/1982	<b>1982</b>	<b>89.63</b>	12.76	3.28	7.27	71	<b>85.86</b>	<b>14.2285</b>
15/03/1983	<b>1983</b>	<b>89.98</b>	12.94	3.19	7.13	70	<b>86.89</b>	<b>9.584587</b>
15/03/1984	<b>1984</b>	<b>85.54</b>	11.23	3.65	6.79	72	<b>77.18</b>	<b>69.90186</b>
15/03/1990	<b>1990</b>	<b>82.62</b>	14.8	2.9	5.97	76	<b>97.42</b>	<b>218.9785</b>
15/03/1991	<b>1991</b>	<b>88.97</b>	14	4.2	5.65	75	<b>92.89</b>	<b>15.33772</b>
15/03/1992	<b>1992</b>	<b>67.24</b>	12.3	2.8	5.52	83	<b>83.26</b>	<b>256.7457</b>
15/03/1993	<b>1993</b>	<b>73.95</b>	12.2	2.4	7.26	80	<b>82.7</b>	<b>76.47142</b>
15/03/1994	<b>1994</b>	<b>77.21</b>	13.8	1.9	7.81	81	<b>91.76</b>	<b>211.6814</b>
15/03/1995	<b>1995</b>	<b>77.35</b>	12.7	2.1	7.61	77	<b>85.53</b>	<b>66.94893</b>
	<b>MOY</b>	<b>84.09</b>					<b>86.71</b>	

<b>AVRIL</b>	<b>kr</b>	<b>km</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>H</b>			
<b>30</b>	<b>0.89</b>	<b>1.17</b>	<b>0.0098</b>	<b>389</b>	<b>392.72</b>			
<b>Date</b>	<b>Année</b>	<b>ETPpenman</b>	<b>t°C</b>	<b>V<sub>vent</sub> (Km/h)</b>	<b>Ins(h)</b>	<b>Hr(%)</b>	<b>ETP<sub>ANRH</sub>(mm)</b>	<b>EQ</b>
15/04/1975	<b>1975</b>	<b>100.94</b>	14.17	3.25	6.96	77	<b>116.29</b>	<b>235.5333</b>
15/04/1976	<b>1976</b>	<b>108.58</b>	14.16	3.32	6.79	70	<b>116.22</b>	<b>58.29851</b>
15/04/1977	<b>1977</b>	<b>111.93</b>	14.38	2.56	8.68	71	<b>117.75</b>	<b>33.82944</b>
15/04/1978	<b>1978</b>	<b>99.81</b>	13.79	3.66	6.06	75	<b>113.66</b>	<b>191.7046</b>
15/04/1979	<b>1979</b>	<b>112.02</b>	13.18	3.77	7.53	70	<b>109.35</b>	<b>7.109459</b>
15/04/1980	<b>1980</b>	<b>104.63</b>	12.89	3.53	7.41	74	<b>107.31</b>	<b>7.150706</b>
15/04/1981	<b>1981</b>	<b>95.3</b>	15.24	3.26	5.54	78	<b>123.78</b>	<b>811.0576</b>
15/04/1982	<b>1982</b>	<b>112.52</b>	14.61	3.12	7.82	71	<b>119.37</b>	<b>47.01703</b>
15/04/1983	<b>1983</b>	<b>123.89</b>	15.59	3.37	7.71	65	<b>126.29</b>	<b>5.740037</b>
15/04/1984	<b>1984</b>	<b>117.82</b>	15.49	3.53	7.95	73	<b>125.58</b>	<b>60.27661</b>
15/04/1989	<b>1989</b>	<b>114.64</b>	15	4.3	7.26	75	<b>122.12</b>	<b>56.01189</b>
15/04/1990	<b>1990</b>	<b>104.61</b>	15	3.3	6.87	76	<b>122.12</b>	<b>306.8316</b>
15/04/1991	<b>1991</b>	<b>105.66</b>	13.4	3	8.23	75	<b>110.9</b>	<b>27.39136</b>
15/04/1992	<b>1992</b>	<b>93.45</b>	14.3	3	6.65	82	<b>117.21</b>	<b>564.6733</b>
15/04/1993	<b>1993</b>	<b>98.38</b>	11.9	2.9	8.27	77	<b>100.37</b>	<b>3.965803</b>
15/04/1994	<b>1994</b>	<b>122.46</b>	14.5	3.5	9.8	74	<b>118.61</b>	<b>14.81597</b>
15/04/1995	<b>1995</b>	<b>109.4</b>	13.9	2	9.33	71	<b>114.41</b>	<b>25.0284</b>
	<b>MOY</b>	<b>108</b>					<b>116.55</b>	

<b>MAI</b>	<b>kr</b>	<b>km</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>H</b>			
<b>31</b>	<b>0.89</b>	<b>1.02</b>	<b>0.0201</b>	<b>429</b>	<b>436.64</b>			
<b>Date</b>	<b>Année</b>	<b>ETPpenman</b>	<b>t°C</b>	<b>V<sub>vent</sub> (Km/h)</b>	<b>Ins(h)</b>	<b>Hr(%)</b>	<b>ETP<sub>ANRH</sub>(mm)</b>	<b>EQ</b>
15/05/1975	<b>1975</b>	<b>131.55</b>	16.16	2.78	8.41	74.00	<b>137.84</b>	<b>39.4482</b>
15/05/1976	<b>1976</b>	<b>133.35</b>	17.43	2.62	8.50	77.00	<b>147.20</b>	<b>191.6524</b>
15/05/1977	<b>1977</b>	<b>135.31</b>	16.58	2.83	8.24	71.00	<b>140.90</b>	<b>31.22665</b>
15/05/1978	<b>1978</b>	<b>137.05</b>	16.73	3.60	7.80	73.00	<b>142.06</b>	<b>25.09851</b>
15/05/1979	<b>1979</b>	<b>151.38</b>	17.14	2.96	9.49	67.00	<b>145.10</b>	<b>39.42721</b>
15/05/1980	<b>1980</b>	<b>144.59</b>	16.85	3.65	8.37	71.00	<b>142.94</b>	<b>2.747866</b>
15/05/1981	<b>1981</b>	<b>141.77</b>	17.66	3.08	8.37	72.00	<b>148.94</b>	<b>51.48096</b>
15/05/1982	<b>1982</b>	<b>118.03</b>	17.74	3.18	5.74	77.00	<b>149.51</b>	<b>990.6437</b>
15/05/1983	<b>1983</b>	<b>151.57</b>	17.69	3.27	8.55	66.00	<b>149.16</b>	<b>5.820278</b>
15/05/1984	<b>1984</b>	<b>140.55</b>	16.18	4.03	7.50	70.00	<b>137.94</b>	<b>6.798706</b>
15/05/1989	<b>1989</b>	<b>148.71</b>	18.90	2.70	9.32	74.00	<b>158.14</b>	<b>88.8419</b>
15/05/1990	<b>1990</b>	<b>118.52</b>	15.60	2.80	7.68	80.00	<b>133.65</b>	<b>228.8376</b>
15/05/1991	<b>1991</b>	<b>150.20</b>	18.30	2.80	10.03	76.00	<b>153.69</b>	<b>12.16166</b>
15/05/1992	<b>1992</b>	<b>137.26</b>	19.00	2.00	9.16	81.00	<b>158.88</b>	<b>467.3693</b>
15/05/1993	<b>1993</b>	<b>155.68</b>	20.00	3.00	9.68	77.00	<b>166.30</b>	<b>112.8635</b>
15/05/1994	<b>1994</b>	<b>163.78</b>	19.50	2.90	10.10	69.00	<b>162.59</b>	<b>1.401309</b>
15/05/1995	<b>1995</b>	<b>125.57</b>	15.40	2.80	9.94	88.00	<b>132.16</b>	<b>43.50786</b>
	<b>MOY</b>	<b>140.29</b>					<b>147.47</b>	
<b>JUIN</b>	<b>kr</b>	<b>km</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>H</b>			
<b>30</b>	<b>0.89</b>	<b>1</b>	<b>0.0248</b>	<b>429</b>	<b>438.42</b>			
<b>Date</b>	<b>Année</b>	<b>ETPpenman</b>	<b>t°C</b>	<b>V<sub>vent</sub> (Km/h)</b>	<b>Ins(h)</b>	<b>Hr(%)</b>	<b>ETP<sub>ANRH</sub>(mm)</b>	<b>EQ</b>
15/06/1975	<b>1975</b>	<b>163.41</b>	19.99	3.15	10.08	73.00	<b>164.11</b>	<b>0.491586</b>
15/06/1976	<b>1976</b>	<b>172.41</b>	21.14	3.40	10.12	72.00	<b>172.53</b>	<b>0.013648</b>
15/06/1977	<b>1977</b>	<b>178.30</b>	20.05	3.13	10.70	63.00	<b>164.58</b>	<b>188.4363</b>
15/06/1978	<b>1978</b>	<b>166.62</b>	20.26	3.42	9.60	70.00	<b>166.10</b>	<b>0.268785</b>
15/06/1979	<b>1979</b>	<b>166.81</b>	22.24	3.23	8.71	70.00	<b>180.65</b>	<b>191.4333</b>
15/06/1980	<b>1980</b>	<b>186.40</b>	21.13	3.07	11.66	67.00	<b>172.50</b>	<b>193.0382</b>
15/06/1981	<b>1981</b>	<b>178.72</b>	21.11	3.73	10.42	71.00	<b>172.31</b>	<b>41.18776</b>
15/06/1982	<b>1982</b>	<b>187.19</b>	23.20	3.30	10.52	70.00	<b>187.67</b>	<b>0.229775</b>
15/06/1983	<b>1983</b>	<b>177.01</b>	22.02	3.28	9.75	68.00	<b>179.00</b>	<b>3.958965</b>
15/06/1984	<b>1984</b>	<b>161.17</b>	20.38	3.43	8.65	69.00	<b>166.96</b>	<b>33.44858</b>
15/06/1989	<b>1989</b>	<b>174.21</b>	22.30	2.60	10.23	69.00	<b>181.06</b>	<b>47.03297</b>
15/06/1991	<b>1991</b>	<b>175.38</b>	21.70	3.30	10.13	71.00	<b>176.67</b>	<b>1.655722</b>
15/06/1992	<b>1992</b>	<b>156.60</b>	20.50	3.10	9.10	74.00	<b>167.87</b>	<b>127.0828</b>
15/06/1993	<b>1993</b>	<b>176.51</b>	22.20	3.40	10.27	74.00	<b>180.33</b>	<b>14.59366</b>
15/06/1994	<b>1994</b>	<b>196.65</b>	22.30	3.50	11.47	66.00	<b>181.06</b>	<b>242.8715</b>
15/06/1995	<b>1995</b>	<b>159.67</b>	22.00	2.80	8.97	74.00	<b>178.87</b>	<b>368.4261</b>
	<b>MOY</b>	<b>173.57</b>					<b>174.52</b>	

JUILLET	kr	km	a	b	H			
31	0.89	0.97	0.023	436	444.74			
Date	Année	ETPpenman	t°C	V <sub>vent</sub> (Km/h)	Ins(h)	Hr(%)	ETP <sub>ANRH</sub> (mm)	EQ
15/07/1975	1975	212.73	25.21	2.97	11.73	66	201.27	131.3072
15/07/1976	1976	199.09	24.05	3.82	10.21	69	192.82	39.28622
15/07/1977	1977	187.46	23.29	3.42	9.67	68	187.24	0.050016
15/07/1978	1978	201.86	23.55	2.63	12.04	66	189.14	161.687
15/07/1979	1979	209.1	24.4	3.97	10.33	65	195.32	189.741
15/07/1980	1980	201.06	22.81	3.12	11.88	67	183.79	298.2248
15/07/1981	1981	208.82	22.83	4.23	11.27	67	183.92	619.5875
15/07/1982	1982	227.84	27.21	3.41	10.83	60	215.86	143.5136
15/07/1983	1983	209.49	26.41	3.34	10.14	66	210.01	0.264278
15/07/1984	1984	217.33	25.37	3.49	11.34	65	202.44	221.96
15/07/1989	1989	220.62	26.4	3.1	11.35	63	209.92	114.3623
15/07/1990	1990	207.83	25	3.5	11.1	70	199.72	65.71819
15/07/1991	1991	205.26	25.4	2.6	11.45	68	202.64	6.882428
15/07/1992	1992	183.59	24.1	2.3	10.81	75	193.16	91.53675
15/07/1993	1993	197.16	24.4	3.5	10.68	73	195.35	3.277908
15/07/1994	1994	222.02	26.7	2.7	12.06	65	212.11	98.26324
15/07/1995	1995	208.87	25.1	2.4	12.29	68	200.45	70.9133
	MOY	207.07					198.54	

AOUT	kr	km	a	b	H			
31	0.89	0.97	0.014	414	419.47			
Date	Année	ETPpenman	t°C	V <sub>vent</sub> (Km/h)	Ins(h)	Hr(%)	ETP <sub>ANRH</sub> (mm)	EQ
15/08/1975	1975	195.06	25.74	3	10.89	68	185.01	101.0606
15/08/1976	1976	192.15	25.29	3.09	10.57	66	182.02	102.6319
15/08/1977	1977	170.39	22.97	3.15	9.45	68	166.81	12.80998
15/08/1978	1978	180.76	24.64	2.81	10.39	70	177.74	9.111372
15/08/1979	1979	186.93	25.16	3.21	9.79	66	181.2	32.8282
15/08/1980	1980	187.1	25.47	3.06	10.35	70	183.22	15.1094
15/08/1981	1981	170.88	24.18	3.03	9.33	71	174.72	14.74823
15/08/1982	1982	186.58	25.3	4.04	8.94	69	182.12	19.87463
15/08/1983	1983	188.25	24.87	3.87	8.83	64	179.28	80.41494
15/08/1984	1984	176.69	23.47	3.51	9.79	70	170.06	43.92807
15/08/1989	1989	183.57	27.6	2.4	9.19	67	197.23	186.6868
15/08/1990	1990	199.22	25.6	3.1	11.55	70	184.08	229.2281
15/08/1991	1991	191.77	26.8	2.5	10.52	68	191.97	0.041415
15/08/1992	1992	194.36	25.7	2.5	11.58	68	184.74	92.59076
15/08/1993	1993	184.92	25.8	3.1	9.9	71	185.4	0.230346
15/08/1994	1994	203.85	28.5	2.8	10.39	68	203.15	0.49636
15/08/1995	1995	187.1	25.8	2.4	10.74	68	185.4	2.885866
	MOY	187.03					183.19	

SEPTEMBRE	kr	km	a	b	H			
<b>30</b>	<b>0.89</b>	<b>0.98</b>	<b>0.0031</b>	<b>370</b>	<b>371.18</b>			
Date	Année	ETPpenman	t°C	V <sub>vent</sub> (Km/h)	Ins(h)	Hr(%)	ETP <sub>ANRH</sub> (mm)	EQ
15/09/1975	<b>1975</b>	<b>130.17</b>	23.15	2.98	7.58	70.00	<b>134.46</b>	<b>18.3699</b>
15/09/1976	<b>1976</b>	<b>140.14</b>	22.96	2.78	9.03	65.00	<b>133.44</b>	<b>44.95744</b>
15/09/1977	<b>1977</b>	<b>135.49</b>	21.24	2.82	9.74	68.00	<b>124.41</b>	<b>122.9015</b>
15/09/1978	<b>1978</b>	<b>139.78</b>	21.96	2.68	10.19	68.00	<b>128.17</b>	<b>134.7921</b>
15/09/1979	<b>1979</b>	<b>113.84</b>	21.67	2.75	7.03	75.00	<b>126.69</b>	<b>165.0398</b>
15/09/1980	<b>1980</b>	<b>137.84</b>	23.62	2.94	8.81	71.00	<b>136.90</b>	<b>0.871059</b>
15/09/1981	<b>1981</b>	<b>146.08</b>	23.19	3.17	8.97	65.00	<b>134.64</b>	<b>130.8803</b>
15/09/1982	<b>1982</b>	<b>121.73</b>	23.30	3.10	6.35	72.00	<b>135.22</b>	<b>181.8936</b>
15/09/1983	<b>1983</b>	<b>156.15</b>	24.00	3.13	9.92	64.00	<b>138.91</b>	<b>297.13</b>
15/09/1984	<b>1984</b>	<b>143.10</b>	22.64	3.31	8.36	63.00	<b>131.78</b>	<b>128.1018</b>
15/09/1989	<b>1989</b>	<b>124.63</b>	23.60	3.00	7.10	74.00	<b>136.82</b>	<b>148.6389</b>
15/09/1990	<b>1990</b>	<b>127.20</b>	26.30	2.70	7.03	79.00	<b>151.03</b>	<b>567.828</b>
15/09/1991	<b>1991</b>	<b>138.43</b>	24.90	2.70	8.03	69.00	<b>143.66</b>	<b>27.4071</b>
15/09/1992	<b>1992</b>	<b>129.91</b>	23.60	2.50	8.52	73.00	<b>136.82</b>	<b>47.79972</b>
15/09/1993	<b>1993</b>	<b>137.26</b>	22.60	3.00	8.73	68.00	<b>131.56</b>	<b>32.50661</b>
15/09/1994	<b>1994</b>	<b>135.02</b>	23.70	2.50	8.73	70.00	<b>137.35</b>	<b>5.451545</b>
15/09/1995	<b>1995</b>	<b>123.53</b>	22.00	2.20	8.37	69.00	<b>128.41</b>	<b>23.76764</b>
	<b>MOY</b>	<b>134.14</b>					<b>134.72</b>	

OCTOBRE	kr	km	a	b	H			
<b>31</b>	<b>0.89</b>	<b>0.9</b>	<b>-0.0081</b>	<b>351</b>	<b>347.92</b>			
Date	Année	ETPpenman	t°C	V <sub>vent</sub> (Km/h)	Ins(h)	Hr(%)	ETP <sub>ANRH</sub> (mm)	EQ
15/10/1975	<b>1975</b>	<b>96.40</b>	18.11	2.65	9.18	67.00	<b>82.59</b>	<b>190.9298</b>
15/10/1976	<b>1976</b>	<b>91.21</b>	17.89	4.32	6.39	75.00	<b>81.70</b>	<b>90.52704</b>
15/10/1977	<b>1977</b>	<b>106.21</b>	20.95	3.21	6.40	64.00	<b>93.99</b>	<b>149.1722</b>
15/10/1978	<b>1978</b>	<b>76.21</b>	16.87	2.37	6.43	73.00	<b>77.57</b>	<b>1.86461</b>
15/10/1979	<b>1979</b>	<b>83.92</b>	19.50	2.88	5.59	74.00	<b>88.18</b>	<b>18.15785</b>
15/10/1980	<b>1980</b>	<b>98.34</b>	18.24	3.52	7.85	69.00	<b>83.10</b>	<b>232.3336</b>
15/10/1981	<b>1981</b>	<b>108.36</b>	20.80	3.11	7.49	64.00	<b>93.42</b>	<b>223.2266</b>
15/10/1982	<b>1982</b>	<b>89.67</b>	18.20	3.21	5.88	69.00	<b>82.92</b>	<b>45.55462</b>
15/10/1983	<b>1983</b>	<b>98.83</b>	20.24	2.65	7.66	67.00	<b>91.15</b>	<b>59.04888</b>
15/10/1984	<b>1984</b>	<b>82.39</b>	17.75	2.77	7.07	74.00	<b>81.14</b>	<b>1.540245</b>
15/10/1989	<b>1989</b>	<b>87.54</b>	19.80	2.60	7.84	78.00	<b>89.38</b>	<b>3.370649</b>
15/10/1990	<b>1990</b>	<b>104.47</b>	20.80	3.40	7.42	70.00	<b>93.40</b>	<b>122.5948</b>
15/10/1991	<b>1991</b>	<b>79.18</b>	19.10	2.80	5.39	76.00	<b>86.56</b>	<b>54.37785</b>
15/10/1992	<b>1992</b>	<b>85.15</b>	18.50	3.10	6.77	75.00	<b>84.14</b>	<b>1.005531</b>
15/10/1993	<b>1993</b>	<b>86.50</b>	19.20	3.10	6.03	74.00	<b>86.96</b>	<b>0.213181</b>
15/10/1994	<b>1994</b>	<b>85.38</b>	20.20	2.90	6.74	79.00	<b>90.99</b>	<b>31.42471</b>
15/10/1995	<b>1995</b>	<b>75.27</b>	20.20	1.20	6.42	74.00	<b>90.99</b>	<b>247.0457</b>
	<b>MOY</b>	<b>90.30</b>					<b>86.95</b>	

NOVEMBRE	kr	km	a	b	H			
30	0.89	0.9	-0.0185	311	303.97			
Date	Année	ETPpenman	t°C	V <sub>vent</sub> (Km/h)	Ins(h)	Hr(%)	ETP <sub>ANRH</sub> (mm)	EQ
15/11/1975	1975	49.44	14.09	2.99	5.12	74.00	48.25	1.435449
15/11/1976	1976	46.44	12.66	3.52	5.46	77.00	44.09	5.520419
15/11/1977	1977	54.87	15.51	3.24	6.00	74.00	52.42	6.023099
15/11/1978	1978	47.19	13.10	2.28	6.64	69.00	45.36	3.355427
15/11/1979	1979	45.14	12.75	3.00	5.65	76.00	44.35	0.616916
15/11/1980	1980	65.59	15.63	4.10	5.31	70.00	52.77	164.3661
15/11/1981	1981	50.66	14.83	2.12	7.54	68.00	50.42	0.058018
15/11/1982	1982	53.30	14.94	3.52	4.56	75.00	50.74	6.563603
15/11/1983	1983	61.88	17.62	3.04	5.13	70.00	58.58	10.8902
15/11/1984	1984	68.71	16.28	3.55	5.75	65.00	54.66	197.3535
15/11/1990	1990	49.22	14.90	2.90	4.77	75.00	50.63	1.988752
15/11/1991	1991	41.66	13.70	2.30	6.52	78.00	47.12	29.83645
15/11/1992	1992	35.51	14.60	1.90	6.29	85.00	49.75	202.9219
15/11/1993	1993	38.57	14.50	2.50	4.90	83.00	49.46	118.6899
15/11/1994	1994	45.88	16.10	2.20	7.03	79.00	54.14	68.25712
15/11/1995	1995	59.65	16.60	2.40	5.90	64.00	55.60	16.3688
MOY		50.86					50.52	

DECEMBRE	kr	km	a	b	H			
31	0.89	0.86	-0.0246	308	298.65			
Date	Année	ETPpenman	t°C	V <sub>vent</sub> (Km/h)	Ins(h)	Hr(%)	ETP <sub>ANRH</sub> (mm)	EQ
15/12/1975	1975	40.18	12.16	3.07	4.48	73.00	38.86	1.724283
15/12/1976	1976	49.72	13.17	4.79	4.37	76.00	41.56	66.54071
15/12/1977	1977	37.41	13.60	2.55	5.58	74.00	42.71	28.03487
15/12/1978	1978	57.82	14.37	4.21	5.09	69.00	44.76	170.6223
15/12/1979	1979	31.21	11.52	2.52	5.37	77.00	37.17	35.49665
15/12/1980	1980	42.81	10.18	4.23	4.74	74.00	33.59	85.04906
15/12/1981	1981	73.35	14.42	5.61	5.13	67.00	44.89	809.7988
15/12/1982	1982	42.44	10.97	4.05	4.14	75.00	35.69	45.48817
15/12/1983	1983	44.47	12.20	3.45	5.28	71.00	38.98	30.12942
15/12/1984	1984	47.62	11.76	3.87	4.14	71.00	37.80	96.37398
15/12/1989	1989	43.31	15.60	2.90	4.19	75.00	48.05	22.42873
15/12/1990	1990	32.81	10.50	3.30	5.61	78.00	34.44	2.6662
15/12/1991	1991	27.00	10.10	1.90	4.52	76.00	33.37	40.6311
15/12/1992	1992	36.41	12.70	3.10	5.55	77.00	40.31	15.18065
15/12/1993	1993	22.79	11.70	2.10	5.84	85.00	37.64	220.5402
15/12/1994	1994	36.91	12.20	3.40	4.48	78.00	38.98	4.261164
15/12/1995	1995	40.37	14.50	2.90	6.13	75.00	45.11	22.47597
MOY		41.57					39.64	
EQMsh		72.18184						
EQMss		114.1537						

**Remarque:**

La procédure ainsi adoptée est répétée autant de fois pour toutes les stations prises pour le présent travail et les valeurs des coefficients saisonniers trouvés sont consignées dans le tableau suivant :

**Tableau 15 : Tableau récapitulatif des coefficients saisonniers**

<i>N° station</i>	<i>NOM</i>	<i>INDIC</i>	<i>LAT</i>	<i>LONG</i>	<i>ALTITUDE</i>	<i>Ksh</i>	<i>Kss</i>
1	ANNABA	360	36°50	07°49E	3	<b>0.972</b>	<b>1.022</b>
2	BBA	444	36°04	04°40E	928	<b>1.024</b>	<b>0.998</b>
3	BATNA	468	35°43	06°21E	827	<b>1.070</b>	<b>0.980</b>
4	TELEMCEN	530	34°57	01°27W	210	<b>0.989</b>	<b>1.006</b>
5	SKIKDA	355	36°53	07°58E	680	<b>0.987</b>	<b>1.011</b>
6	SAIDA	536	34°52	01°15E	1009	<b>1.016</b>	<b>0.997</b>
7	TEBASSA	475	35°25	08°20E	17	<b>1.049</b>	<b>0.988</b>
8	SANIA	490	35°38	00°36W	889	<b>0.978</b>	<b>1.023</b>
9	GUALMA	403	36°28	07°28E	227	<b>0.917</b>	<b>1.037</b>
10	BENISAF	518	35°18	01°21W	68	<b>1.034</b>	<b>0.985</b>
11	CHELEF	425	36°13	01°20E	143	<b>0.926</b>	<b>1.050</b>
12	CONSTANTINE	419	36°17	06°37E	694	<b>1.002</b>	<b>1.016</b>
13	DAR ELBEIDA	390	36°41	03°13E	25	<b>0.975</b>	<b>1.023</b>
14	MELIANA	430	36°18	02°14E	137	<b>0.954</b>	<b>1.033</b>
15	M'SILA	467	35°40	04°30E	441	<b>1.030</b>	<b>1.003</b>
16	NAAMA	557	33°16	00°18W	1166	<b>1.046</b>	<b>0.961</b>
17	TIARET	511	35°21	00°17E	312	<b>1.097</b>	<b>1.038</b>

### III.3. Formule de BLANEY CRIDDLE Modifiée

Comme il est indiqué antérieurement, cette partie de calcul est consacrée à l'utilisation de la nouvelle formulation de BLANNY-CRIDDLE pour l'estimation de la valeur de l'évapotranspiration, mais cette fois ci avec l'introduction de la notion de la température effective qui est une combinaison empirique de la température moyenne..

On peut remplacer le terme de la température moyenne par un autre terme que l'on appelle température effective « notée par  $T_{\text{eff}}$  », donnée par la formule (1.13) du chapitre I.

La nouvelle formule de BLANNY-CRIDDLE utilisée dans cette partie est celle publiée en 1977 par Doorenbos et Pruitt, elle est sous la forme suivante (1.12) :

$$ETP = (a + 8.13bP) + (0.46bP)T_{\text{eff}}$$

#### III.3.1. Calcul et méthode

La démarche qui nous allons faire consiste à répondre à la question suivante :

A c'est que l'introduction de la notion de température effective améliore les résultats de l'évapotranspiration en comparant toujours avec ceux trouvés par la formule de PENMAN MONTEITH de référence et même avec la formule de l'ANRH?

Pour répondre à cette question il faut faire une étude comparative entre les résultats obtenus après le calcul de l'évapotranspiration potentielle par les trois formules, en déduisant l'erreur quadratique entre la formule de PENMAN-MONTEITH avec l'ANRH et de PENMAN-MONTEITH avec la formule de BLANNY-CRIDDLE modifiée.

La démarche de calcul se fait comme suit :

1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle par les deux formules PENMAN-MONTEITH et ANRH.
2. Déduire la valeur de l'erreur quadratique mensuelle entre les deux formules.
3. En connaissant les valeurs de la température minimale absolue  $T_{\min}$  et la température maximale absolue mensuelle  $T_{\max}$  on peut calculer la température effective par l'application de la formule (1.13) du chapitre I avec  $K=0.69$ .
4. Déduire la valeur de corrélation entre la température effective l'évapotranspiration potentielle calculée par PENMAN-MONTEITH.
5. La connaissance de la valeur du coefficient de corrélation nous renseigne sur la nature des résultats trouvés, à ce moment ; si la corrélation est bonne et acceptable donc les résultats qui seront trouvés par BLANNY-CRIDDLE modifiée seront justificatifs et acceptables également. La droite de corrélation prend la forme d'équation suivante:

$$Y = AX + B.$$

Equivalent à :

$$ETP_{BCM} = A + BT_{\text{eff}}$$

D'où

$$A = 0.46 \cdot b \cdot P \text{ et par conséquent } B = A / (0.46 \cdot P)$$

Et en déduisant alors les valeurs de a et b.

6. Calcul de l'évapotranspiration potentielle par l'application de la formule de BLANNY-CRIDDLE modifiée en introduisant le terme de la température effective  $T_{\text{eff}}$ .
7. Calcul de l'erreur quadratique mensuelle entre les valeurs trouvées par PENMAN-MONTEITH et celles trouvées par la formule de BLANNY-CRIDDLE modifiée.
8. Déduire l'erreur quadratique moyenne interannuelle et les coefficients de corrélation entre les valeurs trouvées par les deux formules BLANNY-CRIDDLE modifiée et PENMAN-MONTEITH.
9. Comparaison des résultats obtenus par les trois formules citées au préalable.
10. Répondre à la question posée précédemment.

### III.3.2. Calcul et comparaison

Le calcul a été élaboré pour la station de Batna- Ain Sekhouna où nous disposons des données nécessaires concernant la température. La station est à l'Est du chef lieu de la willaya de Batna dont les coordonnées géographiques sont: « 35° 45' N et 06° 19' E » sur une altitude moyenne de 827 m (NGA)

Les tableaux ci-dessous expliquent ce que nous avons trouvés comme résultats pour une période de 10 ans de 1990 à 2000.

**Tableau 16 : Calibrage des coefficients a et b de la formule de BLANEY-CRIDDLE MODIFIEE pour tous les mois dans la station de Batna -Ain Sekhouna**

							<b>a</b>	<b>b</b>							
							<b>-215.96</b>	<b>2.65</b>							
<b>Janvier</b>															
Année	ETP PENMAN	t°c	Vent	Ins,	Hr	ETP-ANRH	tmin	tmax	P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH	
1990	24.51	6	2.4	102	83	35.27	2.20	10.30	7.05	0.69	9.90	21.01	12.24	115.76	
1991	20.94	4	1.1	183	76	27.72	-1.30	11.00	7.05	0.69	11.83	37.61	278.05	45.95	
1992	23.11	4	1.4	142	75	27.30	-2.10	10.20	7.05	0.69	11.28	32.87	95.29	17.55	
1993	17.84	4	0.5	207	77	28.55	-2.90	11.70	7.05	0.69	13.11	48.58	945.30	114.90	
1994	36.84	7	3.3	159	74	38.20	2.00	11.40	7.05	0.69	11.11	31.39	29.74	1.86	
1995	32.33	5	3.5	175	77	31.07	-0.30	10.80	7.05	0.69	11.28	32.87	0.28	1.60	
1996	50.50	9	4.1	162	69	46.17	3.60	13.50	7.05	0.69	12.73	45.32	26.84	18.72	
1997	43.80	8	3.4	140	69	41.56	2.50	12.60	7.05	0.69	12.18	40.58	10.39	5.02	
1998	28.51	6	2.2	187	75	34.01	-0.50	12.60	7.05	0.69	13.21	49.47	439.53	30.28	
1999	31.44	6	2.9	151	77	36.11	1.40	12.00	7.05	0.69	11.94	38.50	49.88	21.79	
2000	25.37	3	2.7	198	78	23.10	-3.10	10.80	7.05	0.69	12.25	41.17	249.62	5.15	

							<b>a</b>	<b>b</b>							
							<b>-24.13</b>	<b>0.67</b>							
<b>Février</b>															
Année	ETP PENMAN	t°c	Vent	Ins,	Hr	ETP-ANRH	tmin	tmax	P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH	
1990	52.83	9	1.8	257	66	58.83	0.40	18.20	6.95	0.69	18.70	54.27	2.08	36.04	
1991	42.06	6	2.6	139	73	41.45	0.60	11.20	6.95	0.69	11.39	38.51	12.58	0.37	
1992	40.68	6	1.4	208	70	43.49	-0.90	12.90	6.95	0.69	13.66	43.42	7.49	7.92	
1993	34.25	5	2	138	79	37.87	0.10	9.80	6.95	0.69	10.11	35.76	2.26	13.08	
1994	74.01	8	4.4	218	59	51.67	0.80	14.50	6.95	0.69	14.73	45.72	800.51	499.09	
1995	52.77	9	2.2	240	69	57.81	1.40	16.50	6.95	0.69	16.59	49.74	9.17	25.44	
1996	58.57	6	5.3	145	72	44.00	1.80	10.50	6.95	0.69	10.25	36.05	507.16	212.27	
1997	51.02	8	1.8	224	63	53.72	0.40	16.00	6.95	0.69	16.42	49.37	2.74	7.29	
1998	43.67	7	2.1	201	74	48.10	0.30	14.60	6.95	0.69	15.01	46.32	7.00	19.58	
1999	46.12	5	4	171	76	37.36	-0.40	10.50	6.95	0.69	11.01	37.69	71.12	76.83	
2000	60.51	7	3.6	214	64	47.07	-1.00	15.50	6.95	0.69	16.39	49.29	125.96	180.67	

Année	ETP-PENMAN	t°c	Vent	Ins,	Hr	<i>a</i>		<i>b</i>		tmax	P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH
						-64.37	0.93	ETP-ANRH	tmin							
<b>Mars</b>																
1990	76.81	10	2.4	203	68	91.38	3.70	16.70	8.46	0.69	16.01	56.87	397.51	212.22		
1991	100.44	11	4.9	183	65	96.49	4.90	16.60	8.46	0.69	15.49	55.01	2064.01	15.59		
1992	74.79	9	3.9	156	72	79.69	3.20	13.70	8.46	0.69	13.08	46.32	810.62	24.00		
1993	73.33	8	2.8	220	70	73.84	1.00	14.40	8.46	0.69	14.56	51.66	469.64	0.26		
1994	80.47	11	2	244	66	94.30	2.80	18.10	8.46	0.69	17.77	63.21	298.06	191.27		
1995	85.28	9	3.4	239	66	79.69	1.50	14.80	8.46	0.69	14.80	52.53	1072.96	31.30		
1996	85.09	10	3.3	228	69	89.19	3.70	15.40	8.46	0.69	14.66	52.03	1092.99	16.78		
1997	87.74	9	2.4	288	58	79.69	-0.10	16.90	8.46	0.69	17.53	62.34	645.38	64.86		
1998	85.47	9	2.9	252	63	80.42	0.90	16.70	8.46	0.69	16.97	60.35	631.11	25.54		
1999	96.14	9	4.1	245	64	85.53	2.30	16.70	8.46	0.69	16.49	58.61	1408.05	112.41		
2000	114.45	11	4.3	248	56	97.96	2.70	18.90	8.46	0.69	18.63	66.31	2317.02	271.99		

Année	ETP-PENMAN	t°c	Vent	Ins,	Hr	<i>a</i>		<i>b</i>		tmax	P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH
						-266.56	2.69	ETP-ANRH	tmin							
<b>Avril</b>																
1990	108.68	12	3.5	201	65	125.39	5.90	17.90	8.97	0.69	16.49	112.14	11.96	279.29		
1991	88.01	10	3	187	73	107.36	4.70	15.50	8.97	0.69	14.42	89.19	1.40	374.63		
1992	117.44	11	4.4	211	62	114.23	4.20	17.50	8.97	0.69	16.66	114.05	11.47	10.28		
1993	112.14	12	2.5	269	60	119.38	3.30	20.20	8.97	0.69	19.77	148.47	1319.47	52.40		
1994	129.83	11	4.5	269	59	113.37	3.90	17.60	8.97	0.69	16.87	116.34	181.96	270.97		
1995	125.82	11	3.4	282	56	117.67	3.10	18.80	8.97	0.69	18.39	133.17	54.04	66.50		
1996	105.33	12	3.6	206	69	122.82	5.90	17.80	8.97	0.69	16.39	110.99	32.05	305.78		
1997	128.42	12	3.8	258	58	126.25	4.90	19.40	8.97	0.69	18.39	133.17	22.56	4.72		
1998	150.72	14	4.6	269	55	142.56	6.60	21.00	8.97	0.69	19.46	145.03	32.42	66.56		
1999	156.80	14	4.5	300	52	139.99	5.00	22.30	8.97	0.69	21.36	166.06	85.81	282.56		
2000	176.06	15	5.2	273	47	152.00	6.90	23.10	8.97	0.69	21.53	167.97	65.40	578.56		

Année	ETP-PENMAN	t°c	Vent	Ins,	Hr	<i>a</i>		<i>b</i>		tmax	P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH
						-323.58	2.68	ETP-ANRH	tmin							
<b>Mai</b>																
1990	134.54	17	2.6	240	68	174.75	10.90	23.20	9.94	0.69	20.25	140.53	35.86	1616.58		
1991	143.47	13	3.2	297	62	143.07	5.50	21.10	9.94	0.69	19.94	136.73	45.47	0.16		
1992	148.90	16	3.2	278	63	163.88	8.20	23.00	9.94	0.69	20.98	149.39	0.24	224.55		
1993	161.07	18	3	287	59	181.99	9.80	25.60	9.94	0.69	23.12	175.57	210.13	437.37		
1994	230.08	21	4.4	336	41	211.86	11.70	30.30	9.94	0.69	27.32	227.08	9.00	332.02		
1995	199.11	19	3.9	329	48	191.04	9.40	26.90	9.94	0.69	24.60	193.72	28.97	65.09		
1996	154.00	17	2.8	300	63	173.84	9.30	23.70	9.94	0.69	21.32	153.62	0.14	393.84		
1997	217.23	20	4.2	310	41	205.52	11.10	28.20	9.94	0.69	25.36	203.01	202.10	137.08		
1998	150.13	17	3.4	267	65	172.03	9.90	23.20	9.94	0.69	20.60	144.75	28.98	479.53		
1999	225.98	22	4.3	298	40	219.10	12.40	30.70	9.94	0.69	27.50	229.19	10.31	47.33		
2000	189.01	20	4.6	242	56	206.42	12.80	28.50	9.94	0.69	25.08	199.63	112.96	303.42		

						<b>a</b>	<b>b</b>								
						<b>-327.59</b>	<b>2.65</b>								
<b>Juin</b>															
Année	ETP PENMAN	t°C	Vent	Ins,	Hr	ETP-ANRH	tmin	tmax	P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH	
1990	205.39	25	2.8	296	45	240.91	15.90	31.90	9.95	0.69	27.53	220.52	228.93	1261.68	
1991	199.41	22	3.3	322	53	215.94	13.40	30.40	9.95	0.69	26.84	212.16	162.50	273.10	
1992	200.09	20	3.9	313	50	198.99	12.00	27.80	9.95	0.69	24.63	185.39	216.16	1.21	
1993	199.56	24	2.5	313	48	236.45	14.90	33.30	9.95	0.69	29.33	242.28	1824.63	1361.08	
1994	232.90	23	3.7	339	37	228.42	14.30	32.10	9.95	0.69	28.29	229.73	10.08	20.04	
1995	214.07	23	4.4	285	51	223.07	14.40	30.60	9.95	0.69	26.70	210.48	12.89	80.95	
1996	174.69	20	2.9	298	58	199.88	12.10	27.30	9.95	0.69	24.08	178.69	16.00	634.33	
1997	263.86	26	4.6	330	38	252.51	16.80	34.70	9.95	0.69	30.12	251.90	143.18	128.89	
1998	236.88	24	4	328	41	235.56	14.80	32.30	9.95	0.69	28.32	230.14	45.41	1.75	
1999	243.95	26	4.9	231	39	249.83	16.80	34.60	9.95	0.69	30.02	250.64	44.82	34.65	
2000	212.20	23	3.9	306	51	224.86	14.80	31.00	9.95	0.69	26.98	213.83	2.67	160.25	

						<b>a</b>	<b>b</b>								
						<b>-608.52</b>	<b>3.86</b>								
<b>Juillet</b>															
Année	ETP PENMAN	t°C	Vent	Ins,	Hr	ETP-ANRH	tmin	tmax	P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH	
1990	222.72	25	2.9	353	45	239.79	15.80	33.00	10.11	0.69	28.70	224.50	3.17	291.35	
1991	223.02	26	2.7	344	44	249.55	15.50	35.20	10.11	0.69	31.08	267.26	1957.02	704.14	
1992	203.56	23	2.8	334	50	224.69	14.10	31.60	10.11	0.69	27.84	209.01	29.67	446.58	
1993	240.28	26	3.2	335	36	254.88	17.40	35.10	10.11	0.69	30.33	253.62	177.94	213.07	
1994	236.04	26	2.7	370	32	251.33	15.80	36.00	10.11	0.69	31.81	280.27	1956.23	233.77	
1995	252.53	26	3.4	375	39	255.77	16.70	35.00	10.11	0.69	30.46	256.10	12.76	10.49	
1996	241.59	25	3.5	347	40	246.89	16.30	33.30	10.11	0.69	28.84	226.98	213.64	28.05	
1997	255.30	27	3.8	348	40	257.55	17.90	35.30	10.11	0.69	30.36	254.24	1.11	5.06	
1998	271.74	27	3.7	390	32	261.98	17.50	36.10	10.11	0.69	31.33	271.59	0.02	95.21	
1999	263.13	26	4.3	347	39	251.33	16.80	35.30	10.11	0.69	30.74	261.06	4.29	139.25	
2000	278.14	27	4.3	366	36	262.87	17.80	36.30	10.11	0.69	31.43	273.45	21.96	233.07	

						<b>a</b>	<b>b</b>								
						<b>-451.6</b>	<b>3.2</b>								
<b>Aout</b>															
Année	ETP PENMAN	t°C	Vent	Ins,	Hr	ETP-ANRH	tmin	tmax	P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH	
1990	172.48	23	2.4	308	59	201.63	15.30	30.90	9.52	0.69	26.70	175.86	11.40	201.63	
1991	203.58	25	2.6	334	42	219.29	15.00	34.30	9.52	0.69	30.33	227.08	552.52	219.29	
1992	199.11	25	2.3	351	45	219.29	15.20	34.50	9.52	0.69	30.46	229.03	895.64	219.29	
1993	210.72	26	2.8	316	39	227.33	17.00	34.80	9.52	0.69	30.15	224.64	193.92	227.33	
1994	234.56	28	3.1	335	32	241.78	18.50	36.90	9.52	0.69	31.81	248.06	182.32	241.78	
1995	201.17	24	3.1	320	49	212.87	15.70	32.80	9.52	0.69	28.53	201.72	0.29	212.87	
1996	235.03	26	4.1	311	43	229.73	17.70	35.10	9.52	0.69	30.22	225.62	88.56	229.73	
1997	217.42	25	3.4	320	44	222.51	17.40	33.50	9.52	0.69	28.67	203.67	189.26	222.51	
1998	220.65	25	3.6	314	44	223.31	17.20	34.10	9.52	0.69	29.36	213.42	52.26	223.31	
1999	270.47	29	4.7	287	35	253.83	20.50	38.00	9.52	0.69	32.26	254.40	258.33	253.83	
2000	241.98	26	4	336	39	228.93	16.60	35.10	9.52	0.69	30.60	230.98	120.92	228.93	

Année	Sept ETP PENMAN	t°C	Vent	Ins,	Hr	a		b		P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH
						-410.76		3.41							
						ETP-ANRH	tmin	tmax							
1990	153.45	24	3	235	53	169.88	16.20	31.50	8.45	0.69	27.01	180.95	756.18	270.10	
1991	145.11	22	3	248	56	157.61	14.40	29.70	8.45	0.69	25.77	164.50	375.85	156.21	
1992	146.92	22	2.8	262	52	156.97	13.40	30.30	8.45	0.69	26.74	177.29	922.16	100.84	
1993	161.25	22	3.4	259	46	155.03	13.70	29.40	8.45	0.69	25.70	163.59	5.47	38.67	
1994	158.36	23	3.3	254	52	163.42	16.40	29.40	8.45	0.69	24.77	151.25	50.53	25.63	
1995	141.67	21	3.5	249	60	147.93	14.00	27.30	8.45	0.69	23.43	133.44	67.70	39.18	
1996	139.49	19	3.2	261	54	138.88	11.30	27.00	8.45	0.69	24.05	141.66	4.70	0.37	
1997	121.78	20	2.5	233	65	147.28	14.10	27.10	8.45	0.69	23.18	130.24	71.64	650.47	
1998	165.03	23	3.5	270	50	161.49	15.60	30.30	8.45	0.69	25.98	167.24	4.88	12.56	
1999	178.60	23	4.3	271	52	165.36	16.20	30.90	8.45	0.69	26.39	172.72	34.58	175.35	
2000	163.87	22	4	250	51	155.67	14.40	30.10	8.45	0.69	26.19	169.98	37.31	67.24	

Année	Octobre ETP PENMAN	t°C	Vent	Ins,	Hr	a		b		P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH
						-384.33		3.46							
						ETP-ANRH	tmin	tmax							
1990	102.63	18	2.2	334	58	104.38	10.10	25.40	7.95	0.69	22.80	127.72	629.67	3.06	
1991	81.10	16	2.8	177	68	94.99	10.70	21.10	7.95	0.69	18.15	68.80	151.22	192.84	
1992	113.60	17	3.3	250	51	101.77	9.90	24.20	7.95	0.69	21.63	112.88	0.51	139.90	
1993	124.19	18	3.8	217	50	106.99	11.40	24.70	7.95	0.69	21.63	112.88	127.91	296.03	
1994	77.17	16	2	214	70	97.60	10.40	22.20	7.95	0.69	19.39	84.51	53.99	417.34	
1995	79.44	16	1.9	257	69	94.47	9.00	22.40	7.95	0.69	20.08	93.24	190.44	225.67	
1996	97.96	14	3.4	261	57	84.03	6.00	21.90	7.95	0.69	20.60	99.79	3.35	194.00	
1997	77.80	16	2.2	233	72	94.99	10.10	22.00	7.95	0.69	19.29	83.21	29.19	295.30	
1998	77.80	14	2	242	64	86.12	7.60	21.70	7.95	0.69	19.84	90.19	153.52	69.22	
1999	127.87	19	4.3	240	56	110.12	12.30	26.10	7.95	0.69	22.77	127.28	0.34	315.18	
2000	105.81	15	4.4	222	62	92.38	9.00	22.00	7.95	0.69	19.67	88.01	316.89	180.34	

Année	Nov ETP PENMAN	t°C	Vent	Ins,	Hr	a		b		P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH
						-221.22		2.56							
						ETP-ANRH	tmin	tmax							
1990	47.79	11	3.2	167	73	51.78	6.60	15.90	7.00	0.69	14.18	41.63	37.91	15.94	
1991	41.15	10	2.2	217	70	45.64	3.40	16.20	7.00	0.69	15.59	53.30	147.58	20.18	
1992	45.27	12	2.4	201	71	54.08	5.00	18.40	7.00	0.69	17.32	67.54	495.85	77.64	
1993	41.59	10	2.4	164	72	47.94	4.30	15.80	7.00	0.69	14.87	47.32	32.86	40.38	
1994	36.50	11	1.1	241	70	51.78	3.60	18.60	7.00	0.69	18.01	73.23	1349.00	233.42	
1995	58.12	11	3.1	196	60	49.48	3.70	17.60	7.00	0.69	16.94	64.40	39.54	74.61	
1996	79.74	12	4.3	206	53	53.31	4.70	18.40	7.00	0.69	17.42	68.39	128.82	698.40	
1997	52.41	11	3.9	173	73	51.78	6.30	16.30	7.00	0.69	14.70	45.90	42.38	0.40	
1998	50.44	10	3.1	171	67	47.18	4.10	15.90	7.00	0.69	15.04	48.75	2.89	10.67	
1999	59.90	10	4.5	181	68	47.18	4.20	15.50	7.00	0.69	14.59	45.05	220.77	161.93	
2000	70.66	11	4.2	195	59	51.78	4.10	18.50	7.00	0.69	17.73	70.95	0.09	356.44	

Année	DÉc	ETP PENMAN	t°C	Vent	Ins,	Hr	a		b		ETP-ANRH	tmin	tmax	P%	k	teff	ETP-BCM	eqBCM	eqANRH
							-182.91	2.23											
1990	25.44	5	3.2	142	79	24.30	0.30	9.40	6.87	0.69	9.63	9.75	246.15	1.30					
1991	16.73	4	1.1	164	78	23.95	-1.00	10.10	6.87	0.69	10.80	18.03	1.68	52.09					
1992	27.63	7	2.6	162	76	32.74	1.20	12.50	6.87	0.69	12.52	30.20	6.60	26.12					
1993	24.23	7	2.2	184	77	32.04	0.80	12.20	6.87	0.69	12.35	28.99	22.63	61.03					
1994	20.73	7	1.3	198	74	31.34	0.00	13.00	6.87	0.69	13.46	36.78	257.44	112.46					
1995	43.41	9	4.2	163	73	40.84	4.20	14.10	6.87	0.69	13.14	34.59	77.82	6.61					
1996	70.71	10	5.3	177	59	41.89	3.50	15.00	6.87	0.69	14.32	42.86	775.53	830.60					
1997	32.55	7	3	184	73	34.50	2.00	13.40	6.87	0.69	13.18	34.83	5.20	3.82					
1998	22.50	5	2.4	178	78	25.71	-0.40	11.30	6.87	0.69	11.83	25.33	8.04	10.30					
1999	31.26	7	4	152	79	31.34	1.80	11.90	6.87	0.69	11.70	24.36	47.61	0.01					
2000	47.49	8	4.5	194	68	35.56	1.40	15.10	6.87	0.69	15.15	48.71	1.49	142.26					

**Tableau 17: Tableau récapitulatif des coefficients a et b de la formule de B.C.M pour la station de Batna- Ain Sekhouna**

Station	longitude	latitude	Janvier		Fév		Mars		AVRIL		Mai		Juin	
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
			-215.96	2.65	-24.13	0.67	-64.37	0.93	-266.56	2.69	-323.58	2.68	-327.59	2.65
BATNA	35° 45' N	06° 19' E	Juillet		Aout		Sept		Octobre		Novembre		Déc	
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
			-608.52	3.86	-451.6	3.2	-410.76	3.41	-384.33	3.46	-221.22	2.56	-1182.91	2.23

#### Remarque :

On veut évoquer que l'utilisation du terme de la température effective peut améliorer les résultats du calibrage, mais à cause de l'absence des données des autres stations on ne peut conclure. Cependant il faut rapidement signaler que l'introduction de la température effective n'a apporté, pour le cas pris comme exemple, aucune amélioration sensible à généraliser.

#### III.4. Formule de HARGREAVES

L'une des formules qui valorise l'utilisation de l'information thermométrique (température) au sens propre du mot, est celle de HARGREAVES, reformulée en 1985 par Hargreaves et Samani comme suit:

$$ETP=0.408(0.0023) Ra (T+17.8) (T_{\max}-T_{\min})^{0.5} \quad (3.2)$$

Avec:

- ✓ Ra: Représente l'équivalence de la radiation extraterrestre de l'eau (mm/j) d'après (Allen et al.1998).
- ✓ T : température moyenne en (°C).

- ✓  $T_{\max}$  et  $T_{\min}$  : les températures maximales et minimales enregistrées durant le mois considéré.
- ✓  $(T_{\max} - T_{\min})$  : Statistiquement représente l'étendue de la série.
- ✓ 0.0023: le coefficient empirique original proposé par Hargreaves et Samani (1985).
- ✓  $0.408 = 1/\lambda$  facteur de transformation de  $m^2/j$  vers  $mm/j$ .

Dans cette section de l'étude, nous essayons de remplacer le coefficient (0.0023) proposé par Hargreaves et Samani en 1985 par un autre coefficient valable pour la région Nord de l'Algérie. Cette partie de calcul nous renseignera A c'est que le calibrage de cette formule par rapport à l'équation de PENMAN-MONTEITH de référence nous a donne une nouvelle?

La station à prendre comme exemple et qui dispose de toutes les données nécessaires pour l'application de la formule de HARGREAVES est la station de Batna -Ain Sekhoua dont les caractéristiques géographiques sont déjà mentionnées.

#### III.4.1. Démarches et principe de calcul

Deux opérations seront mises en oeuvre, dans la première on fait le calibrage avec les termes initiaux de la formule de Hargreaves ; tandis que dans la seconde on introduit la notion de la température effective dans le premier membre de la formule de Hargreaves (remplacer T par  $T_{\text{eff}}$ ).

##### III.4.1.a. Première opération

L'enchaînement se fait à travers les étapes suivantes :

1. Calcul de l'évapotranspiration par la formule de PENMAN- MONTEITH de référence.
2. Calcul de l'évapotranspiration par la formule de Hargreaves en utilisant les termes initiaux de l'équation d'origine.
3. Calcul l'erreur quadratique entre les deux formules.
4. Déduire de l'erreur moyenne interannuelle de chaque mois.

Pour plus d'illustrations on prend l'exemple suivant pour le mois de janvier au niveau de la station citée, les résultats trouvés sont reportés dans le tableau suivant :

**Tableau 18: Exemple de calcul pour le mois de janvier .Cas de la station Batna-Ain Sekhoun.**

JAN		31				$k_{cal}$	0.00176				
						$K_i$	0.0023				
ETPpenman	t°C	Vent	Ins mens,	Hr	tmin	tmax	Ra	ETPHarg	EQ		
1990	24.51	6	2.4	102	83	2.2	10.3	17.5	26.33	3.3080	
1991	20.94	4.2	1.1	183	76	-1.3	11	17.5	29.99	81.9235	
1992	23.11	4.1	1.4	142	75	-2.1	10.2	17.5	29.85	45.4997	
1993	17.84	4.4	0.5	207	77	-2.9	11.7	17.5	32.97	229.0131	
1994	36.84	6.7	3.3	159	74	2	11.4	17.5	29.19	58.4426	
1995	32.33	5	3.5	175	77	-0.3	10.8	17.5	29.52	7.9018	
1996	50.50	8.6	4.1	162	69	3.6	13.5	17.5	32.28	331.8338	
1997	43.80	7.5	3.4	140	69	2.5	12.6	17.5	31.25	157.4975	
1998	28.51	5.7	2.2	187	75	-0.5	12.6	17.5	33.06	20.7226	
1999	31.44	6.2	2.9	151	77	1.4	12	17.5	30.37	1.1423	
2000	25.37	3.1	2.7	198	78	-3.1	10.8	17.5	30.28	24.1565	
									<b>MOYENNE</b>	<b>87.40</b>	

Les résultats de calcul des nouveaux coefficients  $K_i$  pour tous les mois après calibrage sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 19 : Tableau récapitulatif des coefficients obtenus. Cas de la station Batna-Ain Sekhouna**

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Octo	Nov	Déc
<b>K.Harg</b>	0.0018	0.0021	0.0024	0.0026	0.0025	0.0024	0.0026	0.0025	0.0026	0.0025	0.0023	0.0020

#### III.4.1.b. Deuxième opération

En remplaçant la température moyenne par le terme température effective ( $T_{eff}$ ) au sens de Camargo et al. (1999) ; l'exemple de calcul pour le mois de Janvier donnera les résultats suivants:

**Tableau 20 : Exemple de calcul sur le mois de janvier. Station Batna-'Ain Sekhouna. Introduction de Teff.**

JAN		31				$k_{cal}$	0.00176				
						$K_i$	0.0023				
ETPpenman	t°C	Vent	Ins mens,	Hr	tmin	tmax	Ra	ETPHarg	EQ		
1990	24.51	6	2.4	102	83	2.2	10.3	17.5	23.64	0.7540	
1991	20.94	4.2	1.1	183	76	-1.3	11	17.5	30.90	99.2728	
1992	23.11	4.1	1.4	142	75	-2.1	10.2	17.5	30.39	53.1194	
1993	17.84	4.4	0.5	207	77	-2.9	11.7	17.5	34.94	292.5631	
1994	36.84	6.7	3.3	159	74	2	11.4	17.5	26.43	108.2945	
1995	32.33	5	3.5	175	77	-0.3	10.8	17.5	28.87	11.9759	
1996	50.50	8.6	4.1	162	69	3.6	13.5	17.5	28.46	485.8099	
1997	43.80	7.5	3.4	140	69	2.5	12.6	17.5	28.29	240.6422	
1998	28.51	5.7	2.2	187	75	-0.5	12.6	17.5	33.19	21.9834	
1999	31.44	6.2	2.9	151	77	1.4	12	17.5	28.77	7.0996	
2000	25.37	3.1	2.7	198	78	-3.1	10.8	17.5	33.25	62.1264	
									<b>MOYENNE</b>	<b>125.79</b>	

Les nouveaux coefficients après l'introduction de la température effective sont reportés dans le tableau suivant :

**Tableau 21 : Tableau récapitulatif des nouveaux coefficients obtenus. Cas de la station Batna-Ain Sekhoun**

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
<b>KHarg</b>	0.0015	0.0017	0.0021	0.0024	0.0024	0.0026	0.0026	0.0026	0.0027	0.0025	0.0021	0.0017

### III.5. Formule de THORNTHWAITE.

La formule de THORNTHWAITE est l'une des formules qui est basée sur l'utilisation de l'information thermométrique pour l'évaluation de la valeur de l'évapotranspiration ETP, sa formulation a été déjà introduite dans le chapitre I numérotés (1.4) et (1.8).

L'expérience montre que l'utilisation de cette dernière formule sous-estime parfois la valeur réelle de l'évapotranspiration potentielle ; par conséquent il faut réduire cet effet nuisible par la réduction de l'erreur possible lors de l'application de cette formule.

A ce moment, il faut apporter des corrections par le calibrage de cette dernière par rapport à la formule de PENMAN-MONTEITH de référence en cas de l'absence des valeurs réelles mesurés par les appareils « les cases lysimétrique ».

#### III.5.1. Démarches et calculs

Le principe de calcul est basé sur les mêmes étapes de calibrages citées antérieurement. Les démarches à suivre prennent l'enchaînement suivant :

1. Calcul de l'ET de référence en se basant sur la formule de PENMAN-MONTEITH
2. Calcul de la valeur de l'ET par la formule de RHORNTHAITE avec ( $K=1$ ).
3. Calcul de l'erreur moyenne interannuelle quadratique.
4. Déduire les coefficients de correction (calibrage) des douze mois de l'année pour les 16 stations réparties sur le nord du territoire Algérien.

#### III.5.2. Exemple de calcul:

On présentera l'exemple suivant de la station Dar El-Beida (Alger) dont les caractéristiques géographiques sont reportées dans le tableau suivant :

**Tableau 22: Caractéristiques géographiques de la station Dar El-Beida (Alger).**

<b>Station: DAR EL BEIDA</b>				
Lat	long	X (km)	Y (km)	Altitude (m)
36.72	3.22	546.44	379.99	24

Pour l'application numérique on prend comme un exemple d'illustration le mois de janvier sur une période de 1975 à 1995, après le calcul les résultats obtenus son reportés dans les tableaux suivants :

Tableau 23: Calcul de l'ETP mensuelle par THORNTHWAITE. Station Dar el Beidha

1975	<b>Mois</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
	<b>t</b>	11.17	11.14	11.98	14.17	16.16	19.99	25.21	25.74	23.15	18.11	14.09	12.16
	<b>i</b>	3.38	3.36	3.76	4.84	5.91	8.15	11.58	11.95	10.18	7.02	4.80	3.84
	<b>I</b>	78.76	78.76	78.76	78.76	78.76	78.76	78.76	78.76	78.76	78.76	78.76	78.76
	<b>a</b>	2.23	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99
	<b>ETP</b>	34.8	31.9	36.9	51.5	67.0	102.2	162.3	169.1	136.9	84.0	50.9	38.0
1976	<b>Mois</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
	<b>t</b>	9.32	11.32	11.70	14.16	17.43	21.14	24.05	25.29	22.96	17.89	12.66	13.17
	<b>i</b>	2.57	3.45	3.62	4.83	6.62	8.87	10.79	11.63	10.05	6.89	4.08	4.33
	<b>I</b>	77.73	77.73	77.73	77.73	77.73	77.73	77.73	77.73	77.73	77.73	77.73	77.73
	<b>a</b>	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
	<b>ETP</b>	23.8	36.5	39.2	59.7	94.2	143.9	191.1	213.3	172.5	99.8	46.7	50.9
1977	<b>Mois</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
	<b>t</b>	12.12	12.85	12.81	14.38	16.58	20.05	23.29	22.97	21.24	20.95	15.51	13.60
	<b>i</b>	3.82	4.18	4.16	4.95	6.14	8.19	10.27	10.06	8.93	8.75	5.55	4.55
	<b>I</b>	79.54	79.54	79.54	79.54	79.54	79.54	79.54	79.54	79.54	79.54	79.54	79.54
	<b>a</b>	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
	<b>ETP</b>	41.3	47.1	46.8	60.6	83.5	128.2	179.5	174.1	145.9	141.4	71.9	53.5
1978	<b>Mois</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
	<b>t</b>	10.02	13.89	12.75	13.79	16.73	20.26	23.55	24.64	21.96	16.87	13.10	14.37
	<b>i</b>	2.87	4.70	4.13	4.65	6.23	8.32	10.45	11.18	9.39	6.30	4.30	4.94
	<b>I</b>	77.45	77.45	77.45	77.45	77.45	77.45	77.45	77.45	77.45	77.45	77.45	77.45
	<b>a</b>	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19
	<b>ETP</b>	28.1	57.4	47.6	56.5	86.3	131.1	182.2	201.1	156.3	87.8	50.5	61.8
1979	<b>Mois</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
	<b>t</b>	13.46	12.59	12.66	13.18	17.14	22.24	24.40	25.16	21.67	19.50	12.75	11.52
	<b>i</b>	4.48	4.05	4.08	4.34	6.46	9.58	11.02	11.55	9.21	7.85	4.13	3.54
	<b>I</b>	80.29	80.29	80.29	80.29	80.29	80.29	80.29	80.29	80.29	80.29	80.29	80.29
	<b>a</b>	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27
	<b>ETP</b>	51.8	44.5	45.1	49.4	89.8	162.3	200.3	214.8	153.0	120.4	45.8	36.4
1980	<b>Mois</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
	<b>t</b>	11.05	12.29	13.33	12.89	16.85	21.13	22.81	25.47	23.62	18.24	15.63	10.18
	<b>i</b>	3.32	3.90	4.41	4.19	6.29	8.87	9.96	11.76	10.49	7.10	5.62	2.93
	<b>I</b>	78.84	78.84	78.84	78.84	78.84	78.84	78.84	78.84	78.84	78.84	78.84	78.84
	<b>a</b>	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23
	<b>ETP</b>	33.9	43.0	51.6	47.9	87.0	144.1	170.9	218.5	184.6	103.8	73.6	28.3
1981	<b>Mois</b>	<b>J</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
	<b>t</b>	9.57	10.76	14.58	15.24	17.66	21.11	22.83	24.18	23.19	20.80	14.83	14.42
	<b>i</b>	2.67	3.19	5.05	5.40	6.76	8.85	9.97	10.87	10.20	8.66	5.19	4.97
	<b>I</b>	81.78	81.78	81.78	81.78	81.78	81.78	81.78	81.78	81.78	81.78	81.78	81.78
	<b>a</b>	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
	<b>ETP</b>	23.0	30.3	61.2	67.8	95.5	144.3	173.2	197.8	179.5	139.6	63.6	59.6

1982	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	12.38	11.40	12.76	14.61	17.74	23.20	27.21	25.30	23.30	18.20	14.94	10.97
	i	3.95	3.48	4.13	5.07	6.80	10.21	13.00	11.64	10.28	7.07	5.24	3.29
	I	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17
	a	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
	ETP	40.4	33.1	43.3	60.0	95.5	181.7	266.2	223.6	183.4	101.5	63.3	30.2

1983	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	9.64	10.03	12.94	15.59	17.69	22.02	26.41	24.87	24.00	20.24	17.62	12.20
	i	2.70	2.87	4.22	5.60	6.77	9.43	12.43	11.34	10.75	8.31	6.73	3.86
	I	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01
	a	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42
	ETP	21.7	23.9	44.3	69.6	94.5	160.6	249.5	215.7	197.8	130.9	93.6	38.4

1984	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	11.18	10.62	11.23	15.49	16.18	20.38	25.37	23.47	22.64	17.75	16.28	11.76
	i	3.38	3.13	3.40	5.54	5.92	8.39	11.69	10.39	9.84	6.81	5.97	3.65
	I	78.12	78.12	78.12	78.12	78.12	78.12	78.12	78.12	78.12	78.12	78.12	78.12
	a	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21
	ETP	35.3	31.5	35.6	72.5	79.8	132.8	215.5	181.4	167.6	98.0	80.9	39.5

1989	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	11.56	10.68	13.80	15.00	18.90	22.30	26.40	27.60	23.60	19.80	15.36	15.60
	i	3.56	3.16	4.65	5.28	7.49	9.62	12.42	13.28	10.48	8.03	5.47	5.60
	I	89.03	89.03	89.03	89.03	89.03	89.03	89.03	89.03	89.03	89.03	89.03	89.03
	a	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56
	ETP	31.2	25.5	49.1	60.7	109.6	167.3	257.6	288.6	193.4	123.5	64.5	67.1

1990	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	10.10	10.90	14.80	15.00	15.60	23.50	25.00	25.60	26.30	20.80	14.90	10.50
	i	2.90	3.25	5.17	5.28	5.60	10.41	11.44	11.85	12.35	8.66	5.22	3.07
	I	85.20	85.20	85.20	85.20	85.20	85.20	85.20	85.20	85.20	85.20	85.20	85.20
	a	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43
	ETP	24.2	29.1	61.2	63.2	69.5	188.2	218.7	231.7	247.4	139.9	62.2	26.6

1991	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	10.00	10.30	14.00	13.40	18.30	21.70	25.40	26.80	24.90	19.10	13.70	10.10
	i	2.86	2.99	4.75	4.45	7.13	9.23	11.71	12.70	11.37	7.61	4.60	2.90
	I	82.29	82.29	82.29	82.29	82.29	82.29	82.29	82.29	82.29	82.29	82.29	82.29
	a	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34
	ETP	25.2	27.0	55.4	50.0	103.5	154.1	222.7	252.4	212.6	114.4	52.6	25.8

1992	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	9.40	10.10	12.30	14.30	19.00	20.50	24.10	25.70	23.60	18.50	14.60	12.70
	i	2.60	2.90	3.91	4.91	7.55	8.47	10.82	11.92	10.48	7.25	5.07	4.10
	I	79.97	79.97	79.97	79.97	79.97	79.97	79.97	79.97	79.97	79.97	79.97	79.97
	a	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
	ETP	23.1	27.1	42.4	59.6	113.5	134.8	194.4	224.9	185.4	106.8	62.5	45.6

1993	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	9.00	10.20	12.20	11.90	20.00	22.20	24.40	25.80	22.60	19.20	14.50	11.70
	i	2.43	2.94	3.86	3.72	8.16	9.55	11.02	11.99	9.81	7.67	5.01	3.62
	I	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80	79.80
	a	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
	ETP	21.0	27.9	41.7	39.5	127.5	161.3	199.7	226.5	168.0	116.2	61.7	38.0

1994	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	11.00	12.00	13.80	14.50	19.50	22.30	26.70	28.50	23.70	20.20	16.10	12.20
	i	3.30	3.76	4.65	5.01	7.85	9.62	12.63	13.94	10.55	8.28	5.87	3.86
	I	89.33	89.33	89.33	89.33	89.33	89.33	89.33	89.33	89.33	89.33	89.33	89.33
	a	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57
	ETP	27.3	34.1	48.9	55.5	118.7	167.5	265.9	314.3	195.8	129.9	72.6	35.6

1995	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	t	10.80	12.70	12.70	13.90	15.40	22.00	25.10	25.80	22.00	20.20	16.60	14.50
	i	3.21	4.10	4.10	4.70	5.49	9.42	11.50	11.99	9.42	8.28	6.15	5.01
	I	83.39	83.39	83.39	83.39	83.39	83.39	83.39	83.39	83.39	83.39	83.39	83.39
	a	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37
	ETP	29.5	43.4	43.4	53.7	68.5	159.6	218.2	232.9	159.6	130.4	81.9	59.4

Tableau 24: Exemple de calcul du coefficient K de correction pour le mois de Janvier.

Cas de la station Dar El-Beida (Alger).

ANNEE	JAN		t°C	K	1.20	ETP <sub>thorntcal</sub>
	31	ETP <sub>penman</sub>				
	ET.THOR					
1975	43.95		11.17	34.83	4.3619	41.87
1976	33.22		9.32	23.81	21.1077	28.62
1977	47.75		12.12	41.29	3.5434	49.63
1979	57.07		13.46	51.82	27.2039	62.29
1980	42.03		11.05	33.93	1.5735	40.78
1982	52.23		12.38	40.36	13.7900	48.51
1983	29.16		9.64	21.69	9.5232	26.07
1984	43.49		11.18	35.31	1.1144	42.44
1991	31.24		10.00	25.23	0.8518	30.32
1992	28.43		9.40	23.07	0.4931	27.73
1993	22.96		9.00	21.00	5.1908	25.24
1994	32.37		11.00	27.30	0.1921	32.81
1995	31.76		10.80	29.54	13.9815	35.50
MOY	38.13				Moyenne	37.83

De la même façon, on peut estimer et calibrer la formule de THORNTHWAITE sur le Nord Algérien, en répétant cette opération pour les douze mois de chaque station sur une période ou une série suffisamment longue (plus de 10 ans).

Les coefficients ainsi déduits sont consignés dans le tableau suivant:

**Tableau25: Tableau récapitulatif des coefficients de correction K des stations  
considérées au Nord Algérien**

N. STA	X.lamb(Km)	X.lambKm)	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
ANNABA	954.843	405.119	1.37	1.56	1.95	1.88	1.43	1.13	0.94	0.83	0.71	0.72	0.79	0.95
BBA	677.3	309.256	2.6	2.57	2.75	2.49	1.91	1.31	1.18	0.96	0.97	1.1	1.29	1.29
BATNA	830.281	274.83	2.82	3.05	3.35	2.51	1.95	1.38	1.13	1.07	0.99	1.23	1.54	2.34
TELEMCEN	108.219	157.068	1.37	1.56	1.92	1.91	1.56	1.24	0.92	0.83	0.86	0.87	1.01	0.99
SKIKDA	864.734	389.128	1.05	1.37	1.68	1.64	1.46	1.07	0.95	0.79	0.74	0.68	0.79	1.01
SAIDA	281.583	169.726	2.17	2.26	2.53	2.26	1.72	1.18	0.95	0.91	0.84	1	1.09	1.67
TEBASSA	967.789	216.735	2.17	2.21	2.62	2	1.74	1.15	1.11	0.95	0.86	0.93	1.24	1.69
SANIA	197.91	265.035	1.34	1.65	2.1	2.17	1.72	1.22	1.05	0.9	0.86	1	0.93	1.05
GUALMA	927.125	362.281	1.45	1.94	1.72	1.86	1.27	1.02	0.82	0.66	0.64	0.64	0.7	0.94
BENISAF	128.201	230.286	1.14	1.65	1.65	1.72	1.49	1.04	0.87	0.69	0.67	0.77	0.78	0.91
CHELEF	377.367	324.969	2	1.69	2.03	1.82	1.24	0.9	0.71	0.67	0.65	0.75	0.83	1.08
CONSTANTINE	851.858	338.569	1.64	1.71	2.32	2.05	1.57	1.21	1.07	0.89	0.82	0.87	1.05	1.2
DAR ELBEIDA	546.37	375.998	1.2	1.63	1.7	1.9	1.5	1.17	0.93	0.82	0.79	0.77	0.8	1.07
MELIANA	458.303	333.452	1.56	1.65	2.21	1.98	1.66	1.26	1.02	0.92	0.85	0.91	0.89	1.07
M'SILA	662.927	263.795	4.15	2.88	3.05	2.21	1.26	0.86	0.73	0.75	0.73	1.04	1.49	4.18

## Conclusion

Dans ce chapitre ; on a présenté d'une manière globale le calibrage nécessaire pour chaque formule pour optimiser l'erreur en comparant toujours les valeurs de l'ETP issues de chaque relation avec celles issues de la formule de référence PENMAN-MONTEITH.

Il est très clair que le calibrage soit une opération indispensable et très importante pour corriger d'une manière correcte et mathématique les valeurs calculées par les formules empiriques en vue de leur adaptation aux endroits d'étude.

Toutes les relations utilisées se basent essentiellement sur l'information thermométrique, l'incidence des reformulations est très bénéfique dans le sens de l'exactitude désirée et les résultats acquis font l'objet d'un travail de cartographie dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE IV

### RESULTATS ET DISCUSSION

#### Introduction

Après un calcul adéquat de l'ETP par plusieurs formules empiriques qui ont été utilisées au cours de l'élaboration de ce mémoire, nous avons constaté que les résultats obtenus sont mal estimés (sous-estimé ou surestimé) par rapport à la formules de PENMAN-MONTEITH de référence.

Cette constatation, nous mène à apporter des corrections pour juger comme acceptables et valables toutes les applications des formulations empiriques et ce dans le but de leur utilisation dans le domaine de la gestion des ressources hydriques et leurs mobilisation sans aucun risque d'endommager les composantes du bilan hydrique car l'évapotranspiration représente un paramètre primordial dans ce dernier.

L'analyse de ces résultats après un calibrage spatiale et temporel nous mène à penser à la cartographie pour balayer tous le domaine géographique et produire un moyen d'interpolation efficace pour les lieux dépourvus des stations de mesure.

Cette tentative de cartographie fera l'objet de ce chapitre.

#### IV. 1. Visualisation des résultats

Afin de faciliter l'interprétation des résultats obtenus, l'importance de les visualiser reste une étape très adéquate pour éclairer au mieux ce que est nous avons proposé au cours des chapitres précédents.

Les tableaux, les graphes et les cartes sont les trois outils universels pour l'explication courante de tous résultat, de sorte que ; en chaque étape de calibrage pour n'importe quelle formule empirique les coefficients de correction trouvés représentent la recette de cette étape d'étude, donc la nécessité de mettre en tableau ou les visualiser dans une carte pour permettre leur explication flagrante reste la seule méthode pédagogique et incontournable de présentation des résultats ainsi trouvés.

Chaque paramètre calibré va être cartographié sur une carte qui représente sa répartition temporelle et spatiale sur le nord du territoire Algérien.

#### IV.1.1. Visualisation des nouveaux coefficients a et b issus de la relation initiale de BLANEY CRIDDLE

Toujours ; dans le cadre de la valorisation de l'information thermométrique et sa facilité d'acquisition, nous avons fait des corrections valables pour la région nord de l'Algérie. Pour cette formule et par la modification des coefficients empiriques **a** et **b** pour la zone d'étude en se

basant sur l'utilisation de l'outil informatique pour l'actualisation des formules empiriques d'une part et de minimiser le temps et réduire l'erreur possible lors de l'application de cette formule d'une autre part sans faire recours à les comparer avec les valeurs de l'ET mesurées, notamment en cas de l'absence des instruments de mesure.

Les résultats obtenus après le calcul, nous donnent (12×a) et (12×b) valeurs pour les 17 stations choisies et réparties sur le nord de l'Algérie.

Les valeurs des nouveaux coefficients a et b après le calibrage sont déposées dans le tableau 12 déjà donné dans le chapitre III :

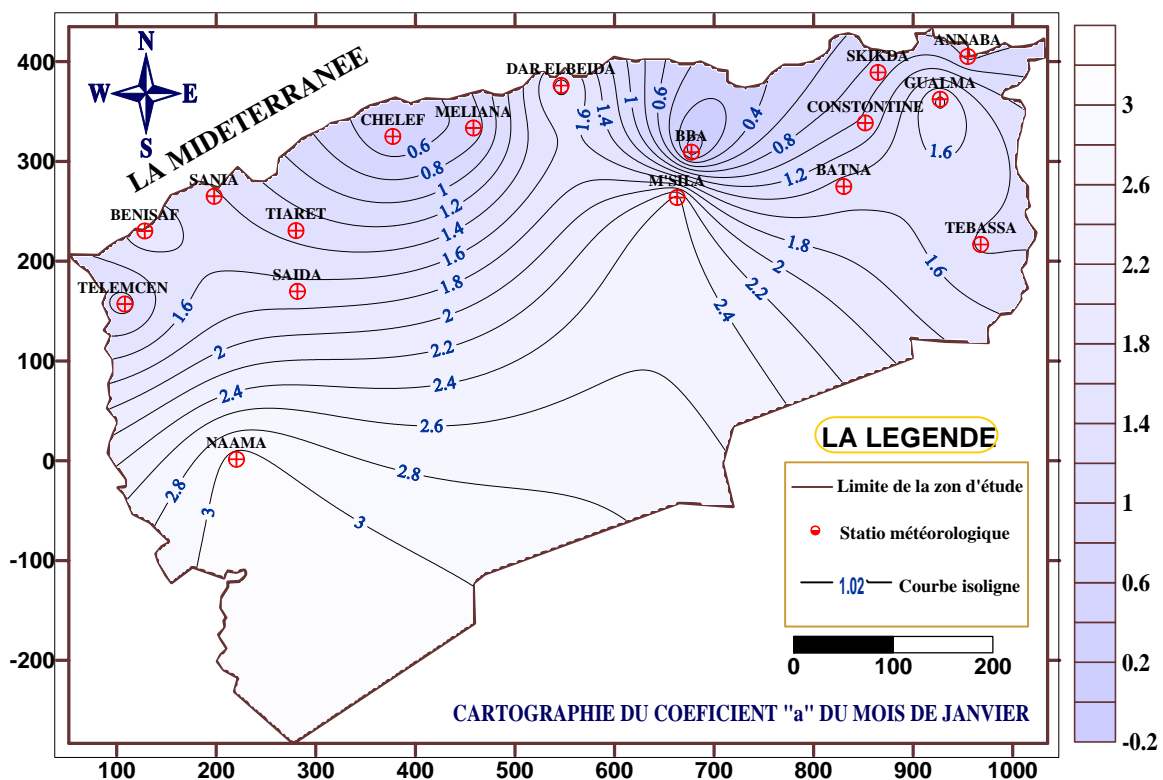
N. STA	X.lamb (Km)	X.lamb (Km)	Janvier		Fév		Mars		AVRIL		Mai		Juin	
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
ANNABA	954.843	405.119	0.74	-24.56	1.00	-36.90	1.17	-53.83	1.24	-50.21	1.93	-169.98	0.52	82.45
BBA	677.300	309.256	-0.13	39.08	1.23	-50.02	0.66	15.03	0.91	7.30	1.50	-71.17	1.68	-97.87
BATNA	830.281	274.830	1.49	-72.36	1.28	-46.11	0.80	6.80	2.05	-123.79	3.26	-336.89	2.49	-240.17
TELEMCEN	108.219	157.068	1.11	-58.99	1.37	-70.21	0.21	62.68	2.29	-185.59	1.88	-153.84	1.23	-46.22
SKIKDA	864.734	389.128	0.89	-40.43	1.49	-88.53	-0.51	145.82	0.86	-9.85	2.16	-212.45	0.39	94.73
SAIDA	281.583	169.726	1.67	-97.05	0.77	-10.59	1.06	-28.18	1.30	-45.28	1.83	-129.74	1.56	-89.84
TEBASSA	967.789	216.735	1.37	-68.89	2.02	-112.18	1.30	-53.96	1.87	-116.35	2.71	-271.96	2.29	-225.50
SANIA	197.910	265.035	1.43	-88.93	1.72	-101.31	0.25	71.66	2.37	-187.09	1.73	-114.21	1.72	-115.56
GUALMA	927.125	362.281	1.86	-129.62	1.42	-82.46	0.38	27.35	1.80	-134.12	1.64	-133.51	1.29	-67.86
BENISAF	128.201	230.286	1.75	-120.50	2.41	-180.01	-0.48	157.34	-0.76	228.56	0.10	131.89	1.07	-26.77
CHELEF	377.367	324.969	0.43	-7.90	1.01	-43.88	2.10	-166.08	1.78	-119.68	1.61	-102.08	2.44	-265.54
CONSTONTINE	851.858	338.569	1.04	-52.04	1.11	-46.34	0.72	-2.30	1.44	-77.77	1.31	-68.79	1.44	-83.48
DAR ELBEIDA	546.370	375.998	1.88	-132.54	1.66	-100.66	0.21	59.37	0.90	-9.99	1.38	-82.25	1.16	-35.14
MELIANA	458.303	333.452	0.67	-22.43	1.60	-89.84	1.73	-110.02	1.27	-48.92	1.97	-157.70	1.94	-156.25
M'SILA	662.927	263.795	2.47	-161.38	1.25	-43.33	0.15	95.64	2.57	-192.40	0.67	101.33	1.24	9.31
NAAMA	220.324	1.466	3.09	-189.95	2.61	-150.92	3.74	-302.78	-1.97	376.20	2.11	-162.25	1.93	-137.33
TIARET	280.110	230.638	1.33	-61.07	1.96	-99.87	1.44	-60.09	-2.61	430.26	2.15	-160.65	2.19	-181.25
N. STA	X.lamb (Km)	X.lamb (Km)	Juillet		Aout		Septembre		Octobre		Novembre		Décembre	
			a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
ANNABA	954.843	405.119	0.84	43.55	1.80	-136.79	1.32	-73.00	1.36	-92.81	0.46	6.03	0.33	10.31
BBA	677.300	309.256	0.40	160.89	1.00	21.95	1.03	-11.62	0.67	12.63	0.37	11.78	0.41	-4.44
BATNA	830.281	274.830	0.60	122.63	1.83	-127.20	1.22	-40.23	1.05	-35.03	0.98	-38.40	1.42	-70.18
TELEMCEN	108.219	157.068	1.54	-100.32	1.68	-127.04	0.55	49.55	1.13	-58.41	1.13	-60.41	1.29	-77.67
SKIKDA	864.734	389.128	0.81	35.65	2.00	-201.55	1.27	-76.06	1.24	-82.41	1.24	-76.76	1.43	-92.86
SAIDA	281.583	169.726	1.06	14.02	1.26	-36.85	0.91	2.42	1.40	-86.53	1.07	-50.98	1.37	-77.62
TEBASSA	967.789	216.735	1.30	-39.18	1.91	-166.14	1.41	-81.89	1.49	-99.53	0.91	-35.34	0.75	-25.97
SANIA	197.910	265.035	1.30	-36.79	1.83	-142.89	0.67	40.14	1.79	-140.64	1.14	-62.77	0.84	-37.79
GUALMA	927.125	362.281	1.77	-159.46	1.11	-28.73	1.32	-85.04	2.09	-205.40	0.88	-49.40	0.58	-25.05
BENISAF	128.201	230.286	-0.17	215.93	0.99	-18.49	1.12	-52.08	-0.60	174.66	-0.23	86.04	0.75	-24.11
CHELEF	377.367	324.969	1.24	-19.46	0.34	156.10	0.76	27.43	2.18	-203.94	1.38	-95.71	1.14	-73.62
CONSTONTINE	851.858	338.569	2.19	-228.44	0.97	0.54	1.82	-152.66	1.41	-97.76	0.98	-49.73	0.96	-48.46
DAR ELBEIDA	546.370	375.998	1.35	-62.54	1.09	-19.76	0.24	95.49	1.06	-52.31	1.32	-86.87	1.23	-74.82
MELIANA	458.303	333.452	0.86	58.02	0.95	27.31	1.25	-53.15	1.49	-103.57	0.70	-23.68	0.81	-38.82
M'SILA	662.927	263.795	1.98	-156.07	-0.02	267.71	0.53	91.88	2.81	-261.18	2.16	-156.19	0.69	-15.16
NAAMA	220.324	1.466	1.35	-53.39	-3.02	803.00	3.55	-394.43	0.24	62.68	0.46	5.73	-0.31	56.80
TIARET	280.110	230.638	3.20	-403.07	4.57	-655.72	0.94	11.40	1.16	-44.95	2.77	-195.76	1.50	-84.09

Deux genres des cartes peuvent être le résultat de cette tâche, qui seront la forme modifiée de ces coefficients valables à l'utilisation pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle mensuelle pour le nord du territoire nationale.

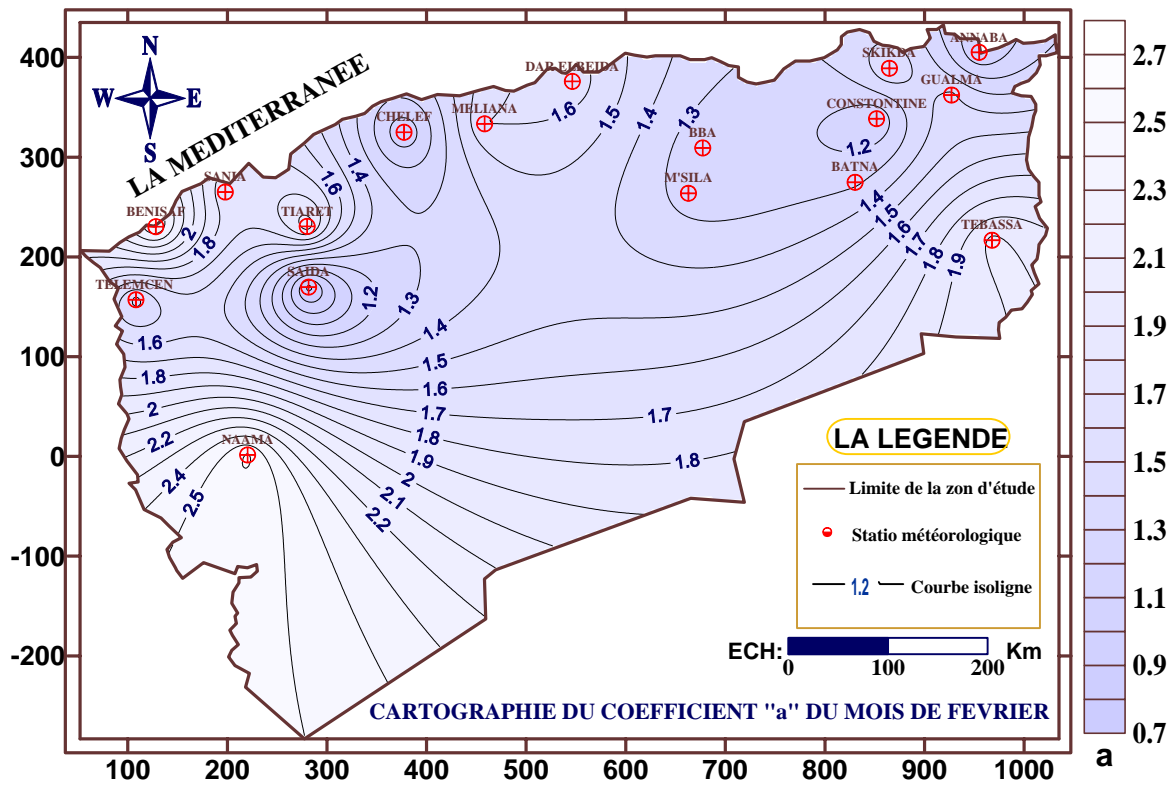
Les cartes de ces coefficients obtenus pour chaque mois de l'année, peuvent simplifier l'utilisation des tableaux, car il suffit à l'aide de ces cartes de déduire les autres valeurs de n'importe quelle endroit sur la région étudiée par une simple interpolation sans recours au calibrage ponctuel de chaque station. Cette tâche sera plus bénéfique s'elle est intégrée dans un système d'information géographique tel que le Map-Info ou Arc-Gis...

Les 12 mois pour l'année implique 24 cartes « 12 cartes pour a » et « 12 cartes pour b ». Une cartographie de la répartition spatiale desdits coefficients est réalisée moyennant l'outil surfer 8 en mode démonstration toute en signalant son indépendance à la seule variation des altitudes des stations de mesure ayant fait référence de tous calcul. Le procédé d'interpolation retenu est le Krigeage qui estime objectivement des champs scalaires sur une grille régulière en latitude et longitude en km, dans la projection Lambert Nord Algérie.

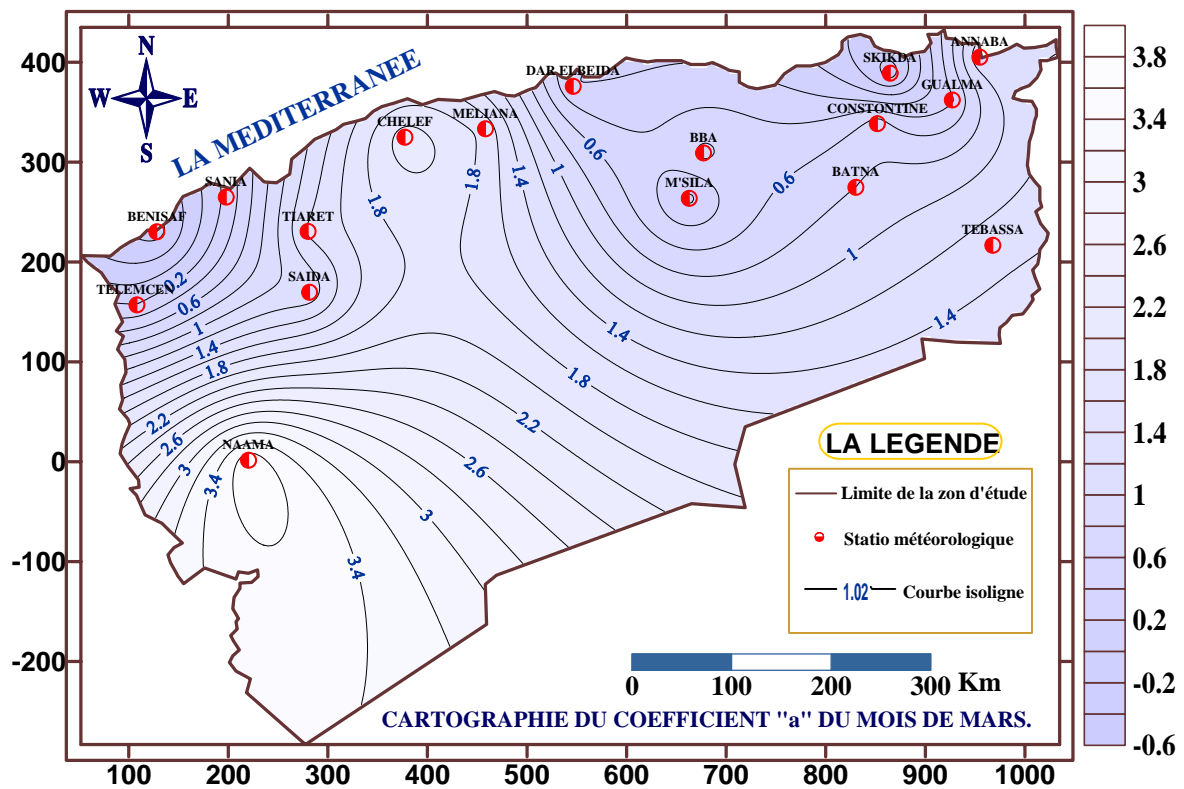
Les cartes des coefficients « a et b » obtenus sont schématisées comme suit :



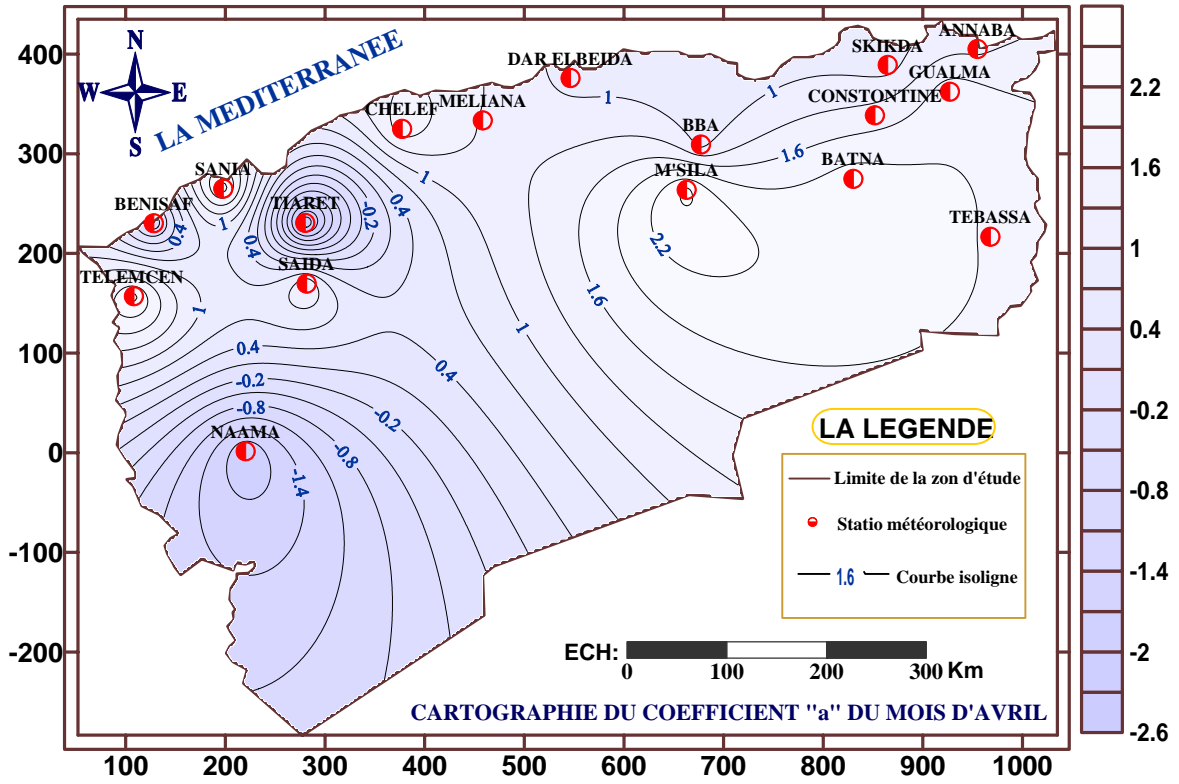
Carte 1: Carte du coefficient "a" pour le mois de Janvier.



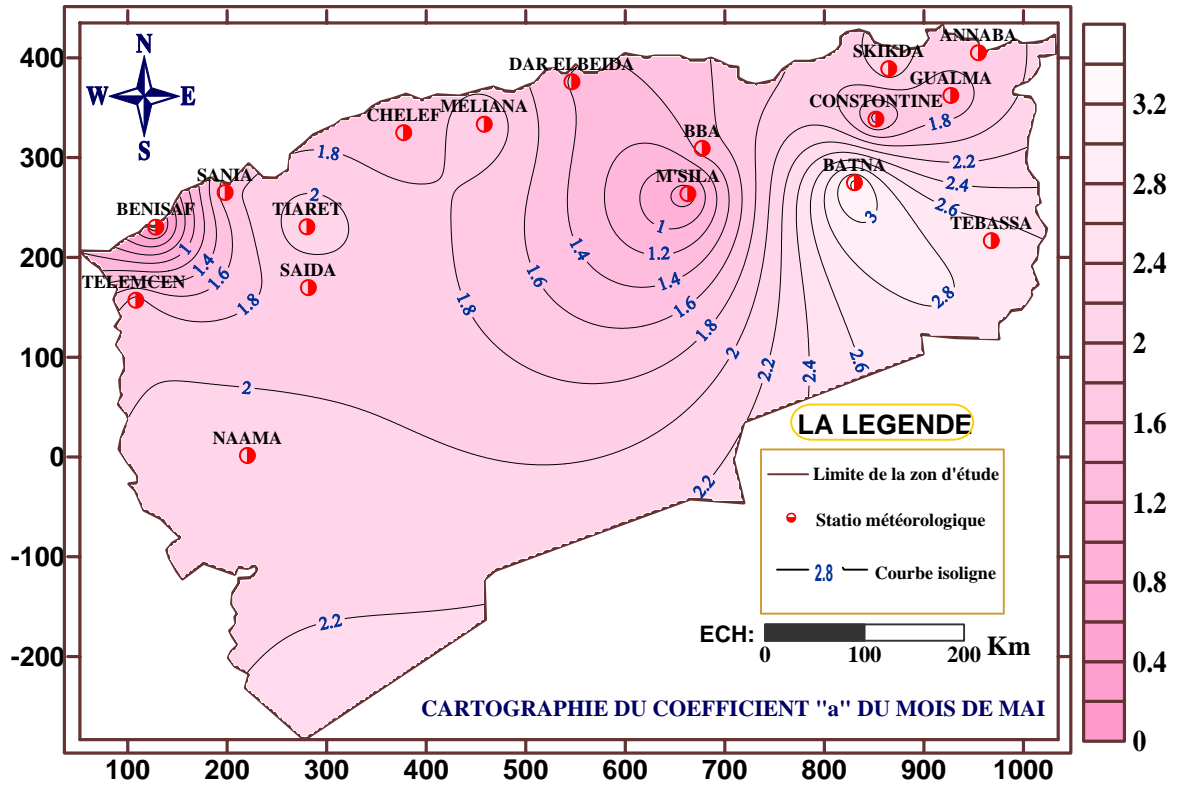
Carte 2: Carte du coefficient "a" pour le mois de Février.



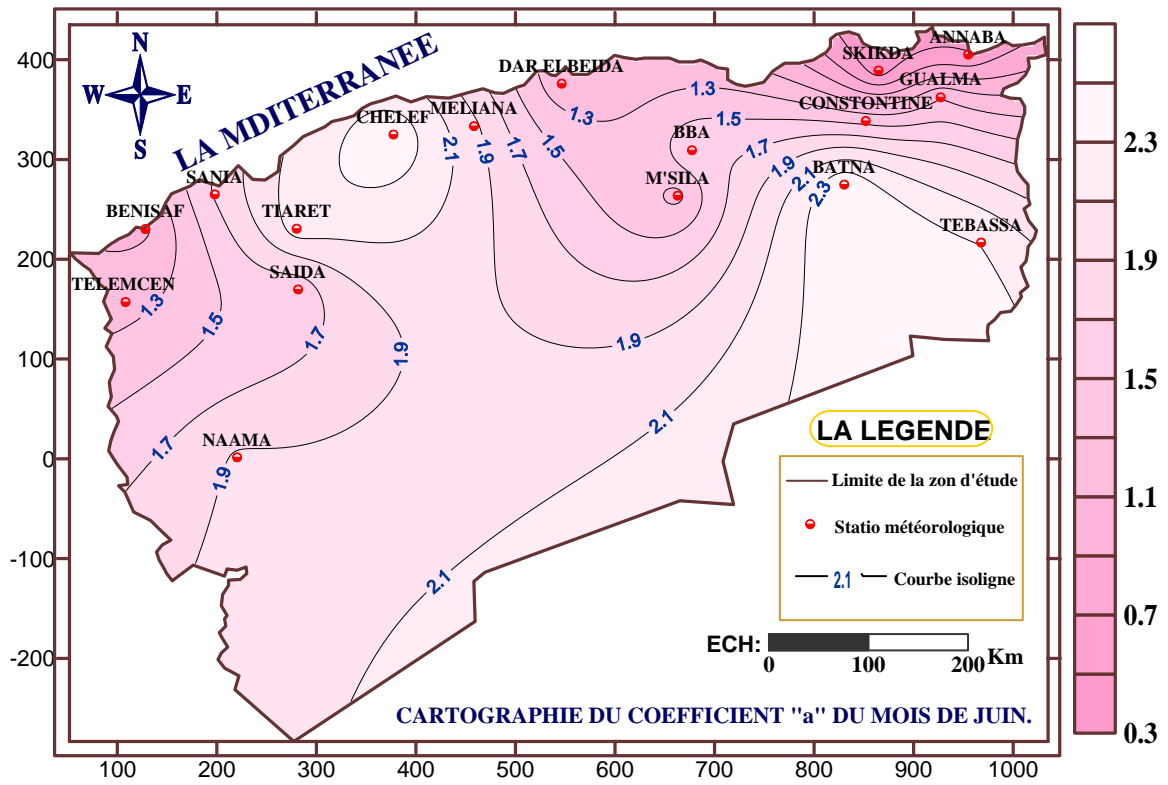
Carte 3: Carte du coefficient "a" pour le mois de Mars.



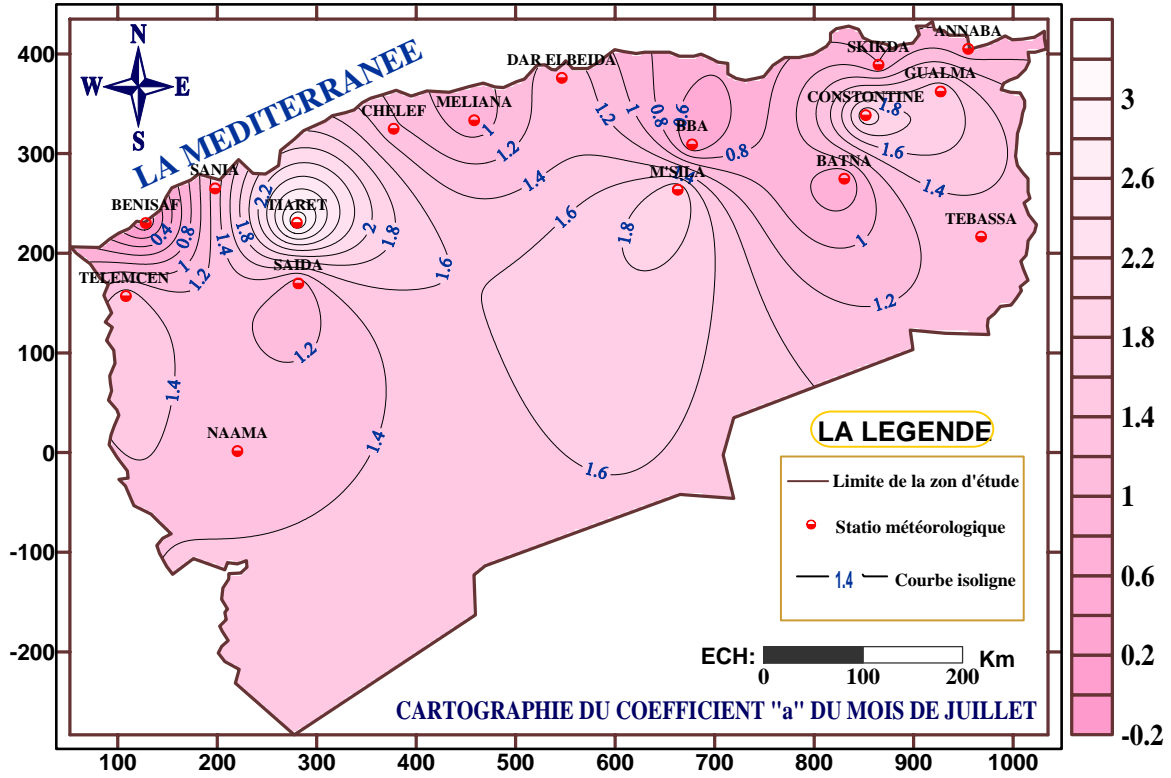
Carte 4: Carte du coefficient "a" pour le mois d'Avril.



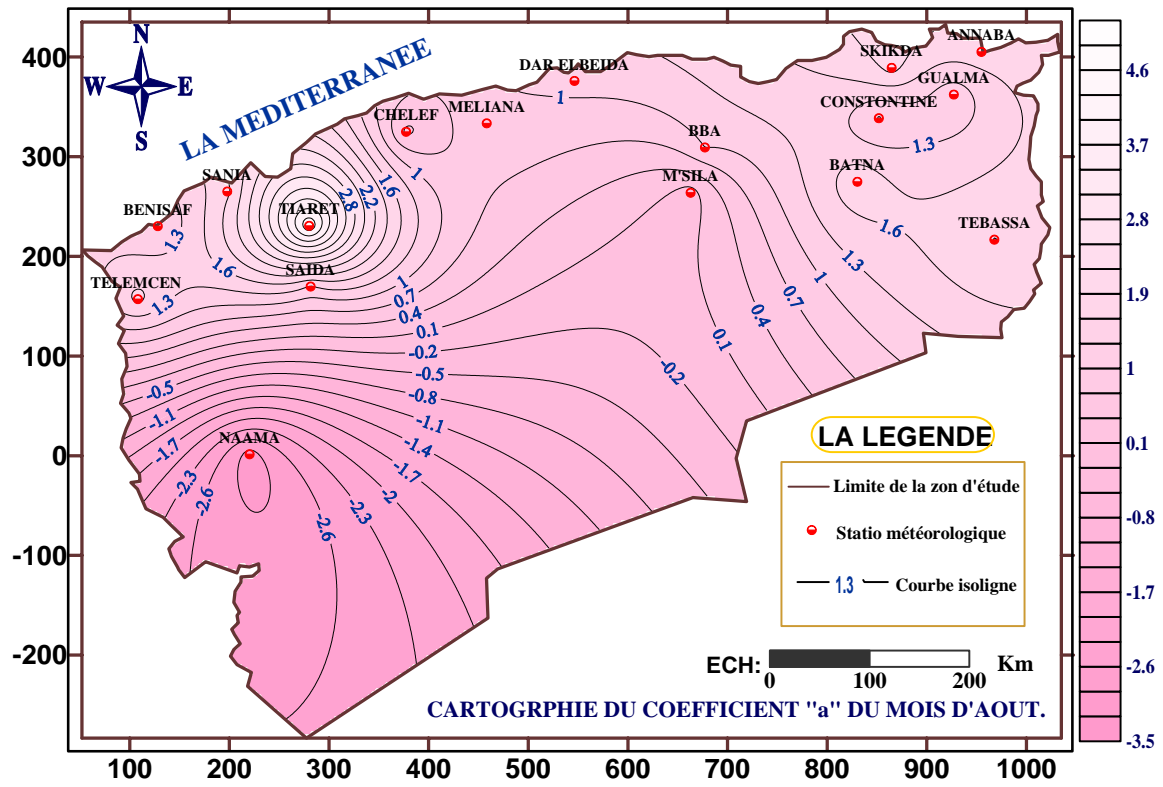
Carte 5: Carte du coefficient "a" pour le mois de Mai.



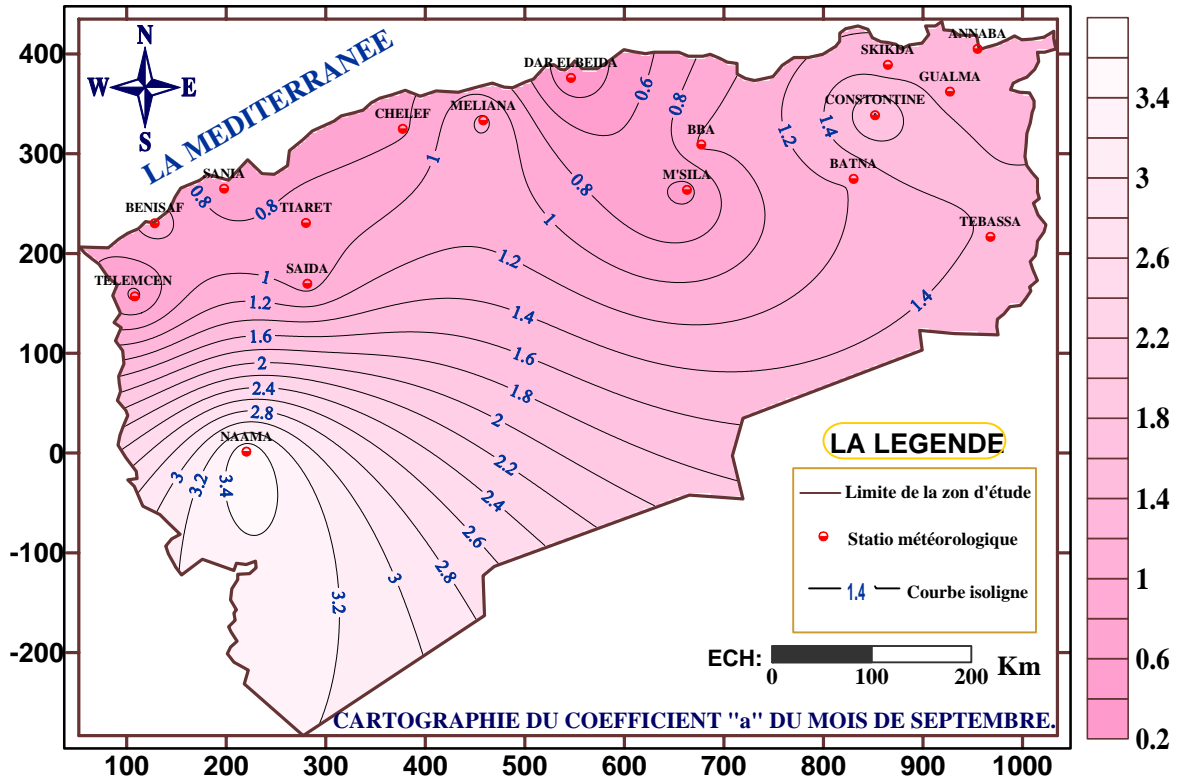
Carte 6: Carte du coefficient "a" pour le mois de Juin.



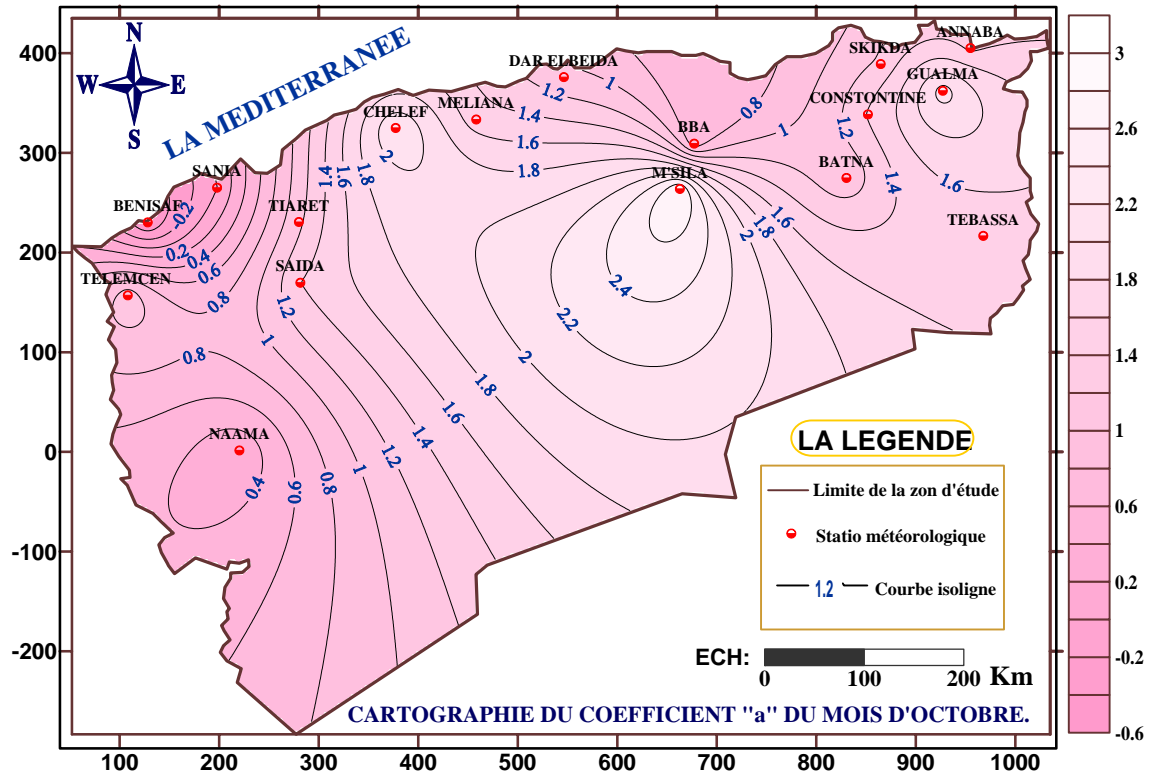
Carte 7: Carte du coefficient "a" pour le mois de Juillet.



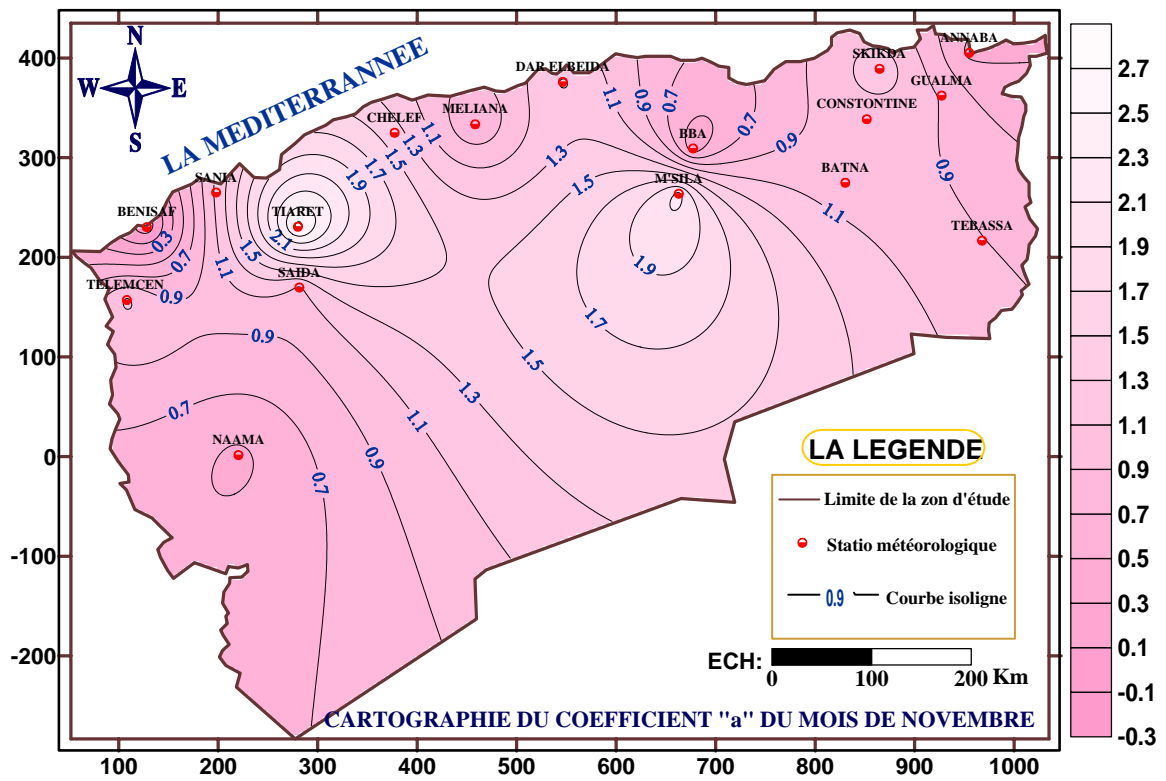
Carte 8: Carte du coefficient "a" pour le mois d'Aout.



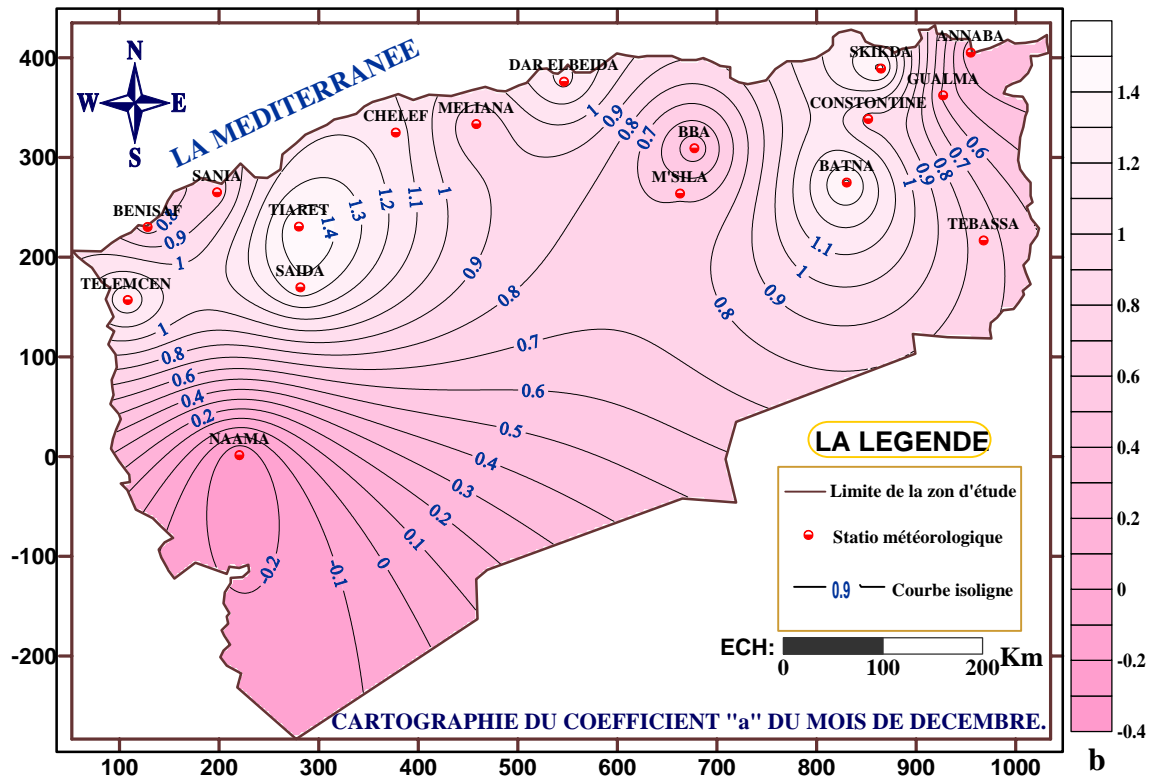
Carte 9: Carte du coefficient "a" pour le mois de Septembre.



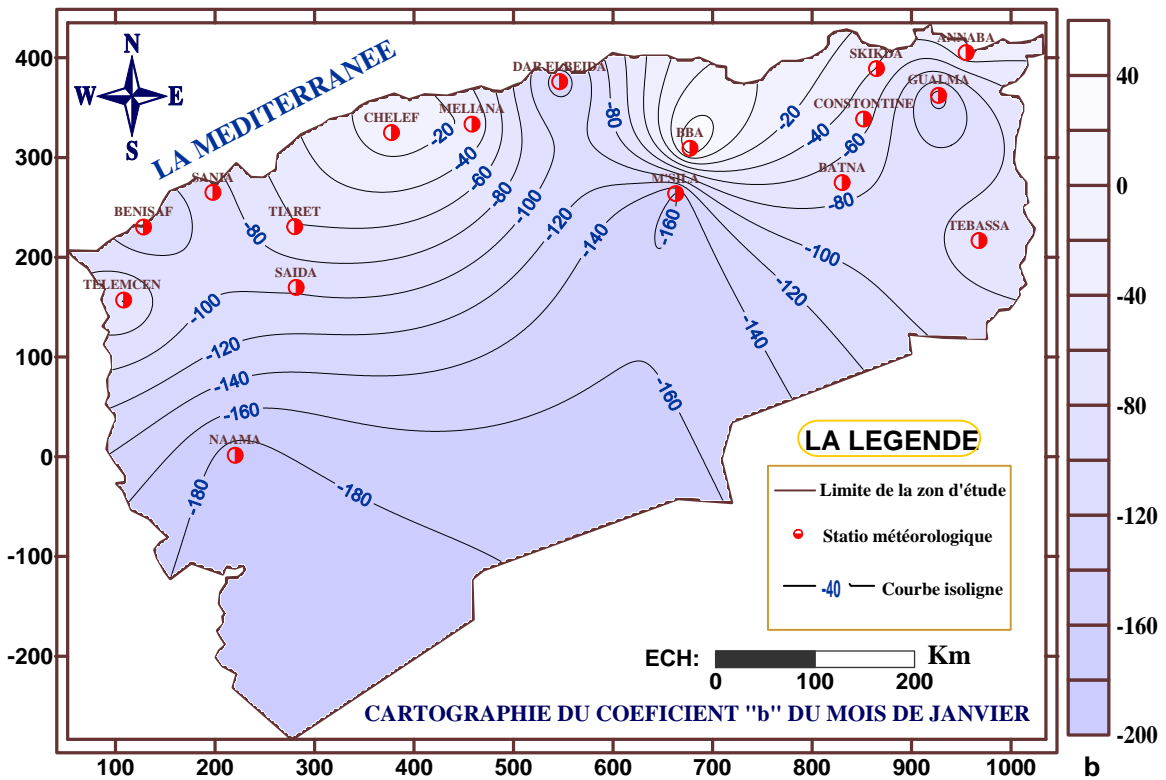
Carte 10: Carte du coefficient "a" pour le mois d'Octobre.



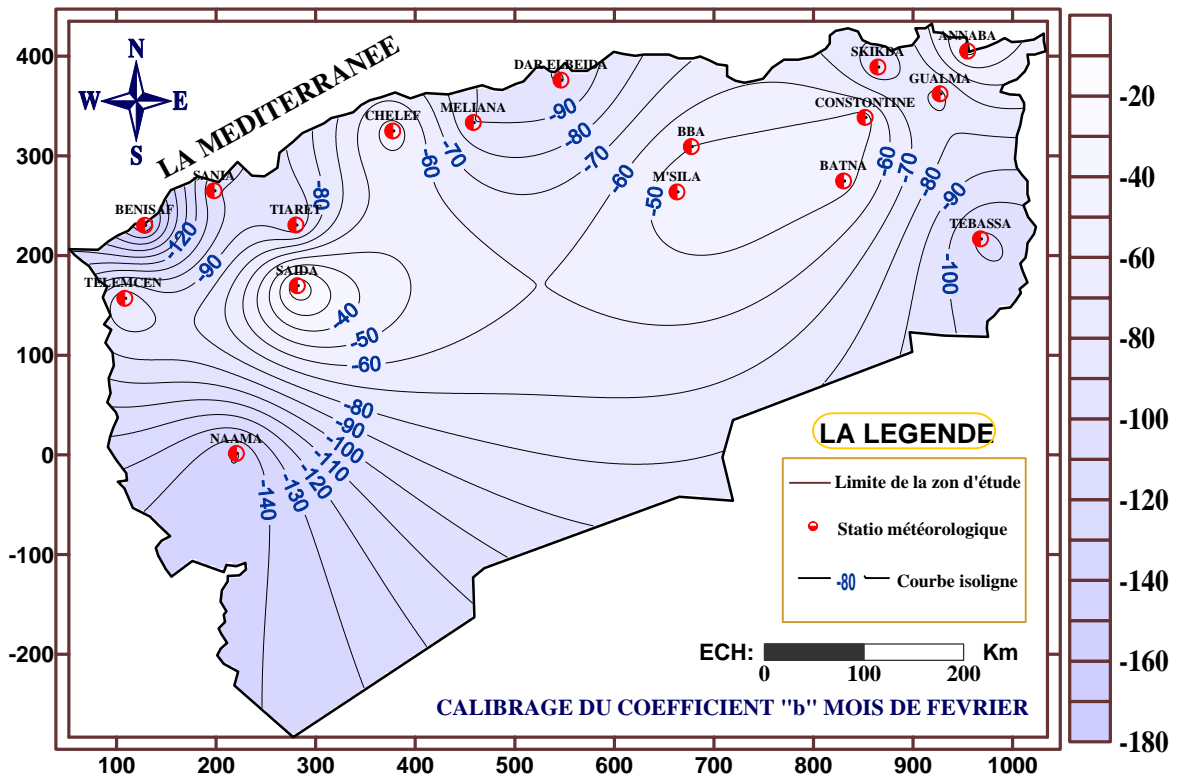
Carte 11: Carte du coefficient "a" pour le mois de Novembre.



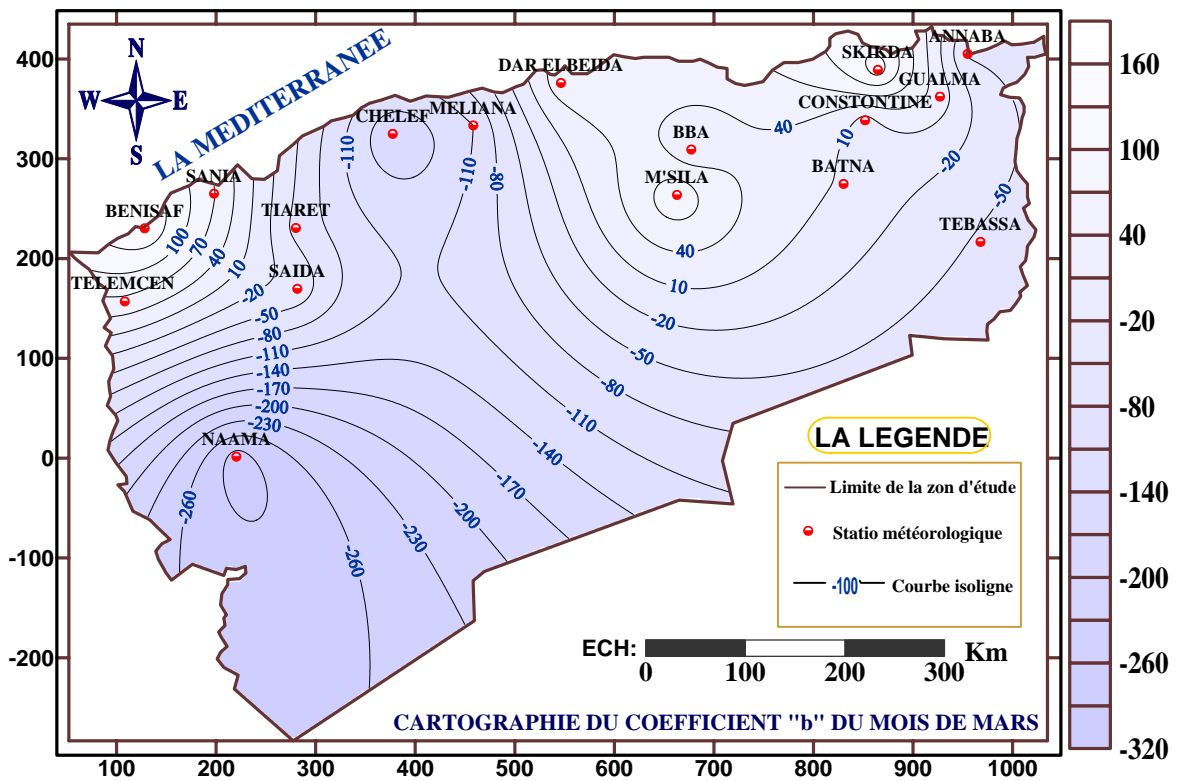
Carte 12: Carte du coefficient "a" pour le mois de Décembre.



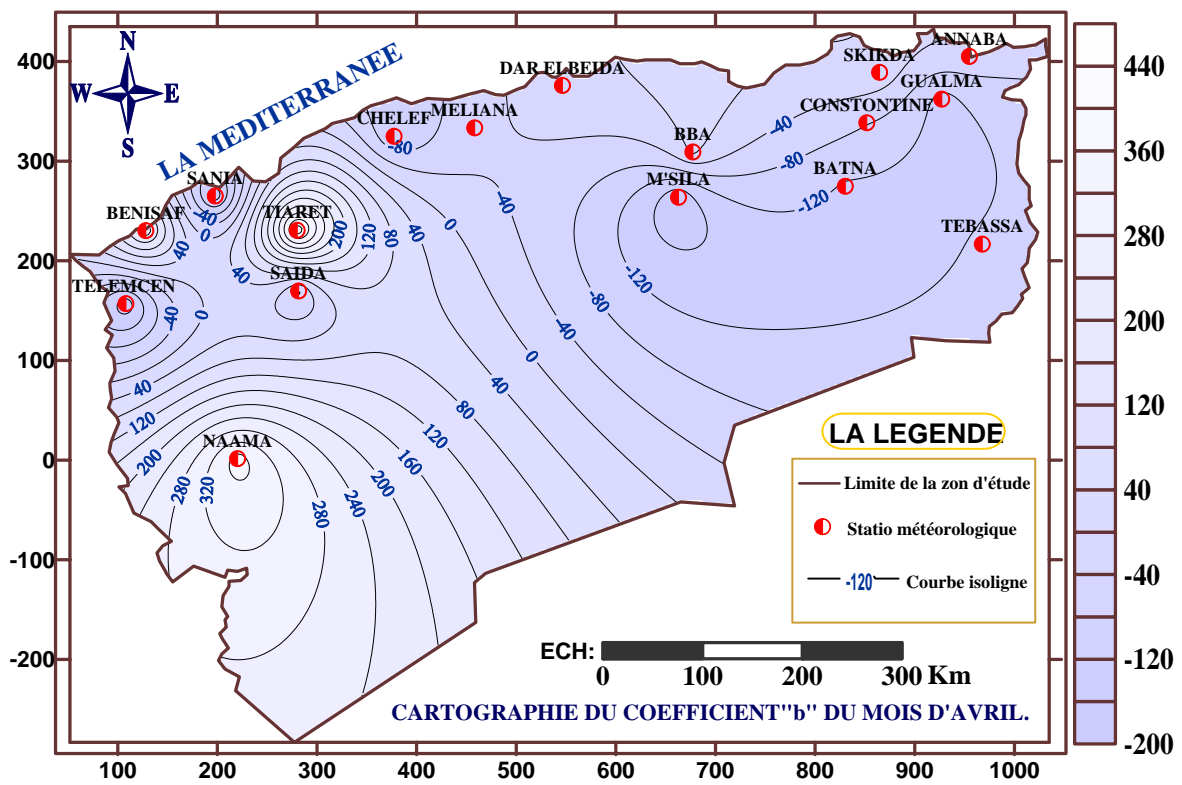
Carte 13: Carte du coefficient "b" pour le mois de Janvier.



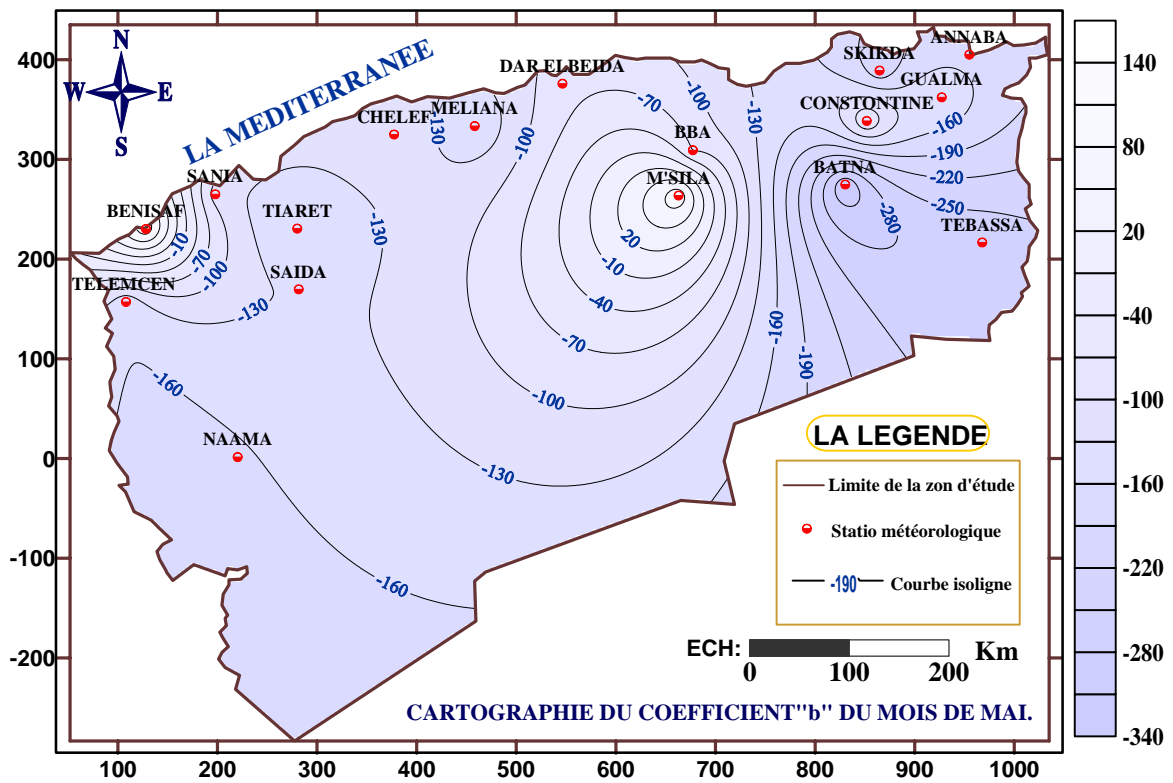
Carte 14: Carte du coefficient "b" pour le mois de Février.



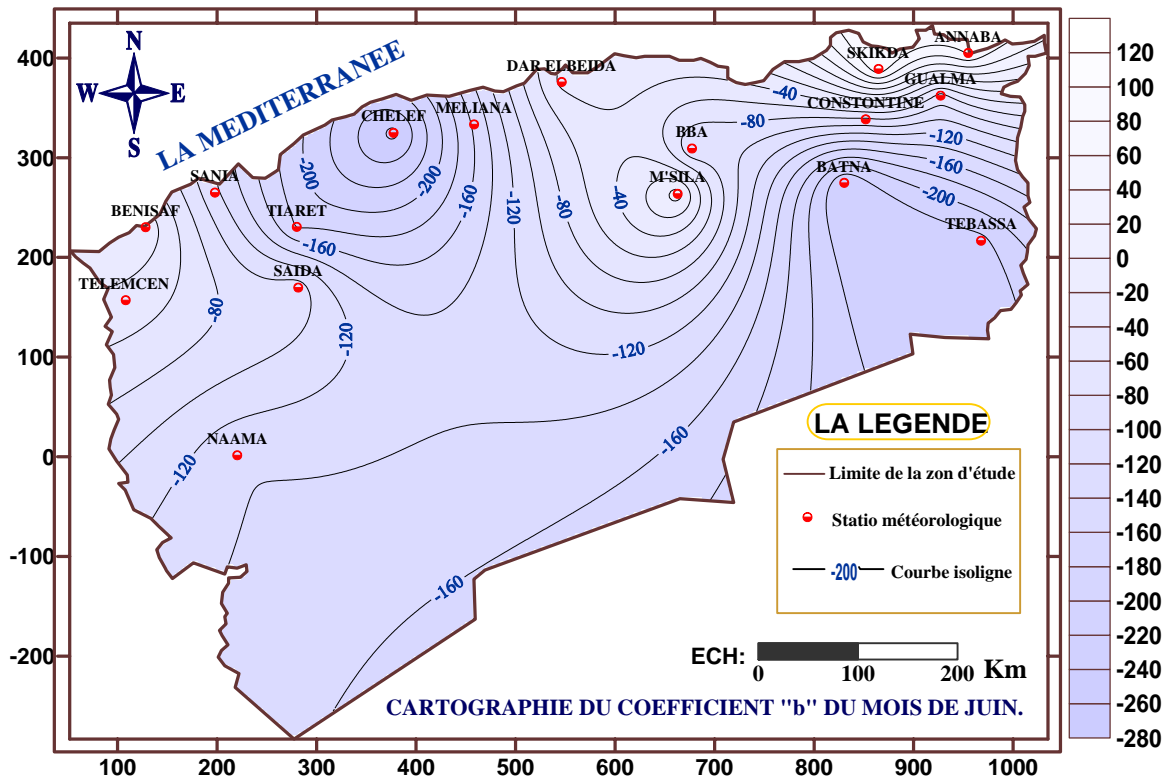
Carte 15: Carte du coefficient "b" pour le mois de Mars.



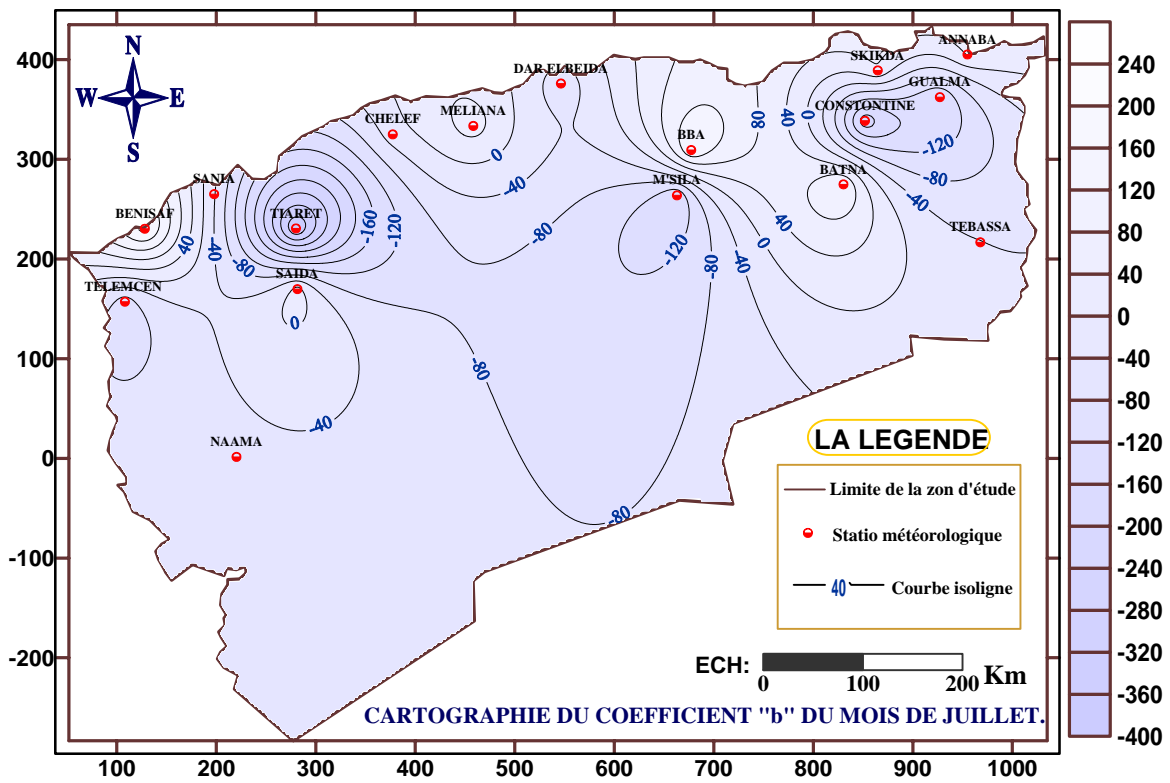
Carte 16: Carte du coefficient "b" pour le mois d'Avril.



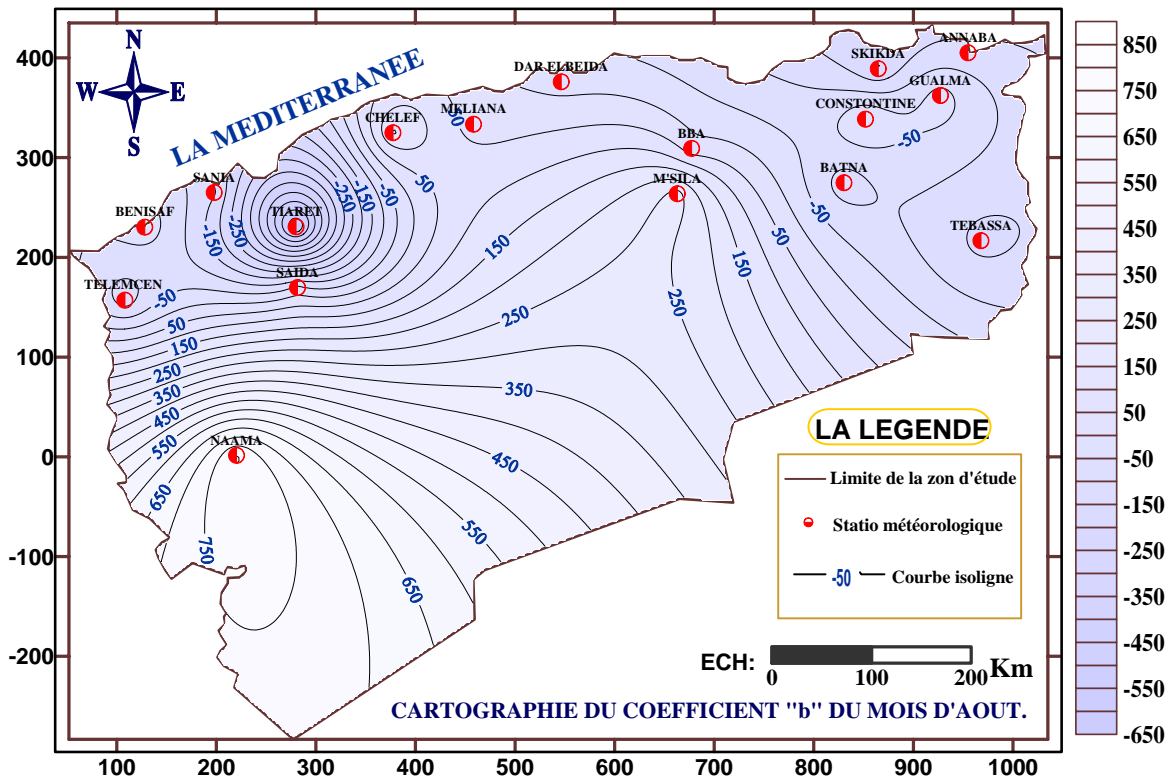
Carte 17: Carte du coefficient "b" pour le mois de Mai.



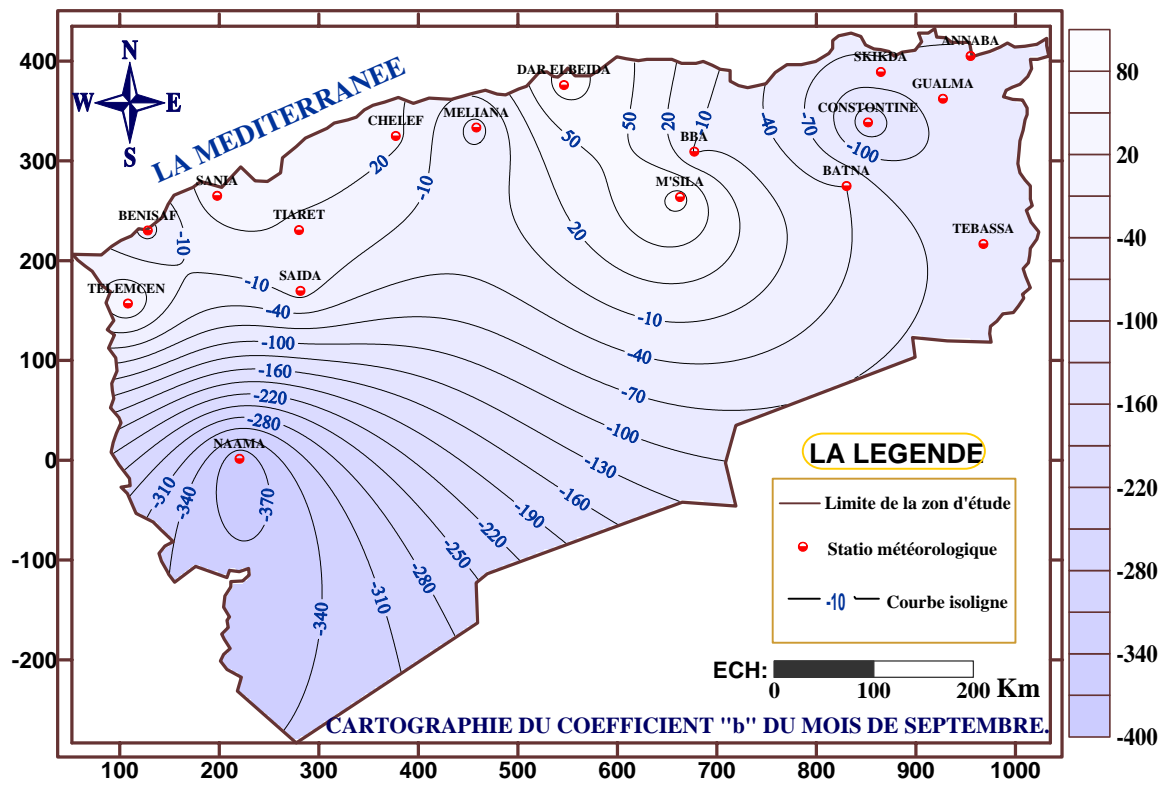
Carte 18: Carte du coefficient "b" pour le mois de juin.



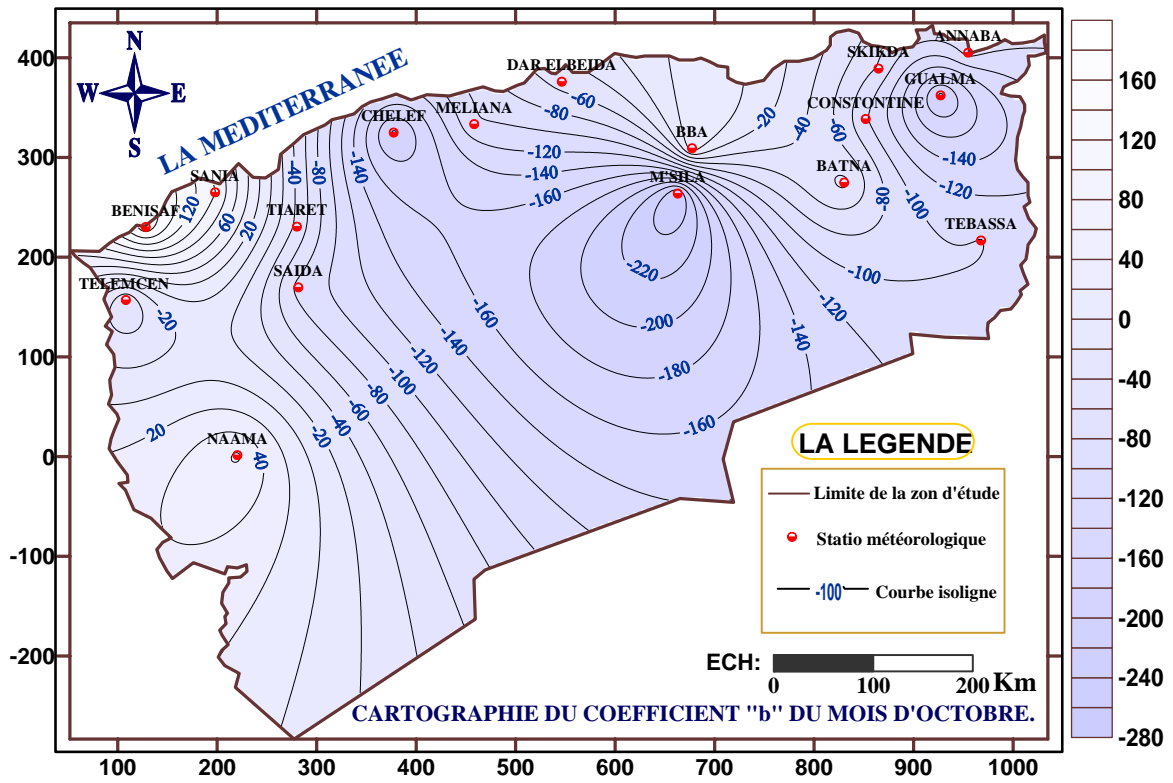
Carte 19: Carte du coefficient "b" pour le mois de juillet.



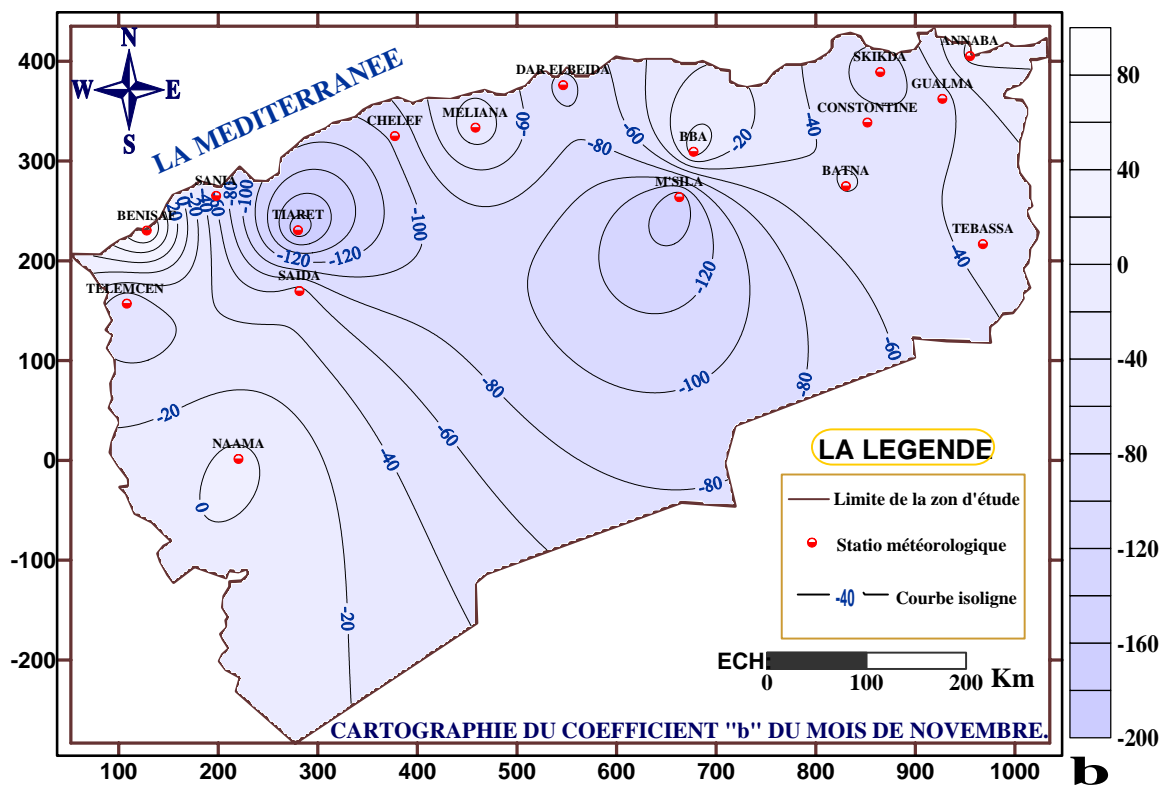
Carte 20: Carte du coefficient "b" pour le mois d'Aout.



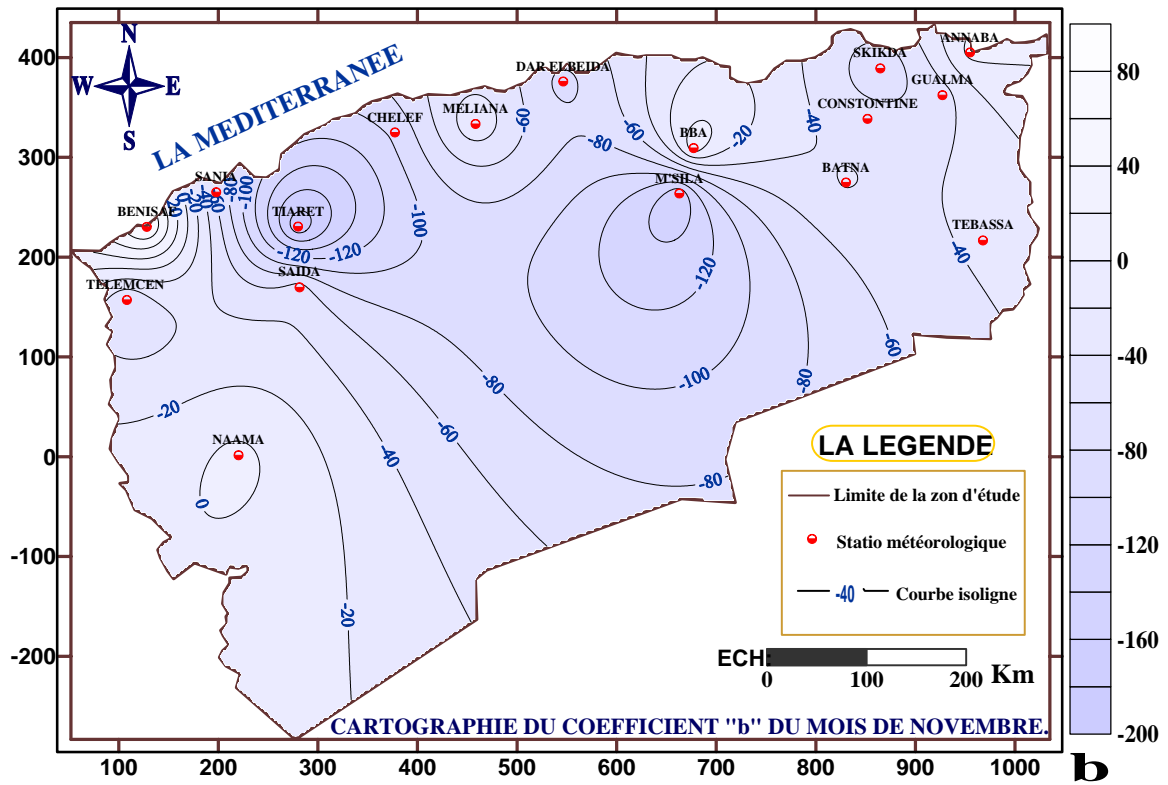
Carte 21: Carte du coefficient "b" pour le mois de Septembre.



Carte 22: Carte du coefficient "b" pour le mois d'Octobre.



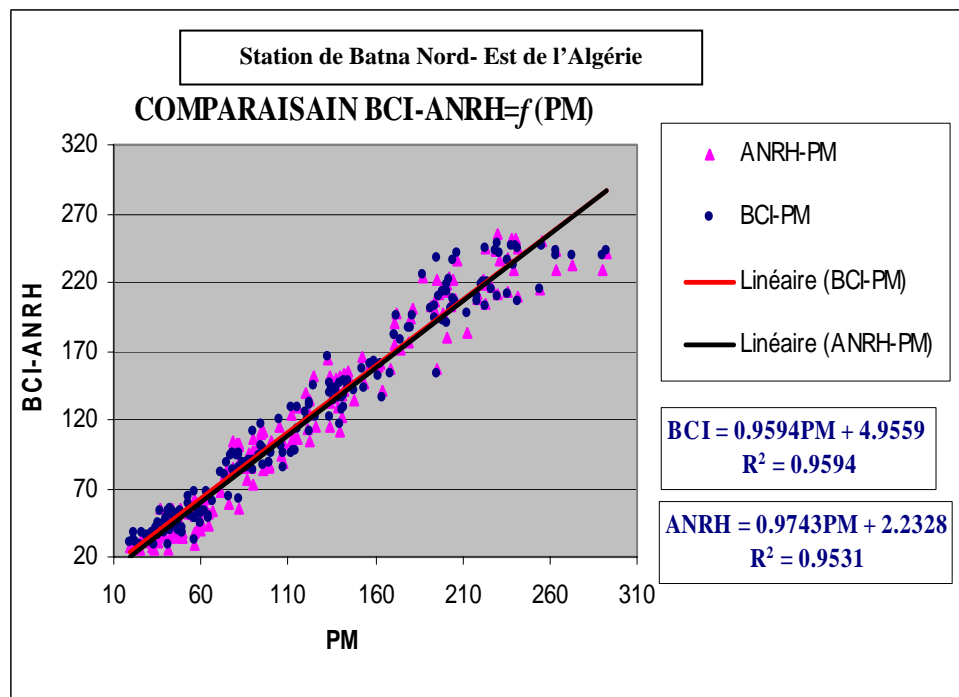
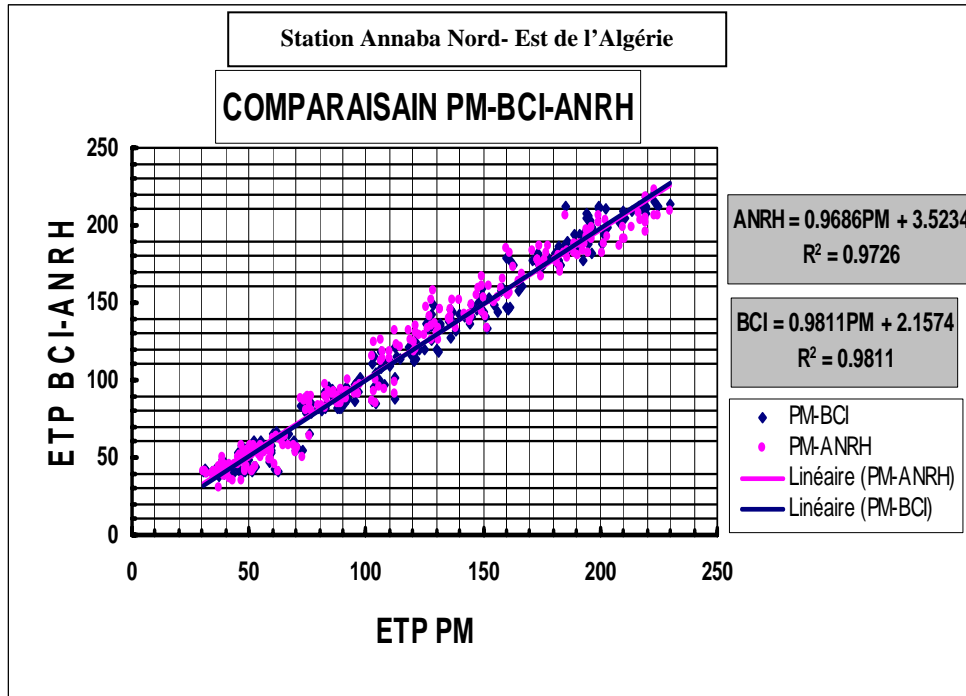
Carte 23: Carte du coefficient "b" pour le mois de Novembre.

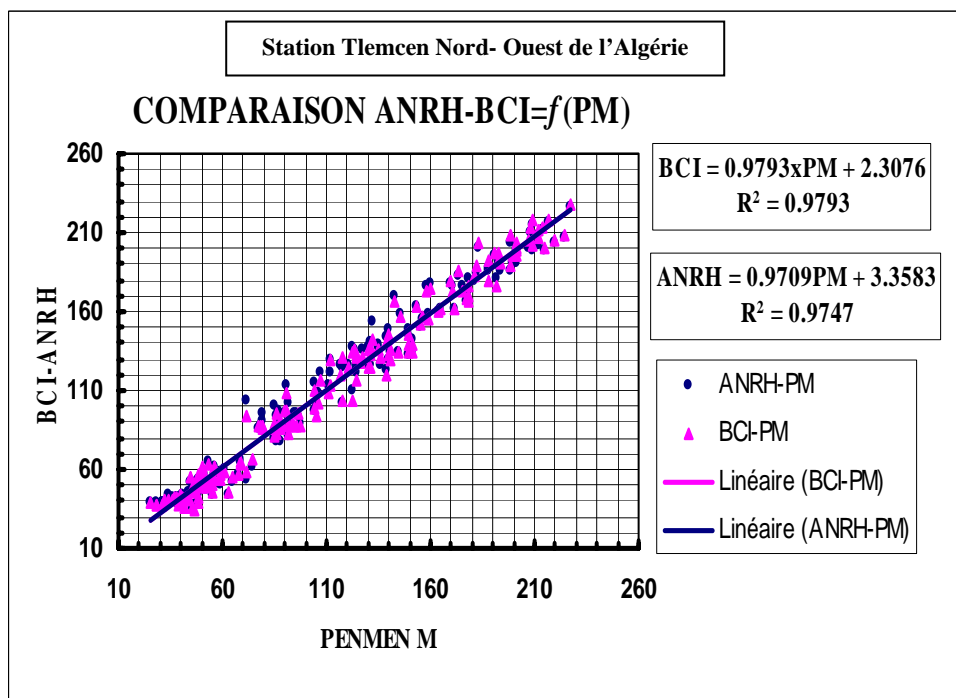
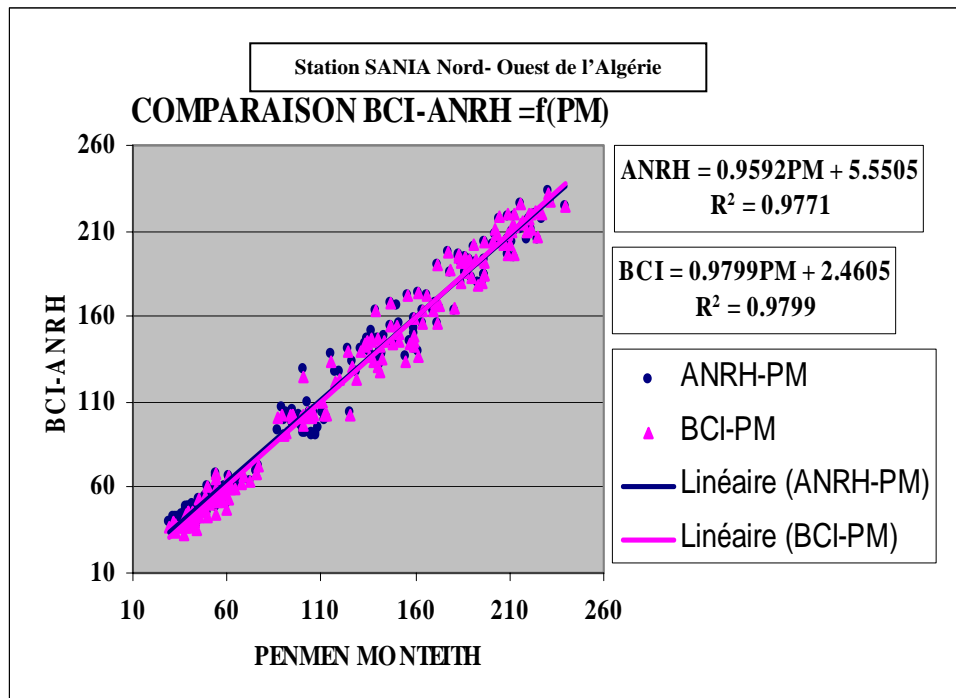


Carte 24: Carte du coefficient "b" pour le mois de Décembre.

**IV.1.2. Interprétation des résultats**

Pour permettre l'interprétation des résultats trouvés, on doit les comparer avec ceux donnés par les relations de ANRH et PENMAN-MONTEITH après avoir tracé les graphiques sur la figure 14, nous avons constaté ceux qui suivent:





*Figure 14: comparaison des trois formules après le calibrage.*

Les graphes ci-dessus montrent que les valeurs trouvées possèdent la même allure avec une corrélation qui n'est pas trop distinguée en considérant comme critère de qualité, le coefficient de détermination, par contre la relation initiale de BLANEY-CRIDDLE ajustée et bien positionnée par rapport à la première bissectrice une fois comparée à la relation de référence

vis-à-vis la relation de l'ANRH, ce qui encourage l'utilisation des coefficients ainsi évalués en revanche des valeurs d'origine établies dans des climats qui diffèrent du contexte de notre étude.

## IV.2. Réajustement de la formule de l'ANRH

### IV.2.1. Visualisation des résultats « Coefficients $K_{ss}$ et $K_{sh}$ »

La formule délivrée en 2002 par l'agence nationale des ressources hydrauliques « ANRH » dans le but d'évaluer les valeurs de l'évapotranspiration en cas de l'absence de mesure des paramètres climatologiques nécessaires pour l'estimation de l'ETP par la formule universelle de PENMAN-MONTEITH est jugée comme l'une des formules très valables pour l'estimation de l'ETP au nord de l'Algérie, elle est bien entendu basée sur le modèle de BLANEY-CRIDDLE.

Malgré son avantage de donner des résultats acceptables, il est toujours utile de chercher un réajustement dans le souci d'avoir de meilleurs résultats en minimisant l'erreur typique. Par ailleurs notre contribution vise à chercher des nouveaux coefficients correctifs outre les coefficients initiaux  $K_r$  et  $K_m$ . Les coefficients à introduire sont considérés des coefficients saisonniers notés par  $K_s$  et prennent l'abréviation «  $K_{sh}$  » pour la saison humide et «  $K_{ss}$  » pour la saison sèche.

Nous rappelons que les 17 stations faisant l'objet de la présente étude soient réparties sur le nord du territoire national entre les coordonnées géographiques ( $32^\circ$ ) et ( $37^\circ$ ) au nord de l'équateur et entre ( $01^\circ 50'W$ ) et ( $8^\circ E$ ) de la ligne méridienne internationale de Greenwich.

Dans la détermination des nouveaux coefficients  $K_{ss}$  et  $K_{sh}$  on se base sur la même base. La formulation déjà proposée sous le numéro (3.1) dans le chapitre III s'écrit :

$$ETP_{ANRH} = K_s K_r K_m (H - 187)(0.032 t + 0.077)$$

Avec :

$K_s$  : représente le nouveau coefficient de calibrage saisonnier à cartographier

Les autres paramètres et leur signification ont été déjà désignés.

Dans le tableau 15 déjà donné dans le chapitre III, ci après nous allons consigner les coefficients  $K_{ss}$  et  $K_{sh}$  qu'on a obtenus au préalable :

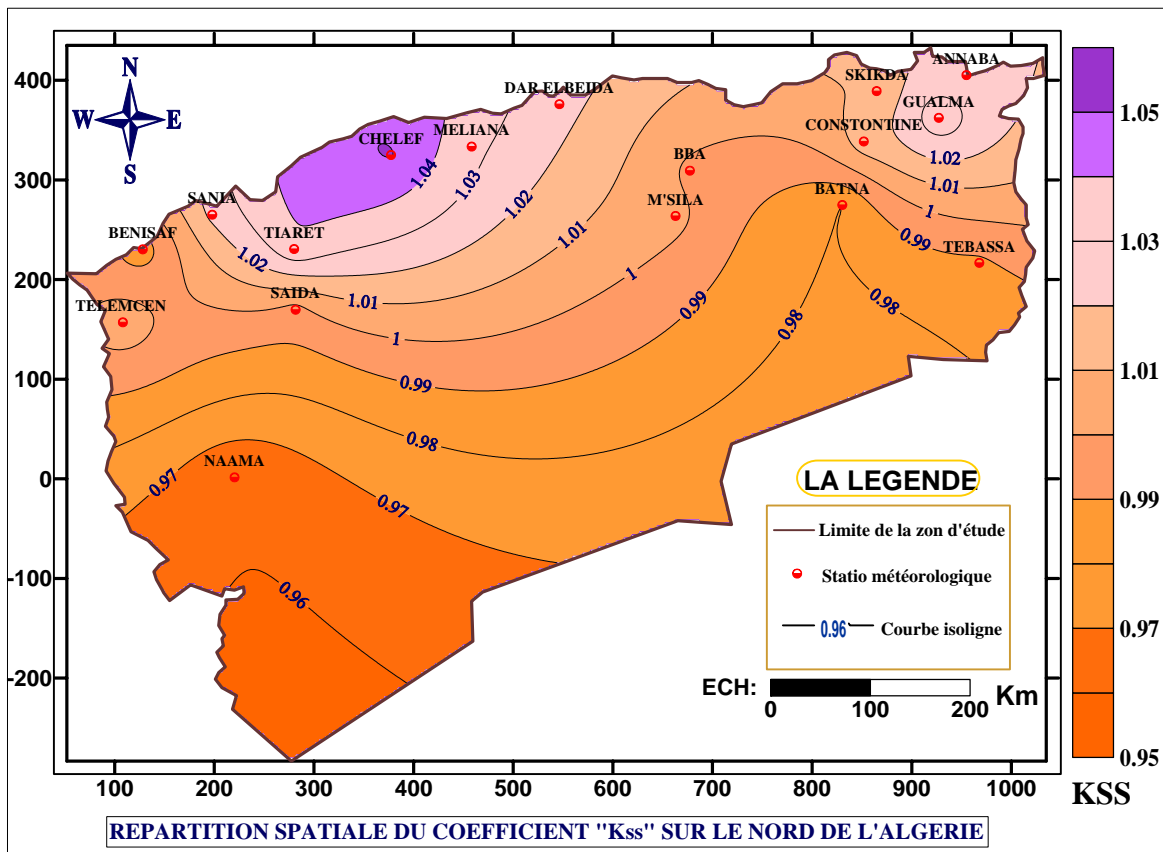
<i>N° station</i>	<i>NOM</i>	<i>INDIC</i>	<i>LAT</i>	<i>LONG</i>	<i>ALTITUDE</i>	<i>Ksh</i>	<i>Kss</i>
1	ANNABA	360	36°50	07°49E	3	<b>0.965</b>	<b>1.019</b>
2	BBA	444	36°04	04°40E	928	<b>1.024</b>	<b>0.998</b>
3	BATNA	468	35°43	06°21E	827	<b>1.066</b>	<b>0.978</b>
4	TELEMCEN	530	34°57	01°27W	210	<b>0.989</b>	<b>1.006</b>
5	SKIKDA	355	36°53	07°58E	680	<b>0.987</b>	<b>1.011</b>
6	SAIDA	536	34°52	01°15E	1009	<b>1.016</b>	<b>0.997</b>
7	TEBASSA	475	35°25	08°20E	17	<b>1.049</b>	<b>0.988</b>
8	SANIA	490	35°38	00°36W	889	<b>0.978</b>	<b>1.023</b>
9	GUALMA	403	36°28	07°28E	227	<b>0.917</b>	<b>1.037</b>
10	BENISAF	518	35°18	01°21W	68	<b>1.034</b>	<b>0.985</b>
11	CHELEF	425	36°13	01°20E	143	<b>0.926</b>	<b>1.050</b>
12	CONSTONTINE	419	36°17	06°37E	694	<b>1.002</b>	<b>1.016</b>
13	DAR ELBEIDA	390	36°41	03°13E	25	<b>0.975</b>	<b>1.023</b>
14	MELIANA	430	36°18	02°14E	137	<b>0.954</b>	<b>1.033</b>
15	M'SILA	467	35°40	04°30E	441	<b>1.030</b>	<b>1.003</b>
16	NAAMA	557	33°16	00°18W	1166	<b>1.046</b>	<b>0.961</b>
17	TIARET	511	35°21	00°17E	312	<b>1.097</b>	<b>1.038</b>

#### IV. 2.2. Cartographie des coefficients $K_{ss}$ et $K_{sh}$ de l'ANRH

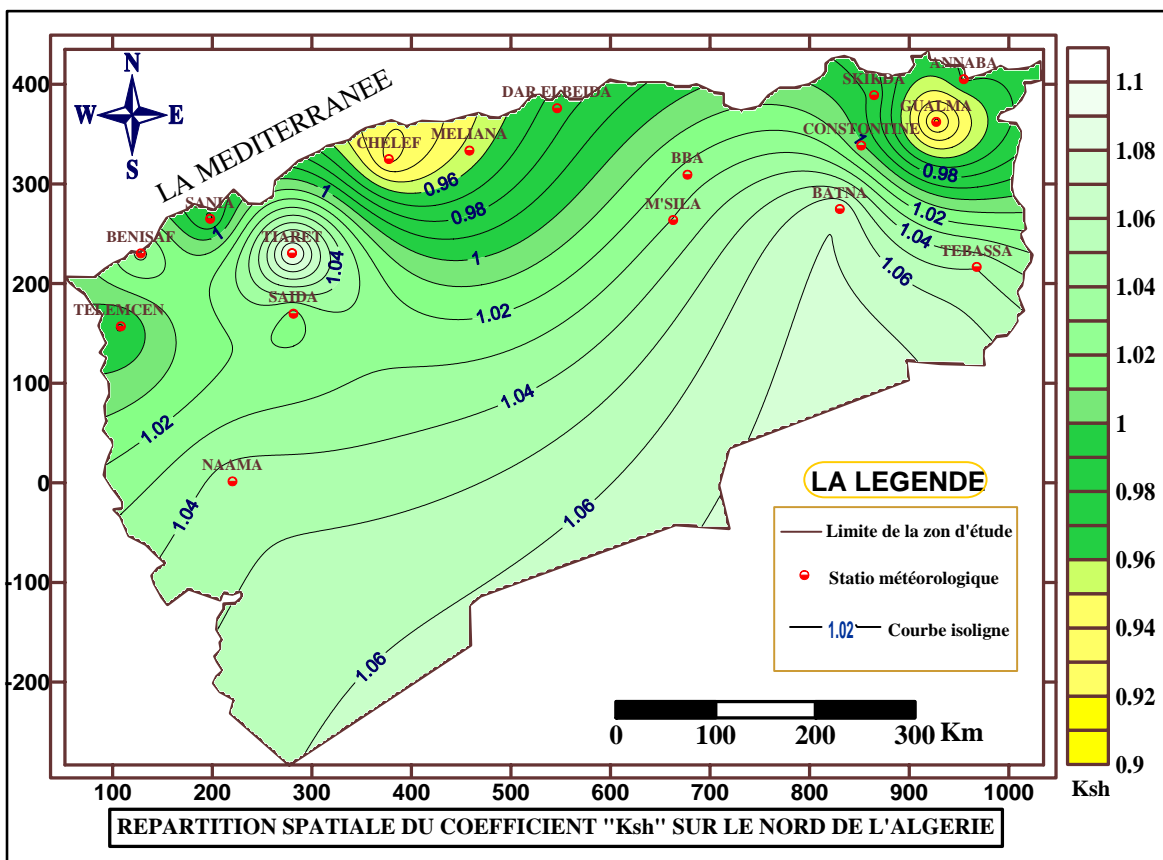
Deux types de cartographie sont à fournir, l'une concerne la saison considérée humide et l'autre concernera la saison considérée sèche.

Ces deux cartes peuvent simplifier l'utilisation de la formule de l'ANRH en combinaison avec les autres tableaux de valeurs des coefficients initiaux  $K_r$  et  $K_m$ .

Les cartes des coefficients  $K_{ss}$  et  $K_{sh}$  sont représentées dans les figures suivantes :



Carte 25: Carte représentative de la répartition du coefficient  $K_{ss}$  sur le nord de l'Algérie



Carte 26: Carte représentative de la répartition du coefficient  $K_{sh}$  sur le nord de l'Algérie

### IV.2.3. Interprétation des résultats

Pour permettre l'interprétation des résultats obtenus, on utilise les courbes de tendance ou de corrélation, ceux qui permettent d'expliquer statistiquement le degré de correspondance entre la formule délivrée et celle de PENMAN-MONTEITH de référence.

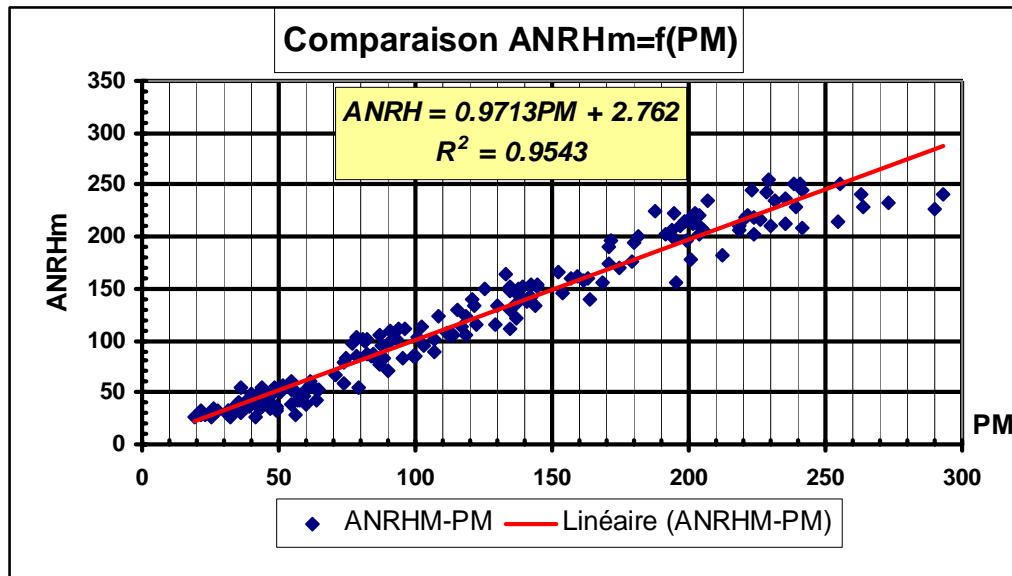


Figure.15: La droite de corrélation entre la formule d'ANRH<sub>m</sub> et PM.  
 Cas de la station de Batna.

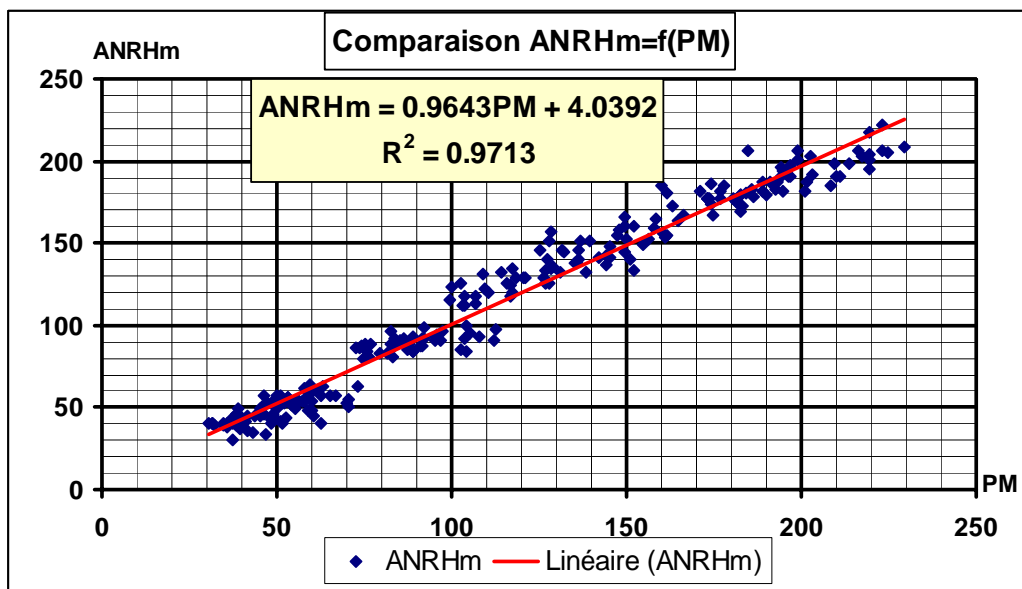


Figure 16: La droite de corrélation entre la formule d'ANRH<sub>m</sub> et PM.  
 Cas de la station d'Annaba.

Les deux graphes montrent que la corrélation est la même et reste inchangée dans la quasi totalité des stations et il est de même pour la position des droites de régression simple par rapport à la première bissectrice. Néanmoins l'introduction des coefficients saisonniers ainsi évalués est justifiés par la minimisation de l'erreur typique toujours pour la quasi totalité des stations étudiées.

### IV.3. Introduction de la température effective dans la formule de BLANEY-CRIDDLE

L'utilisation de la température moyenne dans le calcul de l'évapotranspiration par la formule de BLANEY-CRIDDLE est la méthode la plus courante et la plus facile pour l'estimation de cette dernière, mais dans ces dernières années des auteurs ont proposés l'introduction d'une nouvelle notion appelée température effective ( $T_{eff}$ ) (Camargo et al 1999). Cette notion qui est une combinaison empirique de la température moyenne et son étendu améliore une fois utilisée à la place de la température moyenne seule, l'évaluation de l'ETP selon toujours les recherches de (Pereira-Pruitt 2004).

Dans cette partie de l'étude on a utilisé le terme de la température effective pour l'estimation de la valeur de l'ETP par la formule de BLANEY-CRIDDLE INITIALE (BCI) qui est devenue BLANEY CRIDDLE MODIFIEE (BCM). Nous nous sommes limité à la station de Batna qui dispose des données requises.

#### IV.3.1. Visualisation des résultats « nouveaux coefficients a et b » pour BCM

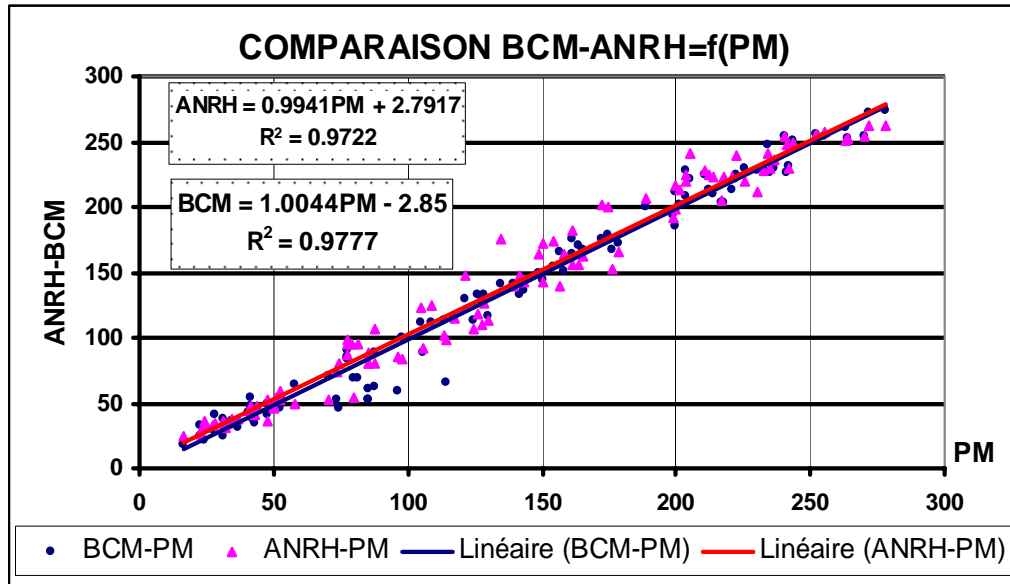
Après un calcul adéquat de l'évapotranspiration par la formule de BCM en utilisant le terme de la température effective nous avons déduit certains nouveaux coefficients empiriques (a et b) qui sont le fruit de cette partie pour la station de « Batna-Ain Sekhouna » durant la période de 1990-2000, les valeurs numériques des nouveaux coefficients trouvées sont (tableau 17 du chapitre III):

Mois	janvier		février		mars		avril		mai		juin	
Coefficients	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
ST.BATNA	-215.96	2.65	-24.13	0.67	-64.37	0.93	-266.56	2.69	-323.58	2.68	-327.59	2.65
Mois	juillet		août		septembre		octobre		novembre		décembre	
Coefficients	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
ST.BATNA	-608.52	3.86	-451.61	3.23	-410.76	3.41	-384.33	3.46	-221.22	2.56	-182.91	2.23

Ces coefficients sont les résultats de correction et d'ajustement de la formule de BCI devenue BCM pour la station cité précédemment en la comparant avec de celle de PENMEN MONTEITH de référence, après introduction de la notion de température effective. Malheureusement nous ne nous disposons pas des données nécessaires pour accomplir cette démarche pour le reste des stations du nord de l'Algérie.

### IV.3.3. Interprétation des résultats

A cause de l'absence des données des autres stations, nous allons interpréter le résultat obtenu pour la station de Batna-Ain Sekhouna sur la période (1990-2000), à ce moment là la nécessité de tracer la courbe de tendance sera indispensable.



*Figure 17: La droite de corrélation entre la formule de BCM et PM.  
Cas de la station Batna -Ain Sekhouna.*

La figure ci-dessus montre une très forte corrélation (98.88%) entre l'ETP de BCM et PM alors qu'elle prend une valeur de 98.60% pour la formule dite ANRH et PM ; ce qui confirme du moins pour cette station que l'introduction du nouveau concept est très utile et bien justifié.

Pour juger définitivement, il nous faut une continuation à travers une nouvelle collecte des données.

### IV.4 Introduction de la notion de la température effective dans la formule de Hargreaves

La formule de Hargreaves est l'une des formules qui est basée sur l'information thermométriques, alors que l'acquisition de cette information nécessite une précision d'autant élevée pour permettre leur application sans aucune ambiguïté et risque d'être endommagée.

A ce moment, le recours d'ajuster cette information par la comparaison avec une autre formule universelle très recommandée comme celle de P.M est devenu impératif.

Dans cette partie, nous allons présenter une autre tentative pour l'application de cette formule en introduisant le terme cité antérieurement ( $T_{eff}$ ) et comparer les résultats ainsi trouvés par ceux évalués par l'application de la formule de P.M.

#### IV.4.1. Visualisation des résultats « Coefficients a et b » :

Cette contribution vise à calibrer cette formule par rapport à la formule de P.M et donner des nouveaux coefficients empiriques valables pour la zone d'étude en remplacement de valeurs d'origine dépendant du lieu géographique, ainsi qu'à déduire l'influence de l'introduction de la température effective sur la qualité des résultats.

Cette approche caractérise la station de Batna-Ain Sekhouna pour les raisons déjà évoquées.

Nous rappelons seulement le résultats issus du chapitre III, et il s'agit des tableaux 19 et 21 fusionnés.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Octo	Nov	Déc
$K_{Harg}$	0.0018	0.0021	0.0024	0.0026	0.0025	0.0024	0.0026	0.0025	0.0026	0.0025	0.0023	0.0020
$K_{Harg\ mod}$	0.0015	0.0017	0.0021	0.0024	0.0024	0.0026	0.0026	0.0026	0.0027	0.0025	0.0021	0.0017

#### IV.4.2. Interprétation des résultats

Pour permettre l'interprétation des résultats on doit toujours faire recours aux courbes de tendance, qui sont l'outil universel de comparaison ; les figures ci-dessous expliquent couramment l'influence des corrections apportées lors de calibrage :

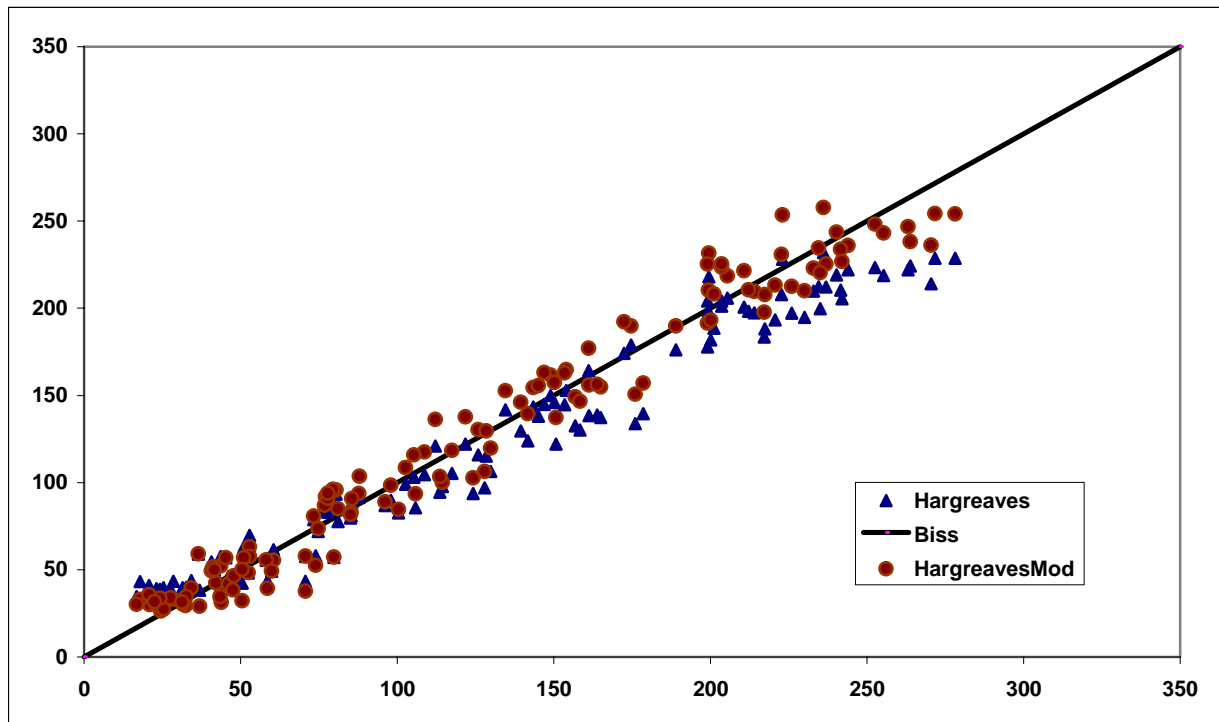


Figure 18: Disposition des ETP de Hargreaves initiale et Hargreaves modifié. Cas de la station de Batna-Ain Sekhouna.

De la figure 19, il apparaît très clair que les valeurs des ETP évaluées par la relation de Hargreaves modifiée en changeant mois par mois les valeurs de K, sont bien disposées par rapport à la première bissectrice, comparées à leurs homologues issues des calculs avec

$K=0.0023$ . D'où une meilleure superposition avec le nuage des valeurs formées par les ETP de PM. Par contre l'introduction de la notion de Teff, n'a apporté aucune amélioration à signaler. Cela est dû à notre sens du fait que la formulation d'origine de Hargreaves tient compte implicitement d'une certaine combinaison empirique des valeurs de la température à savoir: moyenne, minimale et maximale.

#### IV.5. Concrétisation du calibrage de la formule de THORNTHWAITE

Il est maintenant évident que l'utilisation de la méthode de calibrage pour corriger ou améliorer certains formules reste la meilleure méthode qui nous fournira de bons résultats du point de vue qualité d'approximation, surtout dans le cas des formules qu'utilisent un seul paramètre telle que la formule de THORNTHWAITE qui est basée à son tour sur l'information thermométrique ( $T_{moy}$ ) mensuelle.

##### IV.5.1. Visualisation des résultats « Coefficients K »

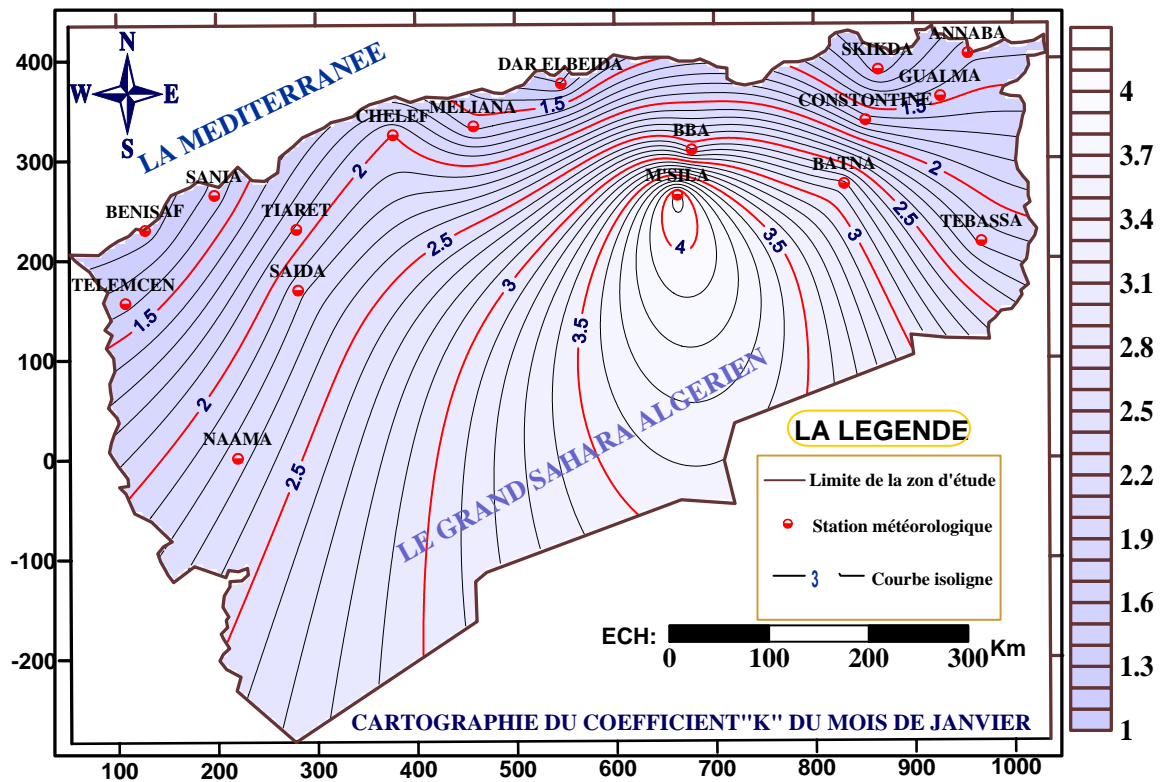
Dans ce qui suit, on s'intéressera à la concrétisation du calibrage ainsi élaboré au cours du chapitre précédent dont les résultats sont rappelés (tableau 25 du chapitre III).

N. STA	X.lamb(Km)	X.lambKm	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
ANNABA	954.843	405.119	<b>1.37</b>	1.56	<b>1.95</b>	1.88	<b>1.43</b>	1.13	<b>0.94</b>	0.83	<b>0.71</b>	0.72	<b>0.79</b>	0.95
BBA	677.300	309.256	<b>2.60</b>	2.57	<b>2.75</b>	2.49	<b>1.91</b>	1.31	<b>1.18</b>	0.96	<b>0.97</b>	1.10	<b>1.29</b>	1.29
BATNA	830.281	274.830	<b>2.82</b>	3.05	<b>3.35</b>	2.51	<b>1.95</b>	1.38	<b>1.13</b>	1.07	<b>0.99</b>	1.23	<b>1.54</b>	2.34
TELEMCEN	108.219	157.068	<b>1.37</b>	1.56	<b>1.92</b>	1.91	<b>1.56</b>	1.24	<b>0.92</b>	0.83	<b>0.86</b>	0.87	<b>1.01</b>	0.99
SKIKDA	864.734	389.128	<b>1.05</b>	1.37	<b>1.68</b>	1.64	<b>1.46</b>	1.07	<b>0.95</b>	0.79	<b>0.74</b>	0.68	<b>0.79</b>	1.01
SAIDA	281.583	169.726	<b>2.17</b>	2.26	<b>2.53</b>	2.26	<b>1.72</b>	1.18	<b>0.95</b>	0.91	<b>0.84</b>	1.00	<b>1.09</b>	1.67
TEBASSA	967.789	216.735	<b>2.17</b>	2.21	<b>2.62</b>	2.00	<b>1.74</b>	1.15	<b>1.11</b>	0.95	<b>0.86</b>	0.93	<b>1.24</b>	1.69
SANIA	197.910	265.035	<b>1.34</b>	1.65	<b>2.10</b>	2.17	<b>1.72</b>	1.22	<b>1.05</b>	0.90	<b>0.86</b>	1.00	<b>0.93</b>	1.05
GUALMA	927.125	362.281	<b>1.45</b>	1.94	<b>1.72</b>	1.86	<b>1.27</b>	1.02	<b>0.82</b>	0.66	<b>0.64</b>	0.64	<b>0.70</b>	0.94
BENISAF	128.201	230.286	<b>1.14</b>	1.65	<b>1.65</b>	1.72	<b>1.49</b>	1.04	<b>0.87</b>	0.69	<b>0.67</b>	0.77	<b>0.78</b>	0.91
CHELEF	377.367	324.969	<b>2.00</b>	1.69	<b>2.03</b>	1.82	<b>1.24</b>	0.90	<b>0.71</b>	0.67	<b>0.65</b>	0.75	<b>0.83</b>	1.08
CONSTANTINE	851.858	338.569	<b>1.64</b>	1.71	<b>2.32</b>	2.05	<b>1.57</b>	1.21	<b>1.07</b>	0.89	<b>0.82</b>	0.87	<b>1.05</b>	1.20
DAR ELBEIDA	546.370	375.998	<b>1.20</b>	1.63	<b>1.70</b>	1.90	<b>1.50</b>	1.17	<b>0.93</b>	0.82	<b>0.79</b>	0.77	<b>0.80</b>	1.07
MELIANA	458.303	333.452	<b>1.56</b>	1.65	<b>2.21</b>	1.98	<b>1.66</b>	1.26	<b>1.02</b>	0.92	<b>0.85</b>	0.91	<b>0.89</b>	1.07
M'SILA	662.927	263.795	<b>4.15</b>	2.88	<b>3.05</b>	2.21	<b>1.26</b>	0.86	<b>0.73</b>	0.75	<b>0.73</b>	1.04	<b>1.49</b>	4.18

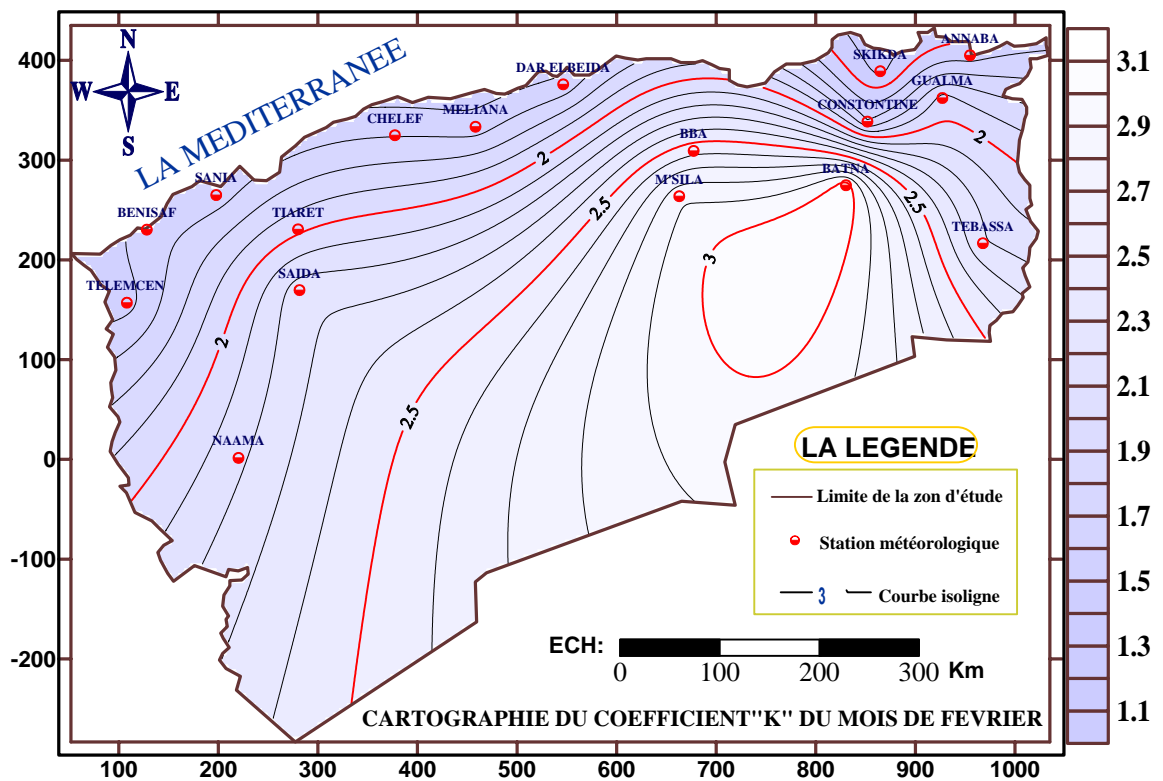
Ces valeurs constituent la base de données nécessaire pour l'étape de cartographie concernant cette relation.

##### IV.5.2. Cartographie des Coefficients K de la formule de THORNTHWAITE

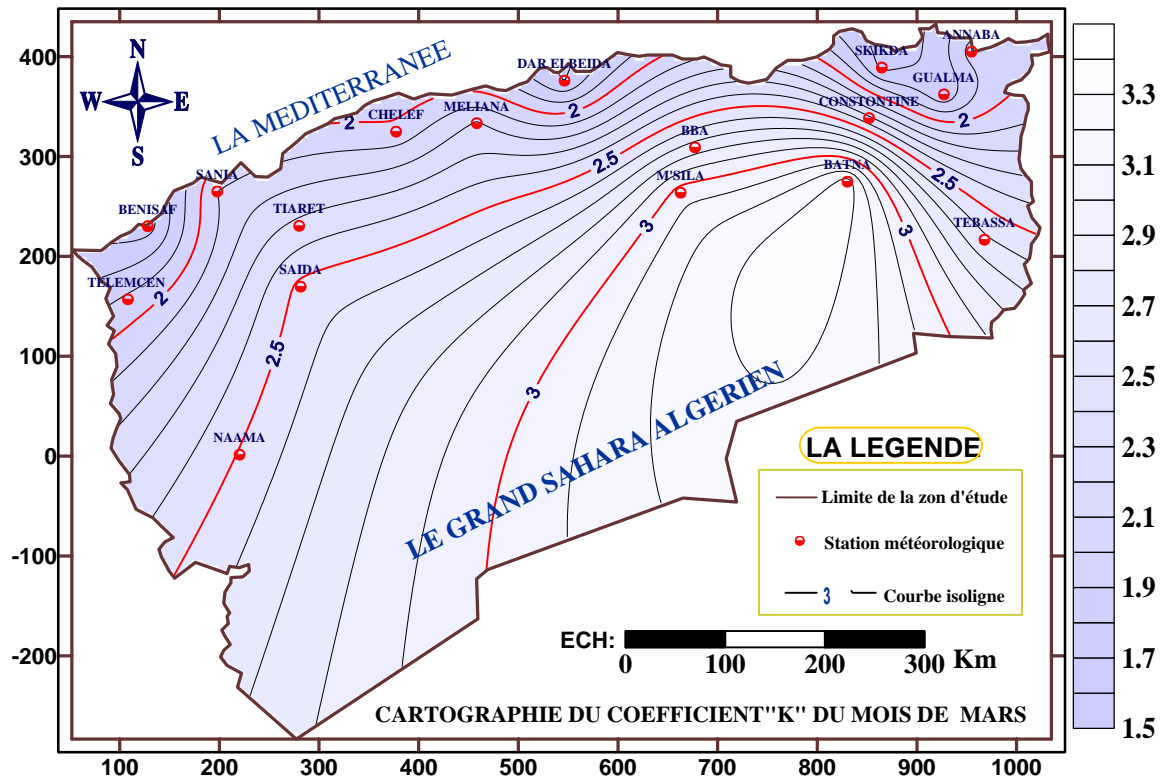
Le fruit de cette cartographie réside dans la production de 12 cartes mensuelles visualisées comme suit:



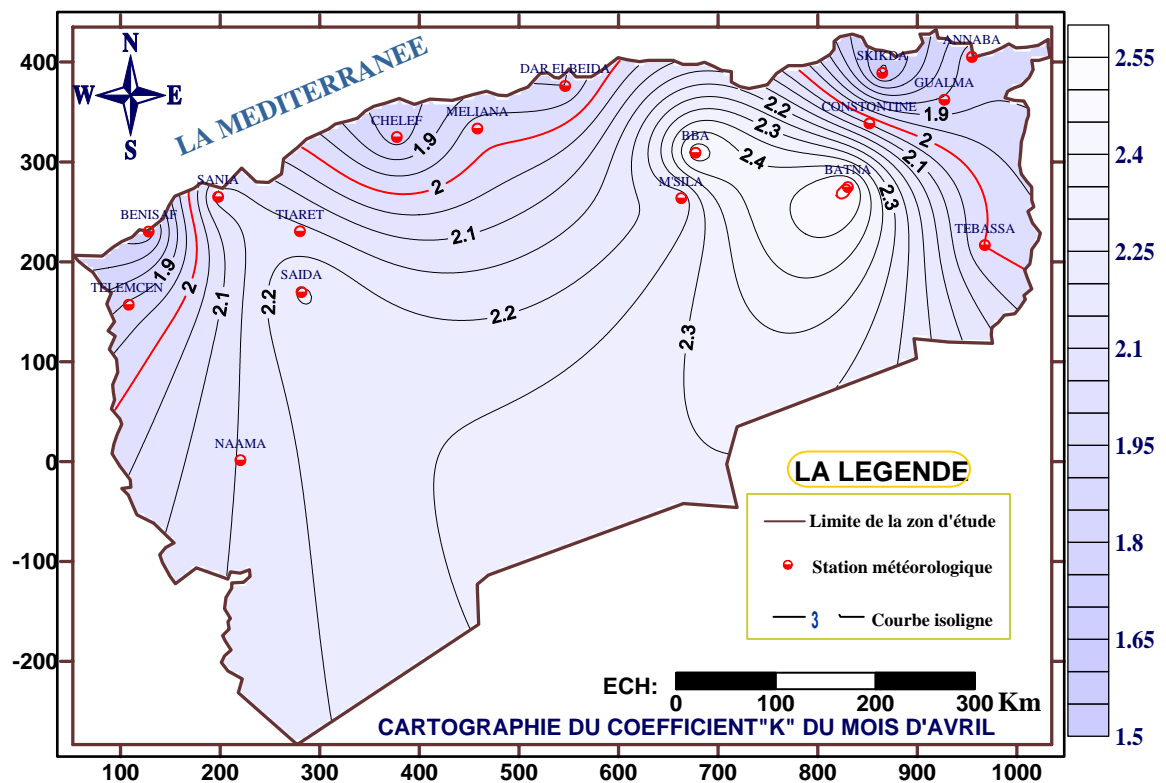
Carte 27: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de janvier



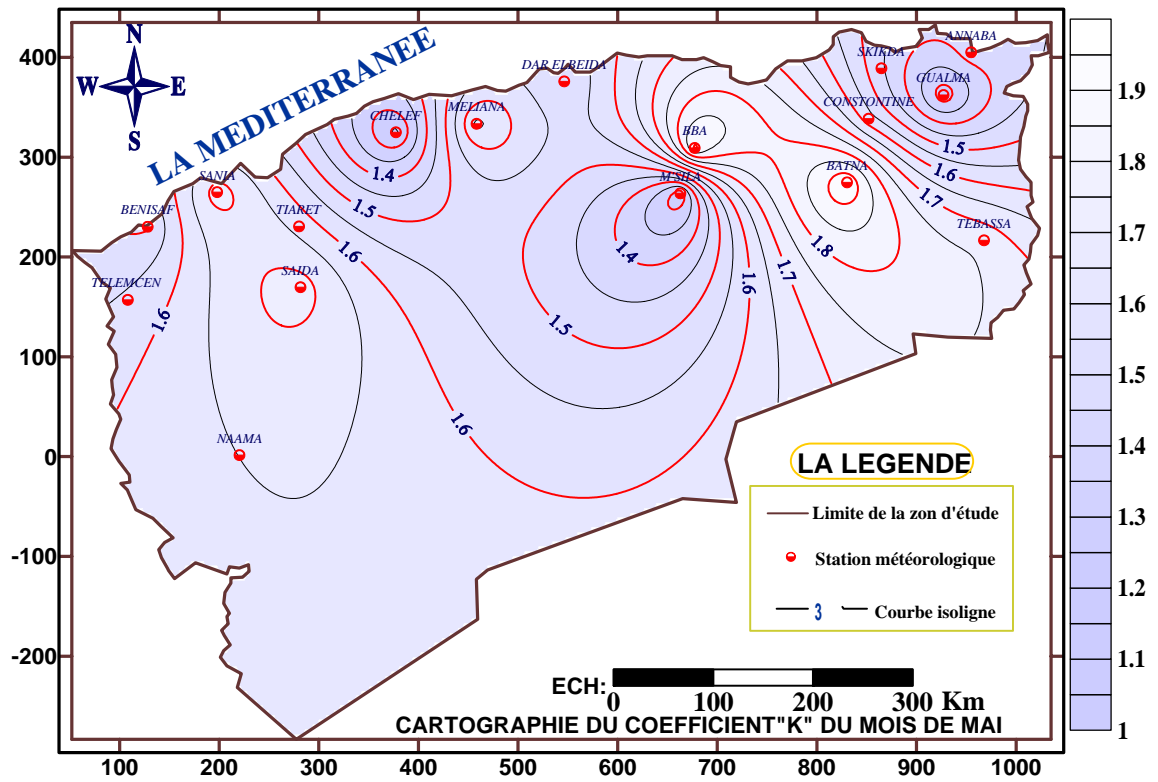
Carte 28: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Février



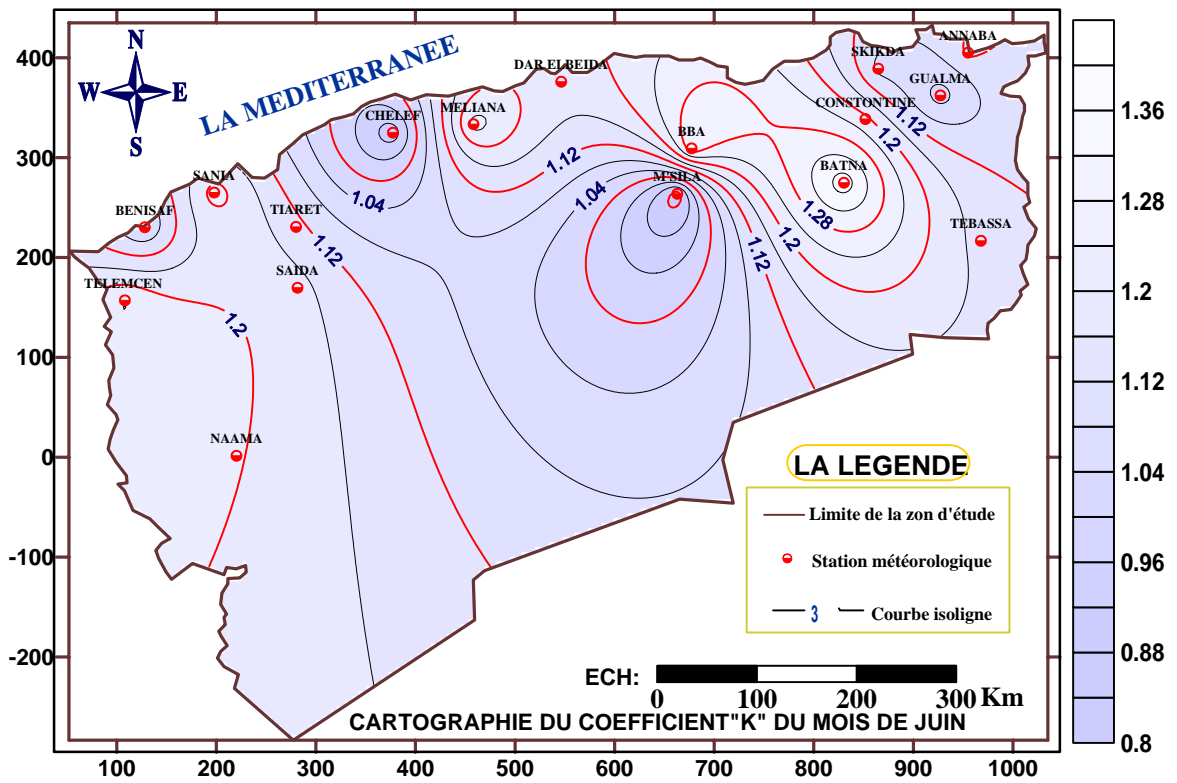
Carte 29: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Mars



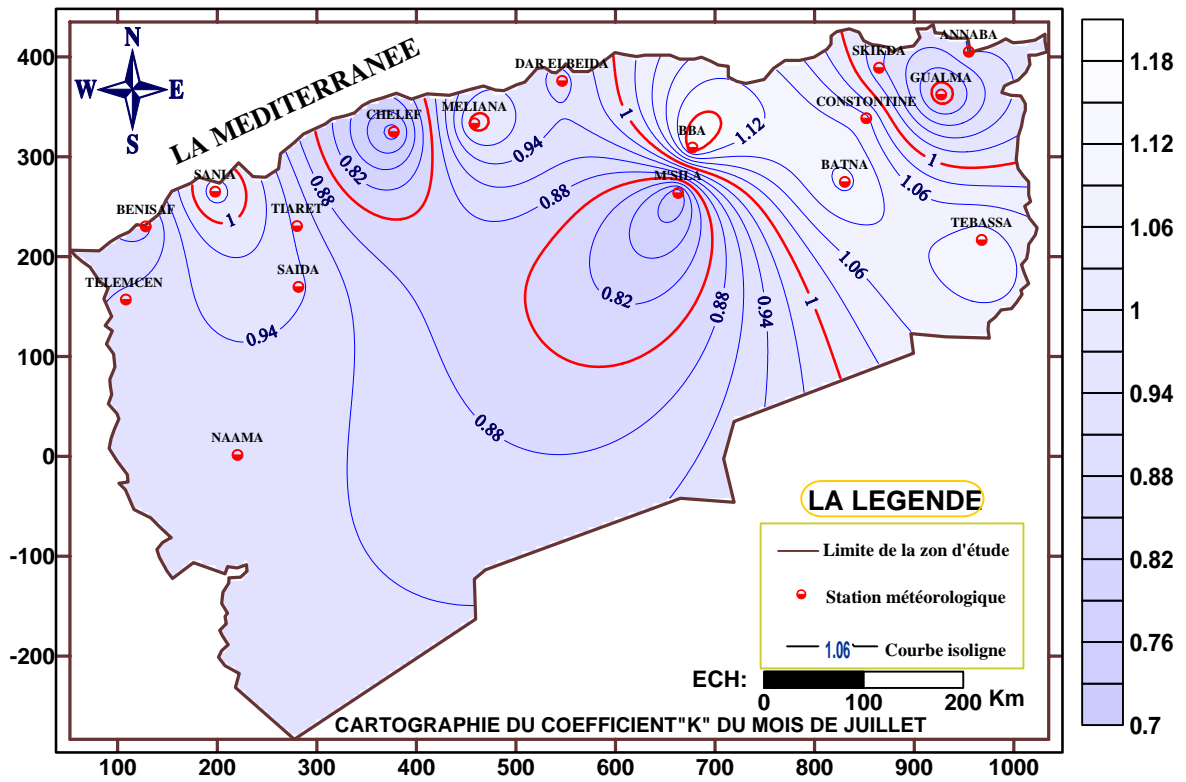
Carte 30: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois d'Avril



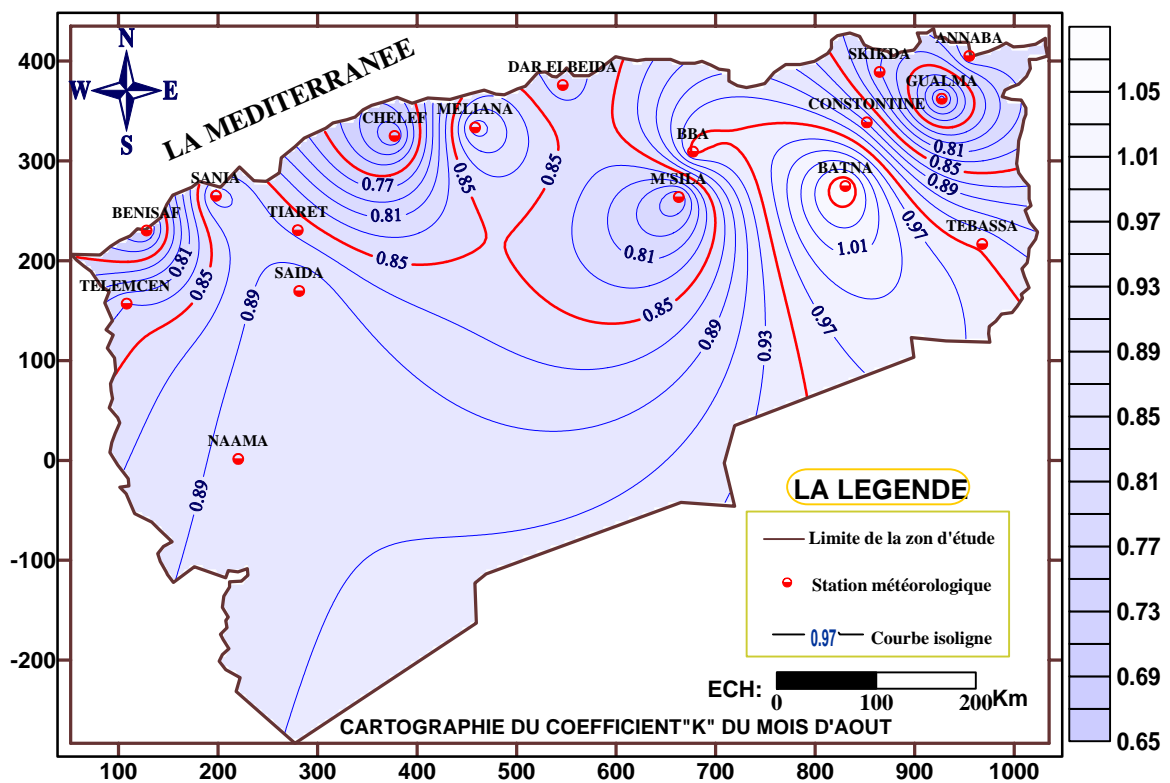
Carte 31: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Mai



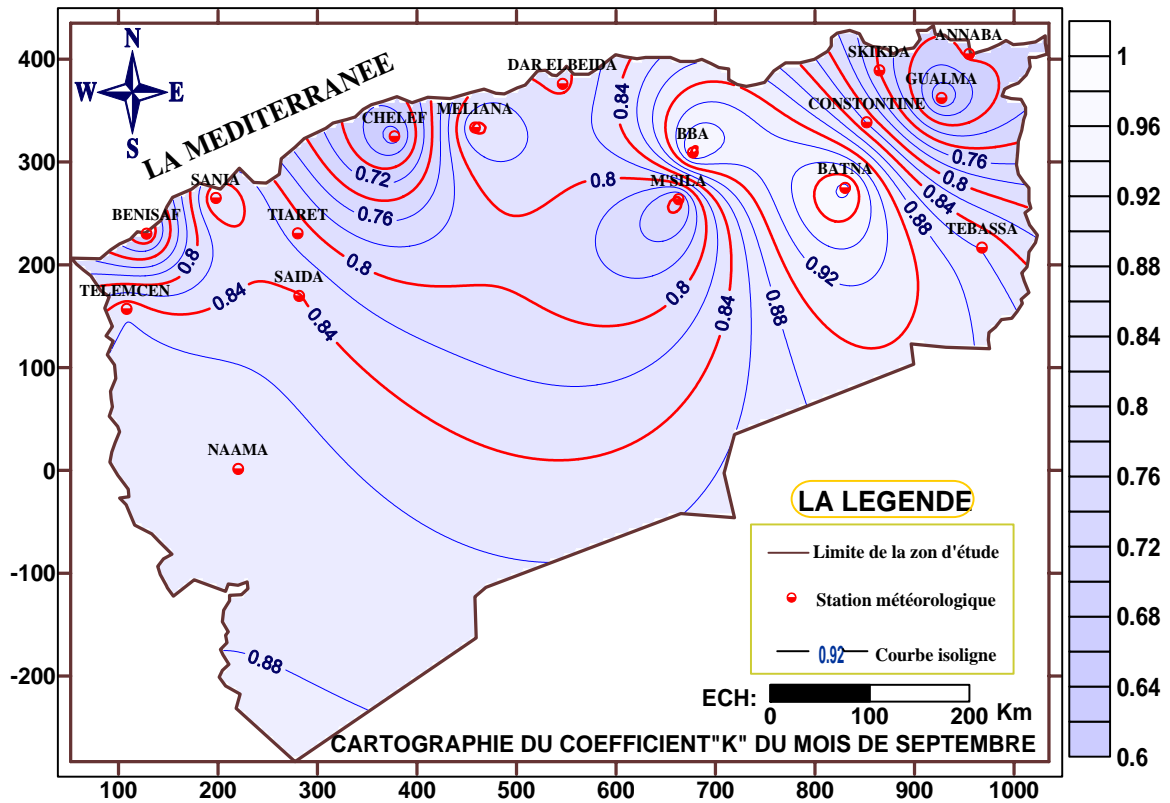
Carte 32: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Juin



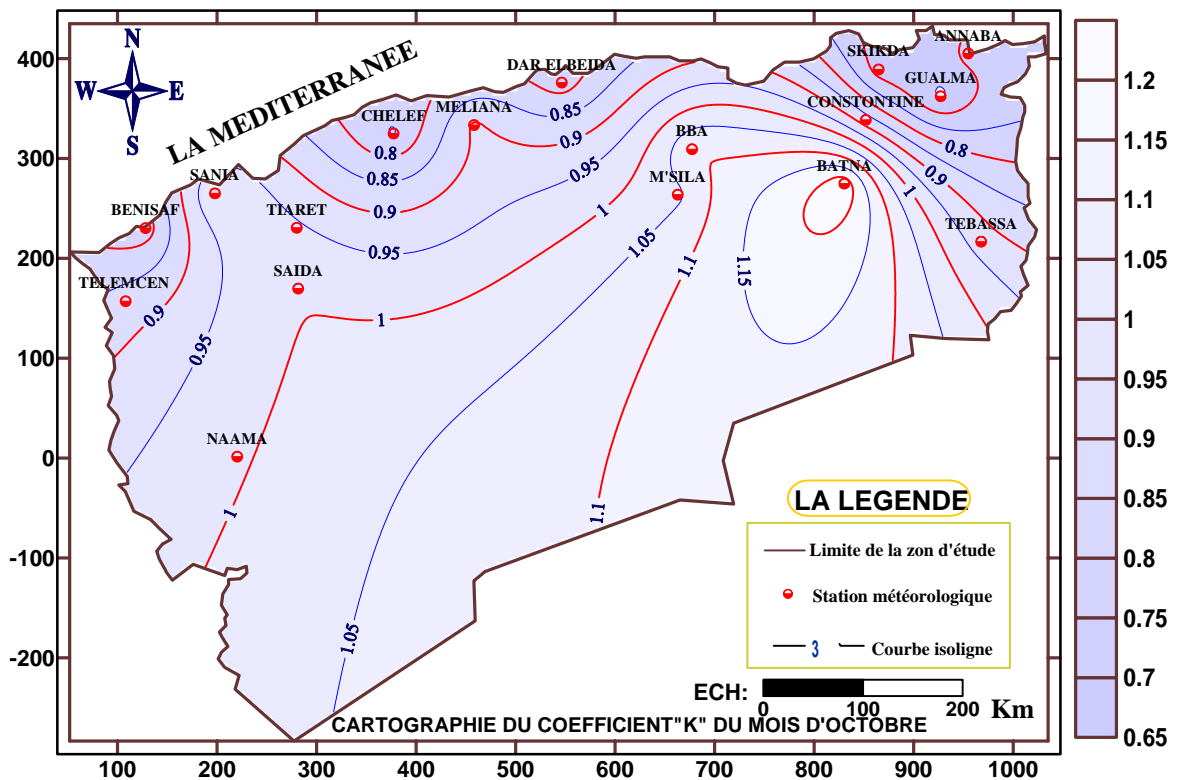
Carte 33: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Juillet



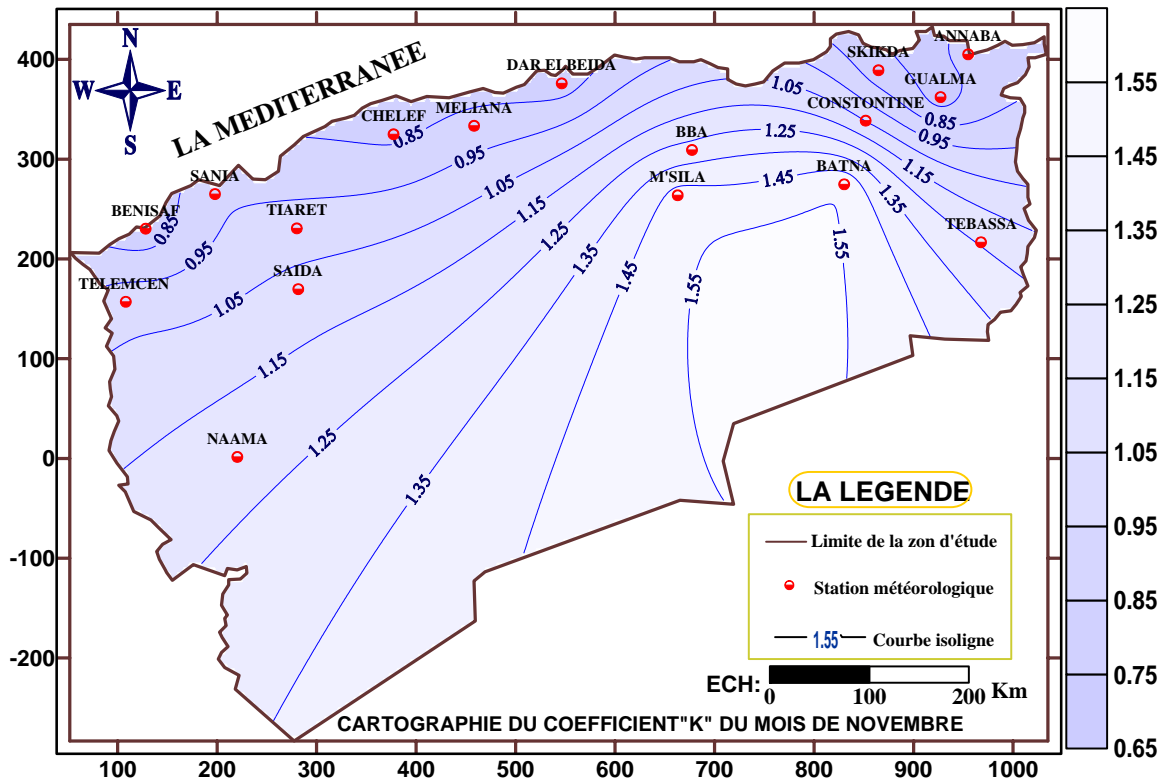
Carte 34: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois d'Aout



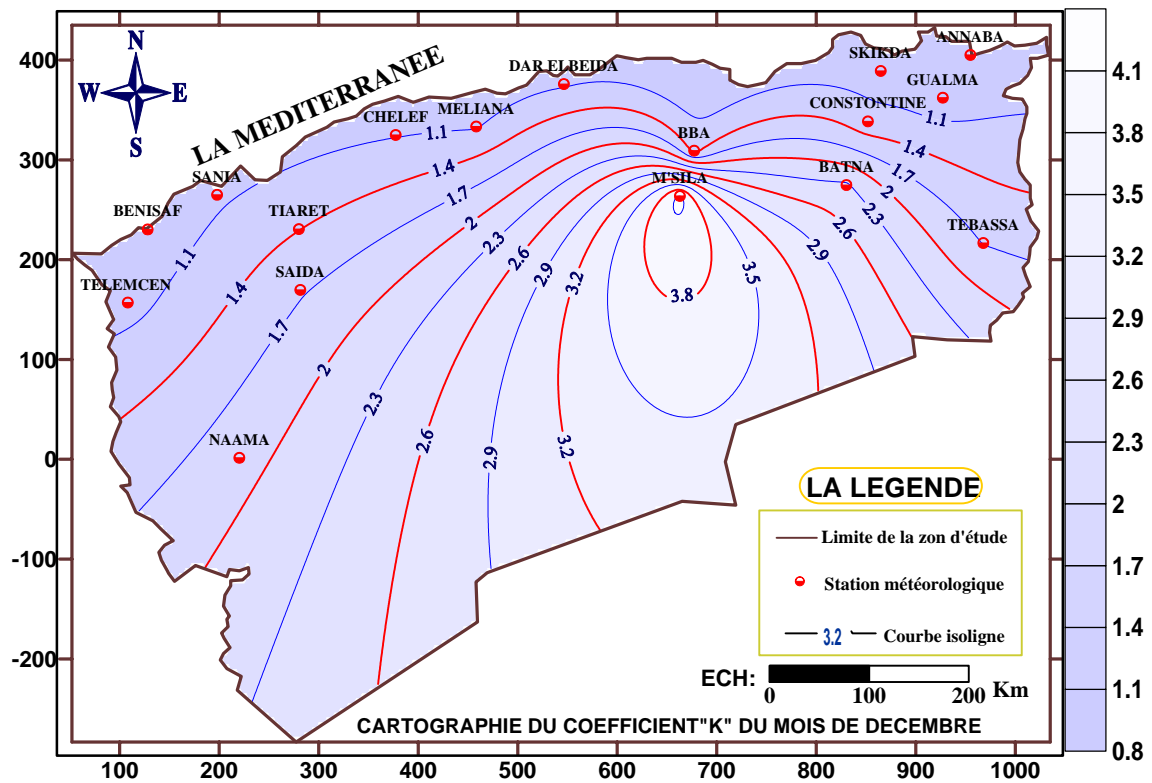
Carte 35: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois De Septembre



Carte 36: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois d'Octobre



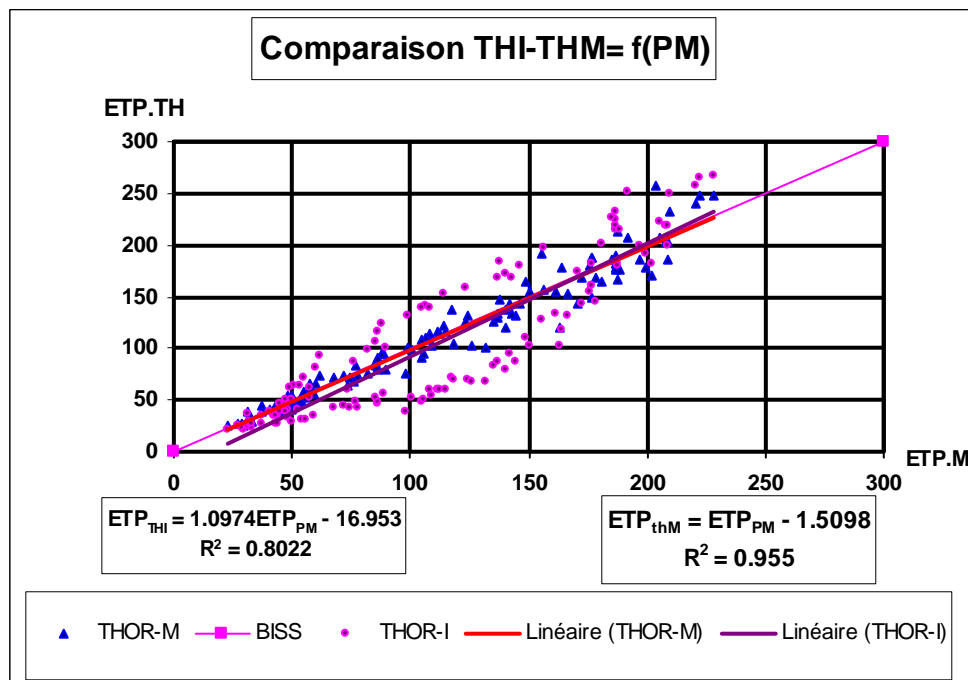
Carte 37: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Novembre



Carte 38: Carte représentative de la répartition du coefficient K du mois de Décembre

### IV.5.3. Interprétation des résultats

Pour montrer que nous avons une amélioration des valeurs de l'ETP après le calibrage on doit faire recours aux courbes de tendance, qui sont l'outil universel de comparaison ; la figure ci-dessous explique la correspondance très étroite entre les valeurs trouvées par la formule de THORTHWAITE après les corrections apportées lors du calibrage et celles trouvées par la formule de PENMAN-MONTEITH.



**Figure 19: La droite de corrélation entre la formule de PM et THOR cas de la station Dar El-Beida, Alger.**

La figure ci-dessus montre sans doute que le calibrage apporte une très bonne amélioration à la qualité des résultats obtenus (Une corrélation de 97.72% à été enregistrée lors de calibrage pour la station Dar El-Beida Alger par contre ne représente que 89.65% avant de calibrage), ainsi que la disposition par rapport à la première bissectrice qui apparaît nettement très commode après calibrage. Ce qui nous mène à dire c'est que le calibrage de la relation de THORNTHWAITE est vraiment justifié et bénéfique.

### IV.6. Analyse et interprétation globales

Pour se rassurer de la rigueur de la comparaison des méthodes utilisées (formules d'usage courant), des approches quantitatives sont à appliquer pour l'évaluation de la performance des ces modèles. Un étendu d'analyse a été effectué moyennant différents indices statistiques pour estimer les valeurs numériques.

Pour les régressions linéaires qui se basent sur les moindres carrés, l'interception (b) et la pente (a) sont calculés et reportés sur des tableaux de comparaison pour les diverses méthodes utilisées, ce qui permet la mesure de la corrélation à travers le coefficient de corrélation (R) ou le coefficient de détermination ( $R^2$ ) (Willmott, 1981, 1982).

L'efficacité (EF) est calculée sur la base de la relation entre les valeurs observées et simulées.

Fox (1981) recommande d'utiliser aussi l'erreur sur la moyenne biaisée (MBE) ainsi que la racine carré de la moyenne des erreurs carrées (RMSE), ces deux indices sont les meilleurs indicateurs de la performances des modèles parce qu'ils reflètent la moyenne des écarts entre l'observé et le prédit.

La démarche ainsi décrite sera réalisée, en restriction des 17 stations, pour une station représentative de chaque type de climat, soient la station de Batna pour la zone semi aride; la station de Dar el Beidha pour la zone humide

Les relations des indices retenus sont écrit comme suit:

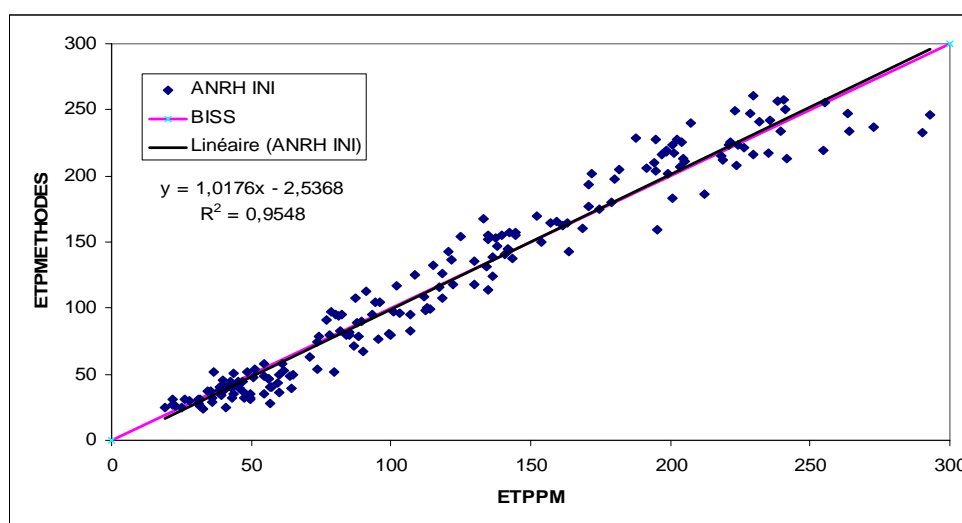
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (ETP_{sim_i} - ETP_{PM_i})}{N}$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (ETP_{sim_i} - ETP_{PM_i})^2}{N} \right]^{0.5}$$

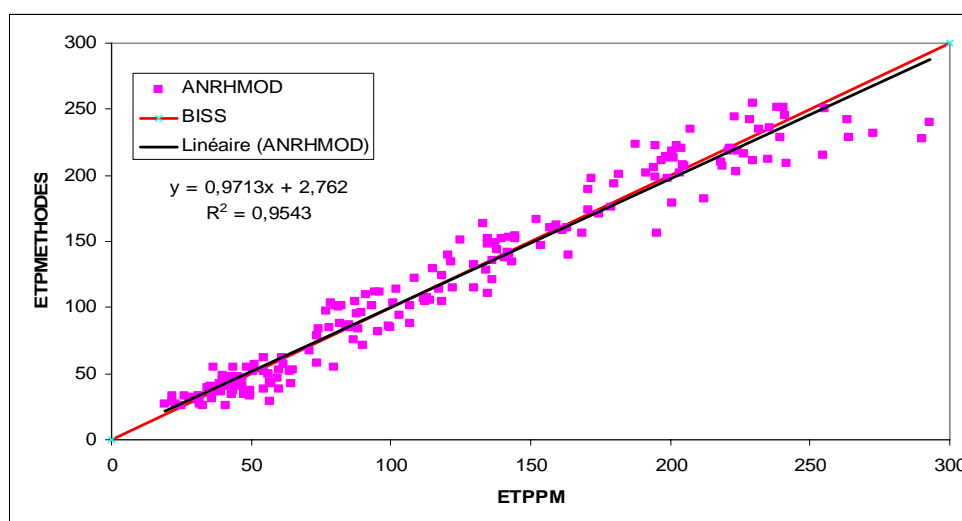
$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (ETP_{sim_i} - ETP_{PM_i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{ETP_{PM_i}} - ETP_{PM_i})^2}; 0 \leq EF \leq 1$$

**Tableau 26: Récapitulation des performances des méthodes d'estimation de l'ETP envers celle de PM pour la station de Batna**

Méthodes	ANRHini	ANRHmod	BC.ajust	Hargr. ajust	Thorn. ajust
<b>Indicateurs</b>					
<b>MBE (mm/mois)</b>	<b>-0,393</b>	<b>-0,730</b>	<b>0,498</b>	<b>0.289</b>	<b>-0.831</b>
<b>RMSE (mm/mois)</b>	<b>15,877</b>	<b>15,340</b>	<b>14,381</b>	<b>13.42</b>	<b>10.945</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,955</b>	<b>0,954</b>	<b>0,960</b>	<b>0.967</b>	<b>0.975</b>
<b>R</b>	<b>0,977</b>	<b>0,977</b>	<b>0,980</b>	<b>0.983</b>	<b>0.987</b>
<b>a</b>	<b>1,018</b>	<b>0,971</b>	<b>0,958</b>	<b>0.963</b>	<b>1.006</b>
<b>b</b>	<b>-2,540</b>	<b>2,762</b>	<b>5,647</b>	<b>4.88</b>	<b>-1.48</b>



**Figure 20: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna- ANRH INI-**



**Figure 21: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna- ANRH MOD-**

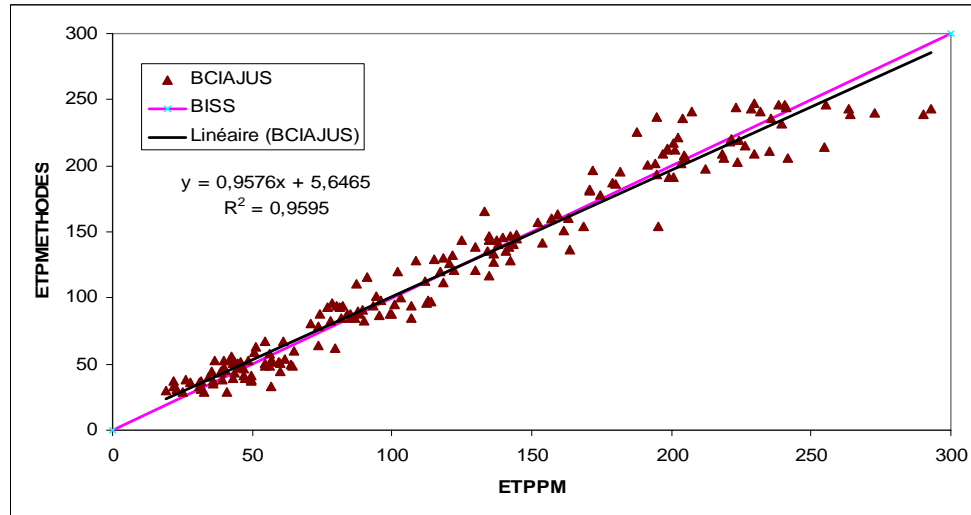


Figure22: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna- BCAJUS-

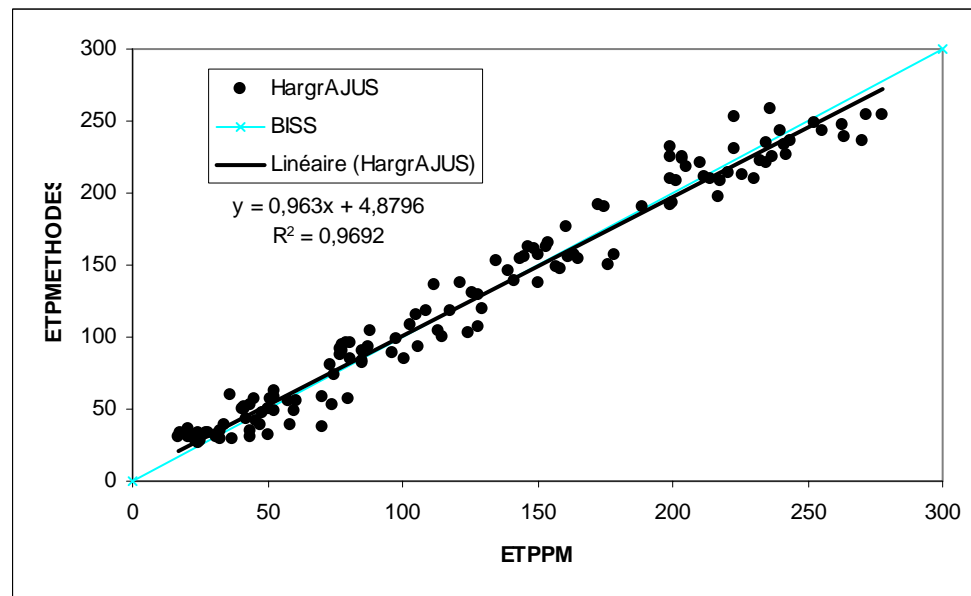
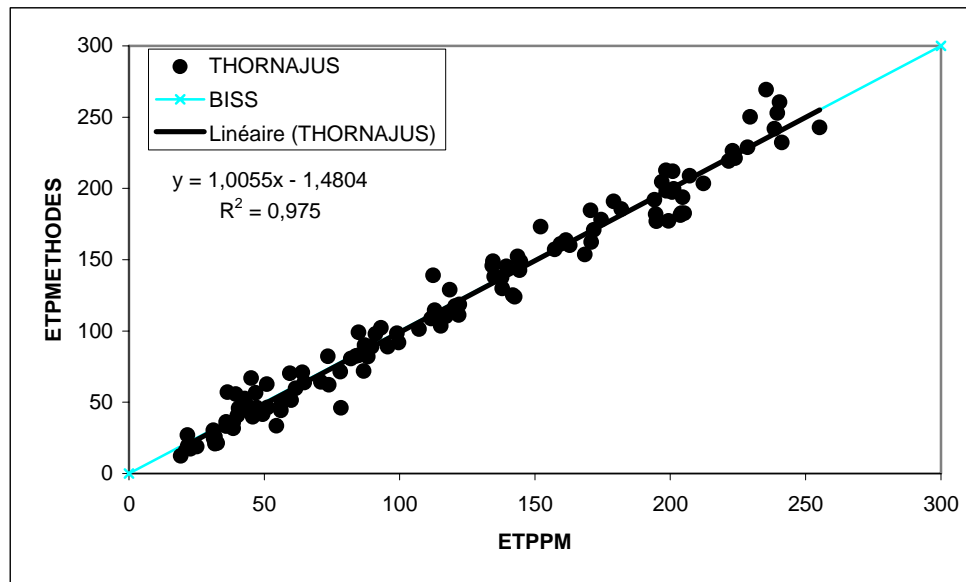


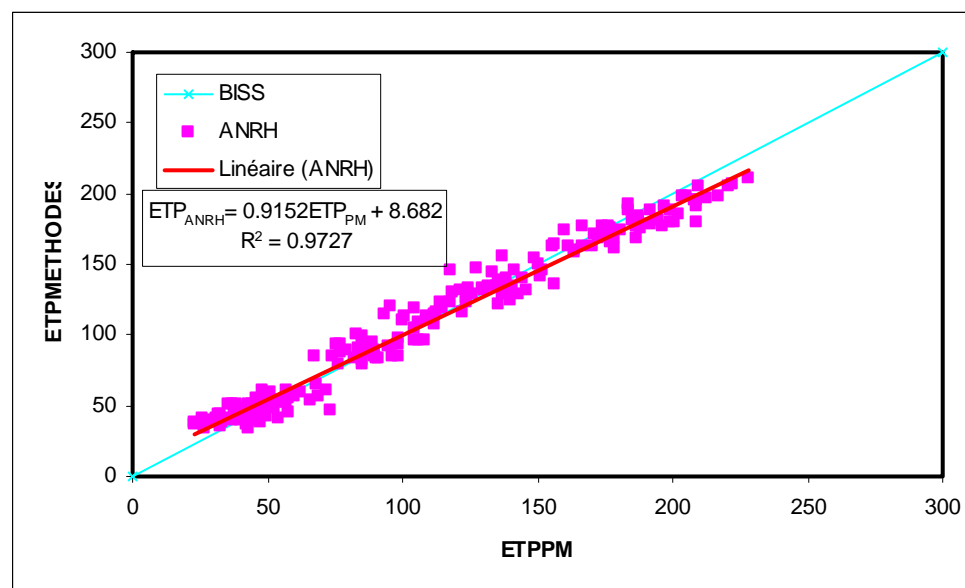
Figure23: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna- Hargreaves AJUS-



*Figure24: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Batna -Thornthaite AJUS-*

**Tableau27: Récapitulation des performances des méthodes d'estimation de l'ETP envers celle de PM pour la station de Dar el Beida**

Méthodes	ANRHini	ANRHmod	BC.ajust	Thorn. ajust
<b>Indicateurs</b>				
<b>MBE (mm/mois)</b>	<b>-0,626</b>	<b>0,491</b>	<b>-6E-05</b>	<b>-1.522</b>
<b>RMSE (mm/mois)</b>	<b>10,088</b>	<b>9,671</b>	<b>8,092</b>	<b>12.963</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,973</b>	<b>0,972</b>	<b>0,98</b>	<b>0.955</b>
<b>R</b>	<b>0,986</b>	<b>0,986</b>	<b>0,99</b>	<b>0.977</b>
<b>a</b>	<b>0,915</b>	<b>0,956</b>	<b>0,98</b>	<b>1.0</b>
<b>b</b>	<b>8,682</b>	<b>5,375</b>	<b>2,118</b>	<b>1.51</b>



**Figure25: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Dar el Beida - ANRH INI-**

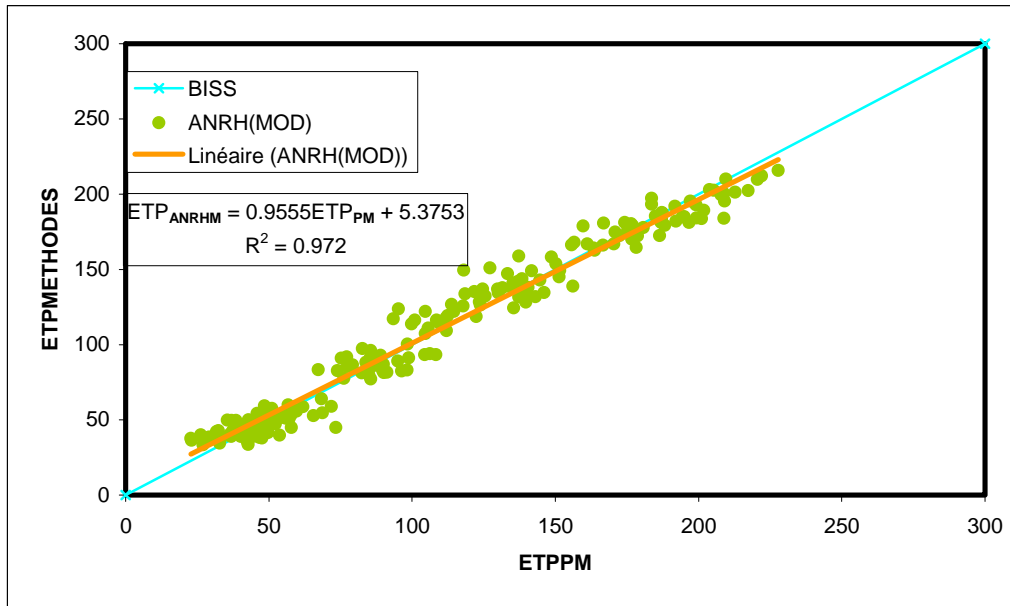


Figure 26: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Dar el Beida - ANRH MOD-

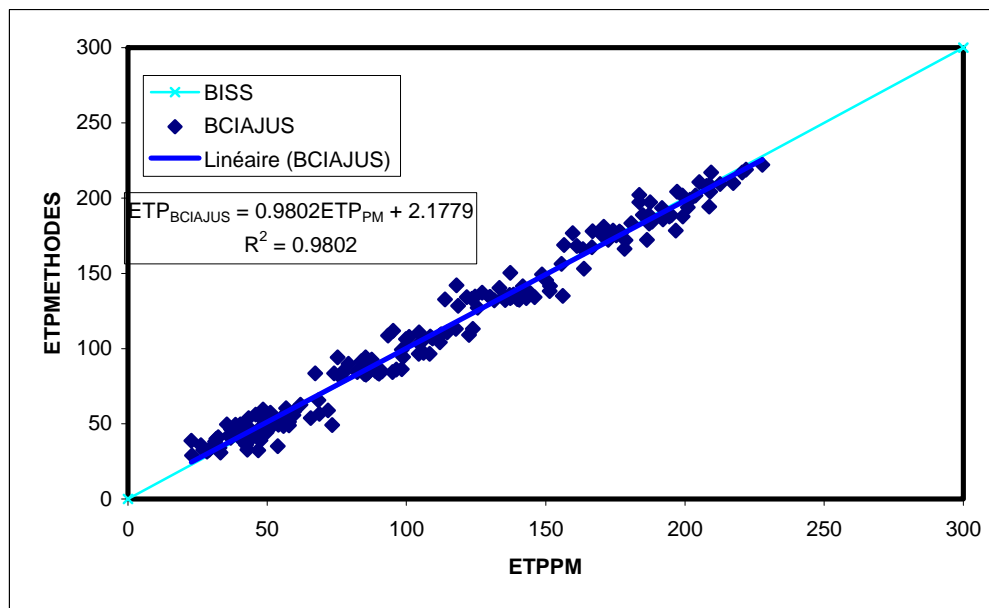
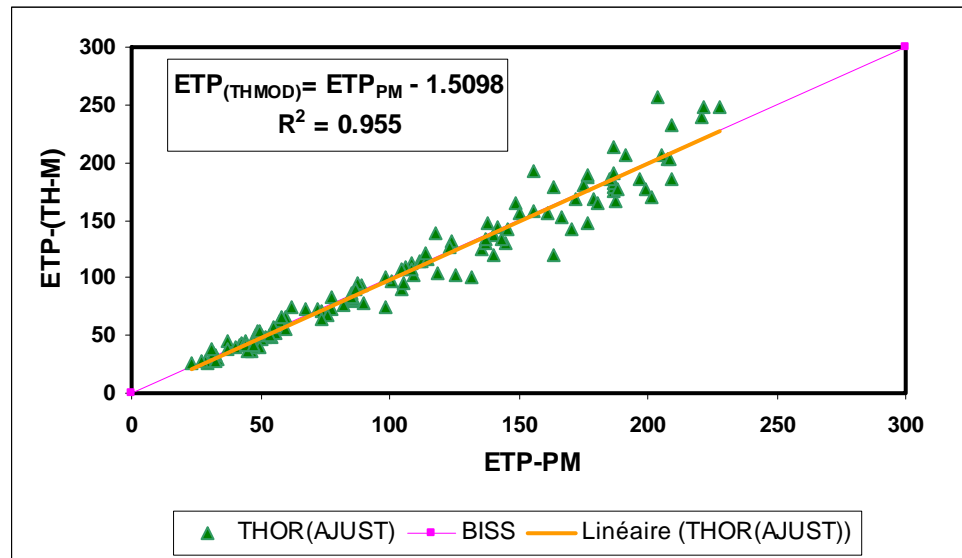


Figure27: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Dar el Beida - BCAJUS-



**Figure28: Comparaison des ETP évaluées par diverses méthodes comparées à celles de PM, pour la station de Dar el Beida -Thornthwaite AJUS-**

### Conclusion

Au cours de ce chapitre et à travers la procédure de concrétisation des résultats sous forme de carte à usage simple; nous pouvons considérer que la démarche est vraiment satisfaisante et que le travail réalisé offre un outil d'aide au choix des diverses formulations pour l'évaluation des ETP lorsque l'handicap des données complètes se présente.

L'utilité des relations empiriques d'usage courant qu'on a utilisé est de même ordre de grandeur jugée vis-à-vis la relation référentielle de PM.

Quoiqu'il nous semble frappant l'amélioration des valeurs de Thornthwaite ajustée pour la zone semi aride représentée par la station de Batna ainsi que la formulation de Blaney Criddle ajustée pour la zone humide représentée par la station de Dar el Beida, sans diminuer de l'intérêt de l'application des autres relations qui sont à leur tour calées par rapport à la référence.

Pour l'introduction de l'aspect empirique en fonction des valeurs des températures, min et max, le travail nécessite d'accomplir la tâche en se basant sur toutes les données qui doivent être disponible au niveaux des 16 stations autre que la station de Batna dont on a fait l'exemple type à travers la relation de Hargreaves et la notion de température effective.

## CONCLUSION GENERALE

La notion de l'évapotranspiration est très importante dans le domaine de l'agronomie et de la construction hydrotechnique, la certitude dans son évaluation a un impact évident dans le bilan hydrique et notamment dans la modélisation conceptuelle qui aboutit aux évaluations des ressources. Cependant la certitude de l'ETP nécessite la mesure de plusieurs paramètres en relations étroites avec sa valeur à l'échelle journalière et mensuelle, ce qui n'est pas le cas pour plusieurs stations de mesure où la température demeure l'unique paramètre à maîtriser. La collecte des données au niveau des stations climatologiques du nord de l'Algérie qui a encouragée d'aller plus loin dans l'idée de calibrage temporel à l'échelle mensuelle et spatial de quelques relations connues par le passé et à usage courant en vue de leur adaptation aux conditions climatiques de la zone d'étude. La présente étude a pris en charge le calage des paramètres formant diverses formulations et a fourni en conséquence une cartographie à usage facile et pratique de l'ETP en tous points de la zone en question dépourvue de moyens de mesure.

Dans le présent travail, nous avons fait recours à ces formules d'usage courant pour estimer l'évapotranspiration potentielle pour le cas du nord de l'Algérie, à savoir : Penman-Monteith, Thornthwaite, Blaney-Criddle, dite ANRH et Hargreaves.

L'objectif final est d'avoir une cartographie représentative de certains coefficients d'usage courant pour l'estimation de l'évapotranspiration pour la zone d'étude citée avec des coefficients correctifs correspondants pour chaque secteur et chaque formule et d'en tirer en finalité des conclusions constructives et de perspectives pour les études ultérieures.

Dans le premier chapitre, le lecteur se retrouve devant un étendu large en terme de bibliographie et limitations des notions à leur usage particulier concernant bien entendu, la notion de l'évapotranspiration potentielle "ETP".

Dans le second chapitre la zone d'étude a été amplement caractérisée sans trop de détails, il s'agit du Nord Algérien objet d'études de plusieurs aspects de recherche préalables par divers chercheurs et bureaux d'études.

Quant à la troisième section, le point est mis sur la sélection et la définition des composantes de quelques formulations d'usage courant pour l'évaluation de l'ETP à savoir la relation référentielle de Penman-Monteith, Thornthwaite, Blaney-Criddle

et la relation dite ANRH. L'introduction de la notion de température extrême a été concrétisée par la relation de Hargreaves. Cette notion a été introduite également dans la relation de Blaney-Criddle. Le manque d'information sur les températures extrêmes nous a poussé à cerner nos applications à une seule station et nous souhaiterons compléter le travail dans l'avenir.

Enfin, le quatrième chapitre a été complètement consacré à la technique de cartographie moyennant le code Surfer, c'est à travers l'interpolation par Krigeage que le fruit du chapitre trois a été clairement présenté sous forme de 38 cartes d'usage simple et à utilité évidente pour surmonter les handicaps exigés par l'absence de l'information complète et précise des composantes de l'ETP. L'utilisation d'un outil SIG et très recommandé pour raffiner le maillage de l'étendu de l'étude dans la cible est d'avoir un outil à support numérique et en papier à la portée des chercheurs et étudiants.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Pereira A. R., Pruitt W.O. (2004).** Adaptation of the thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration Agricultural water management *art.66(2004)251-257.*
- Cemagref (1991).** Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations. *Edit : Ministère de l'agriculture.. France, 441p.*
- ANRH. (2002).** Notice explicative de la carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie. *Edit : Agence nationale des ressources hydrauliques. Alger, 42 p.*
- Arlery R. (1973).** Climatologie méthode et pratique. *Edit : Louis Jean .Paris, 432 p.*
- Bouchet P. (1964).** Evaporation réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. *Edit : I.N.R.A .Paris, 165 p.*
- ENAC/ISTE/HYDRAM Cours (2009).** Hydrologie Générale / Thématique : Évaporation - École polytechnique fédérale de lausanne.
- Calvet R. (1988).** Etude sur les transfères d'eau dans le système sol-plante-atmosphère. *Edit: INRA. Paris, 362P.*
- C.T.G.R.E.F.** Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations. *Edit : Ministère de l'agriculture. CTGREff. France, 204p.*
- Docroc M. (1987).** Les bases d'irrigation. *Edit : Presse scientifique universitaire. Paris, 90 p.*
- Doorenbos J. Kassam A. (1987).** Réponse des rendements à l'eau. *Edit : F.A.O Rome*
- Doorenbos J. et Pruitt.W.O. (1975).** Les besoins en eau des cultures. *Edit : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, 196 p.*
- Fox, D.G. (1981).** Judging air quality model performance: A summary of the AMS Workshop on Dispersion Model Performance. *Bull. Am. Meteorol.Soc. 62, 599-609.*
- Ghachi A. (1982).** Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie. *Edit : Office des publications universitaires. Alger, 330 p.*
- Guide des pratiques hydrologiques.OMM. (2004).** (WMO-168°) CH9.1 p.135-137.
- Guide des pratiques hydrologiques.OMM. (2004).** « Chapitre 38.page 543, édition WMO-N 168 »)
- Halimi A. (1980).** L'Atlas Blidéen, Climat et étages végétaux. *Edit : Office des publications universitaire. Alger, 523 p.*
- ITF de Batna (1987).** Hydrologie- calcul de l'évapotranspiration par la méthode de Blanney-Cridle .*Edit: institut de technologie forestière. Batna*

**Ladlani I.** (2007). Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba». Mémoire de Magister Dép. Hydraulique, Univ. Batna, 83 p.

**OMM.** (1966). Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration. Note technique N° 83, OMM-N° 201, Genève, p. 102-115.

**Remenieras G.** l'hydrologie de l'ingénieur. *Edit : Collection de la direction des études et recherche d'électricité. France*, 266 p.

**P. Gavilan, I.J. Lorite, S. Tornero, J. Berengena (2006).** Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment (IFAPA, Area de Produccion Ecologicay Recursos Naturales, Centro de Investigaciony Formacion Agraria "Alameda del Obispo", Avd. Mene´ndez Pidal s/n, 14004 Co´rdoba, Spain) (agricultural water management 81 "2006) 257–281")

**Seyed h. A., Hamid R. F. (2007).** Penman-Monteith (daily (24-hour) Reference evapotranspiration Equations for Estimating ETo, ETr and HS ETo with Daily Data Spatially distributed monthly reference evapotranspiration of thornthwaite equation, a case study, south of Iran (Art.published by Seyed hamid Ahmadi.Hamid Réza Foldamond accepted 16 may 2007 under: Irrig Sci/2008 DOI/10.1007/s 00271-0007-0094-8)

Site internet: [www.hydrologie.org](http://www.hydrologie.org)

Site internet : [www.Cemagref.fr](http://www.Cemagref.fr)

**Willmott, C.J. (1981).** On the validation of models. *Phys. Geogr.*, 2, 184-194.

**Willmott, C.J. (1982).** Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol.Soc.* 63, 1309-1313.