

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES 1999

Présenté par :

ABOU Abass

## Variabilité de l'évapotranspiration potentielle en Afrique de l'Ouest

E. I. E. R.

Enregistré à l'Arrivée

le \_\_\_\_\_ s/N°

363/99

MENTION :

Encadrement  
J. DJOUKAM  
E. PATUREL

## PREAMBULE

L'école Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Équipement Rural (EIER) de Ouagadougou est une institution qui regroupe quatorze États de l'Afrique de l'ouest et du centre. Elle comprend deux cycles de formation

- la formation initiale d'Ingénieurs en Équipement Rural dont les domaines de compétence sont la mise en valeur des ressources hydrauliques, les aménagements hydro-agricoles, l'alimentation en eau potable, l'assainissement, le bâtiment, la voirie et les infrastructures agro-alimentaires.

- les formations Post-universitaires de spécialisation : Génie Sanitaire, Informatique Appliquée aux Sciences de l'Eau, Mobilisation des Ressources en Eau, Hydraulique Agricole, Génie énergétique et Froid Industrielle.

- l'école organise des sessions de formation continue et réalise des activités de recherche et d'ingénierie.

La formation initiale, dure trois ans et se termine par un mémoire de fin d'étude qui vise à familiariser l'élève à l'exercice de la profession d'ingénieur en mettant l'accent sur le travail personnel. C'est dans ce cadre que ce thème intitulé ***Variabilité de l'évapotranspiration potentielle en Afrique de l'Ouest*** à été proposé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD ex ORSTOM).

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

- ◇ *mon père NGATDE Abasse et ma mère SALLA Abdoulaye, qui n'ont ménagé aucun effort pour m'apprendre à travailler dans un esprit de volonté et de courage.*
- ◇ *mon grand frère NGATDE Abdoulaye Abasse qui m'a soutenu et orienté de tout temps dans mes études.*
- ◇ *toute la colonie mauritanienne de l'ETER, en particulier à mon ami Kalidou Moustapha Sall.*
- ◇ *mes frères, mes soeurs et mes amis pour leur soutien moral et leur dévouement qu'ils m'ont témoignés.*

*Abou ABASSE*

# **Remerciements**

▣ J'exprime tout d'abord mes plus vifs remerciements à Mr J. DIOUKAM et Mr J.E. PATUREL, directeurs de mémoire, pour leurs sympathies, leurs orientations pertinentes et la correction du rapport.

▣ J'exprime toute ma reconnaissance à Mr M. OUEDRAOGO pour son soutien très précieux pendant la réalisation du mémoire.

▣ Je tiens à remercier tous les collègues de la promotion pour leur accueil et leur amitié.

▣ Je tiens à remercier chaleureusement les documentalistes du CDI et de la direction nationale de la météorologie du Burkina Faso pour leurs disponibilités.

▣ Enfin à tout ceux qui de près ou de loin m'ont porté main forte pour réaliser ce mémoire de fin d'étude.

***Ma profonde gratitude***

# SOMMAIRE

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS .....	1
RESUME.....	3
INTRODUCTION.....	5
1. Problématique .....	5
2. Objectif.....	5
3. Zone d'étude.....	5
4. Sources des données .....	6
5. Intérêt pratique de la connaissance de l'ETP.....	6
CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DE L'ETP .....	8
I.1 Méthode Penman .....	9
I.1.1 Terme radiatif $R_n$ .....	10
I.1.2 Terme advectif $E_a$ .....	14
I.1.3 Coefficient pondérateurs $\alpha$ , $\beta$ et $c$ .....	14
I.2 Formule de Turc .....	15
I.2.1 Influence de l'humidité relative .....	16
I.2.2 Détermination de la radiation solaire globale .....	16
CHAPITRE II. BASES DE CALCUL .....	17
II.1 Les coefficients intervenant dans le calcul de l'ETP Penman .....	17
II.1.1 L'albédo .....	17
II.1.2 Les coefficients d'Angström .....	17
II.1.3 Le coefficient C .....	18
II.1.4 Méthodes d'estimation des paramètres .....	18
II.1.4.1 Températures moyennes, humidité relative moyenne .....	19
II.1.4.2 Vitesse du vent .....	19
II.1.4.3 Evaluation des données manquantes.....	19
II.2 Sensibilité des paramètres.....	19
CHAPITRE III. VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DE L'ETP... ..	21
III.1 Aperçu de l'environnement géographique et climatique de l'Afrique de l'Ouest .....	21
III.2 Variation des facteurs climatiques.....	22
III.2.1 Rayonnement solaire .....	22
III.2.2 Température de l'air .....	24
III.2.3 Humidité de l'air.....	25
III.2.4 Vitesse du vent .....	26

III.3 Variation temporelle de l'ETP .....	27
III.3.1 Variations interannuelles .....	27
III.3.2 Variation décadaire.....	28
III.3.2.1 Résultats et exploitations .....	29
III.3.3 Conclusion .....	30
III.4 Variation spatiale de l'ETP .....	31
III.4.1 Méthode de cartographie .....	31
III.4.2 Analyse et exploitation des résultats .....	32
III.4.3 Avertissements à l'utilisation des cartes .....	33
III.4.4 Conclusion .....	33
<b>CHAPITRE IV. ANALYSE DE LA SERIE CHRONOLOGIQUE DE L'ETP .....</b>	<b>35</b>
IV.1 Présentation du Logiciel KhronoStat .....	36
IV.2 Méthodes d'analyse des séries chronologiques .....	37
IV.2.1 Test de normalité.....	37
IV.2.2 Test de vérification du caractère aléatoire d'une série chronologique .....	37
IV.2.3 Tests de détection de rupture au sein d'une série chronologique .....	37
IV.3 Résultats des tests .....	38
IV.3.1 Séries longues de Ouagadougou et Bobo-dioulasso .....	38
IV.3.2 Synthèse de résultats des différentes stations(1971-1990) .....	39
IV.3.3 Validation des résultats obtenus sur les séries courtes .....	42
IV.4 Conclusion .....	42
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>43</b>
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE : .....</b>	<b>44</b>

## **ANNEXES**

**Annexe 1 : Variation saisonnière**

**Annexe 2 : Techniques de tests statistiques**

**Annexe 3 : coefficients d'Angström**

**Annexe 4 : Résultats des tests statistiques(Ouagadougou et Bobo-dioulasso)**

**Annexe 5 : Cartes mensuelles d'évapotranspiration potentielle**

## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

<i>a</i>	Albédo
<i>A,B</i>	Coefficients d'Angström
<i>ALT</i>	Altitude (m)
<i>C</i>	Facteur de correction
<i>CLA</i>	Chaleur latente de vaporisation (cal/cm <sup>2</sup> )
<i>DE</i>	Déclinaison du soleil (rad)
$\epsilon$	Emissivité du couvert végétal
<i>ea</i>	Tension de vapeur saturante à la température de l'air (mbars)
<i>Ea</i>	Energie advective
<i>ed</i>	Tension de vapeur à la température de l'air (mbars)
<i>EP</i>	Evaporation potentielle
<i>ETM</i>	Evapotranspiration maximale
<i>ETP</i>	Evapotranspiration potentielle (mm/j)
<i>ETR</i>	Evapotranspiration réelle
$\delta$	Variation de tension de vapeur saturante (mbar/°C)
<i>Hd</i>	Humidité relative de l'air (%)
<i>IGA</i>	Rayonnement reçu à la limite de l'atmosphère (extra-terrestre)
<i>INS</i>	Duré réelle d'insolation (heures)
<i>K</i>	Coefficient cultural
<i>k</i>	Coefficient correcteur du vent
<i>LAT</i>	Latitude (rad)
<i>NOJ</i>	Quantième du jour de l'année
<i>Po</i>	Pression atmosphérique au niveau de la mer (millibars)
<i>Pr</i>	Pression atmosphérique à la station (millibars)
<i>Ra</i>	Energie radiative
<i>RFU</i>	Réserve facilement utilisable
<i>Rn</i>	Rayonnement net (mm/jour)
<i>Rs</i>	Rayonnement solaire
<i>Rta</i>	Rayonnement thermique de l'atmosphère
<i>Rts</i>	Rayonnement thermique du sol
$\sigma$	Constante de Stéphan Bolzman

$\tau$	Constante psychrométrique (=0,66)
$T_k$	Température moyenne sous abri (°K)
$T_s$	Température de surface (°C)
$T_{max}$	Température maximale sous abri (°C)
$T_{min}$	Température minimale sous abri (°C)
$T_{mo}$	Température moyenne sous abri (°C)
$VEN$	Vitesse du vent (m/s)
$VEN_{jour}$	Vitesse du vent de la journée
$VEN_{ratio}$	Rapport de la vitesse du vent de la journée par celle de la nuit

ASECNA : Agence de navigation aérienne

F.A.O : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

CIEH : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

CILSS : Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel

## RESUME

---

A l'heure actuelle, que les ressources en eau sont très réduites, il en est fait utilisation intensive dans les pays industrialisés, comme dans les pays en voie de développement. Pour ces derniers, en particulier pour ceux de l'Afrique de l'Ouest, la connaissance et la maîtrise de cette ressource sont aujourd'hui des éléments fondamentaux de leur développement.

L'évapotranspiration potentielle est un terme important du cycle de l'eau. Elle est essentielle dans beaucoup d'applications en Agronomie, en Hydrologie ou pour la modélisation climatique. Différentes méthodes et mesures permettent de l'estimer, mais bon nombre reste applicable à des zones climatiques bien précises.

Cette étude, proposée par l'IRD ( Institut de Recherche pour le Développement) se propose d'étudier la variabilité spatio-temporelle de ce paramètre.

L'étude porte sur l'Afrique de l'Ouest. Par manque de données, elle est restreinte à ces trois pays : Burkina Faso, Mali et Côte d'Ivoire. Nous espérons tout de même avoir une bonne représentation régionale au vu de la diversité de zones climatiques existantes au niveau des ces pays.

Une étude bibliographique à été nécessaire pour connaître les méthodes de calcul utilisées dans le contexte Africain. Les méthodes de Penman et Turc donnent de meilleurs résultats pour la détermination de l'ETP. La méthode Penman a été retenue pour le calcul d'ETP décadaire de toutes les stations du Burkina Faso (1971-1990). Les difficultés d'approcher l'ETP par cette formule proviennent des coefficients à appliquer qui dépendent de la surface évaporante et du microclimat. Il conviendrait mieux de les régionaliser avant toute étude à grande échelle de l'ETP.

Une analyse de l'évolution spatio-temporelle viendra étayer cette étude dans le but de d'étudier la variation de la variable dans le temps et sa répartition dans l'espace.

Dans le cas général, les variations annuelles peuvent être considérées comme faibles. Par contre les fluctuations mensuelles ou décadaires sont importantes et suivent le rythme des saisons. Quant à la répartition spatiale, elle présente un gradient croissant régulièrement de l'équateur jusqu'aux environs du 20<sup>ème</sup> parallèle de latitude Nord.

Les distributions de l'ETP Penman annuelle sont normales pour l'ensemble des stations étudiées sauf pour la station de Dori.

Des tests statistiques effectués sur les stations de Bobo-dioulasso et de Ouagadougou montrent que leurs séries annuelles présentent un caractère aléatoire (série longue 1961-1990). Mais l'hypothèse de rupture est acceptée au seuil de confiance de 99% seulement pour la station de Ouagadougou en 1978. Le traitement a été élargi à toutes stations du Burkina Faso avec des séries moins longues (1971-1990) afin de donner une dimension spatiale à l'étude. Les séries chronologiques de Bobo-dioulasso, Ouagadougou, Ouahigouya, Boromo, Gaoua présentent un caractère aléatoire. Les séries de Dori et de Fada Ngourma seront caractérisées par une tendance à la baisse. Et enfin des points de rupture ont été signalés au niveau des stations de Fada en 1980, de Ouagadougou en 1978. et de Dori en 1976 (à un seuil de confiance faible).

**Mots clés :** Evapotranspiration, climat, Humidité, Vent, Température, Insolation, Variation spatio-temporelle, Penman, série chronologique, test statistique.

## **INTRODUCTION**

---

### **1. Problématique**

Dans le cadre d'une gestion rationnelle de l'eau d'irrigation, il est nécessaire de connaître tous les paramètres intervenants dans l'établissement d'un bilan d'eau. Certains de ces paramètres résultent des actions des usagers, d'autres sont déterminés par le type de sol, la culture et la qualité de l'eau. D'autres, enfin, sont dictés par le climat : précipitation et consommation de l'eau par évapotranspiration. C'est ce dernier paramètre, à savoir l'évapotranspiration potentielle qui fait l'objet de cette étude.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est un terme significatif du bilan, qui représente la demande évaporative du climat. Cependant, en étudiant sa sensibilité, ce paramètre n'a que très peu d'influence dans les modèles hydrologiques. Et pourtant en Afrique de l'Ouest, on enregistre des valeurs d'ETP dépassant parfois 2.5m par an.

### **2. Objectif**

Le double objectif de cette étude est de dresser la liste des méthodes d'estimation de l'ETP adaptées aux conditions de la zone d'étude et de réaliser une analyse spatio-temporelle à travers laquelle il sera question :

- \* d'étudier les variations décennales et annuelles de l'ETP, qui fera l'objet du chapitre 3.
- \* d'établir une esquisse de cartes actualisées ETP pour les différents pays de la zone étudiées, qui sera traitée dans le chapitre 3.
- \* de réaliser des tests statistiques sur la série ETP, qui fera l'objet du chapitre 4.

### **3. Zone d'étude**

L'objectif d'élargir cette étude pour toute l'Afrique de l'Ouest n'étant pas atteint, toutefois nous nous sommes limités aux pays dont les données sont disponibles. L'étude porte donc sur huit stations du Burkina Faso, dix huit stations du

Mali et onze stations de la Côte d'Ivoire. Nous présumons obtenir une bonne représentation de l'Afrique de l'Ouest avec un pays côtier et deux pays sahéliens.

#### **4. Sources des données**

De multiples investigations ont été menées dans le cadre de nos recherches de données. Les contacts avec le CILSS et le centre AGRHYMET de Niamey n'ont pas été très fructueux. Ils doivent en principe détenir une banque de données actualisées.

Dans le cas du Burkina Faso, nous avons recueillis les données auprès de la direction nationale de la météorologie. Ces données sont constituées des paramètres intervenants dans le calcul de l'ETP à savoir : la température minimale et maximale, l'humidité relative minimale et maximale, l'insolation et la vitesse du vent à 10m du sol. Les données sont disponibles sous forme de fichier décennaires et couvrent les années 1971 à 1990.

Concernant le Mali et la Côte d'Ivoire, nous avons eu les données brutes de l'ETP décennaire. Elles sont calculées par la méthode Penman et elle nous ont été communiquées par l'ASECNA via l'IRD.

#### **5. Intérêt pratique de la connaissance de l'ETP**

La notion d'évapotranspiration potentielle présente un très grand intérêt pratique pour la conduite des irrigations, puisqu'elle constitue la limite supérieure de la quantité d'eau susceptible d'être absorbée utilement par les plantes en vue de leur croissance. En effet, pour une culture irriguée portant sur une variété déterminée, et ayant reçu les soins cultureux et les éléments nutritifs appropriés, le rendement maximal sera observé lorsque l'ensemble des approvisionnements en eau constitué par les précipitations, la réserve en eau du sol facilement utilisable (RFU) et les apports complémentaires d'eau d'irrigation permettront à la plante de consommer une quantité d'eau égale à l'évapotranspiration potentielle.

Mais la capacité de réponse d'une culture au pouvoir évaporant de l'atmosphère varie avec sa période végétative. En début et en fin de cycle végétatif (levé et maturité), l'évapotranspiration maximale (ETM) de la plante est nettement

inférieure à l'ETP. La connaissance du rapport  $\frac{ETM}{ETP} = K$  pour une culture déterminé à chaque stade de son développement est donc nécessaire pour évaluer à sa juste valeur la quantité d'eau consommable par la plante.

La connaissance aussi précise que possible de l'évapotranspiration potentielle est donc nécessaire aussi bien à l'ingénieur agronome chargé de la conduite des irrigations dans un périmètre qu'à l'ingénieur du génie rural chargé de l'étude et de la réalisation des projets d'aménagement hydro-agricoles ; toutefois, les intérêts de ces deux utilisateurs sont différents :

- \* le responsable de la conduite des irrigations s'intéressera surtout aux valeurs journalières de l'ETP pour suivre au plus près l'évolution des besoins en eau des plantes et y adapter son exploitation. Ces valeurs peuvent être obtenues à partir des valeurs journalières de l'évaporation mesurée à l'évaporomètre Piche, par application d'une formule du type de celle de Bouchet.

- \* par contre, l'auteur d'un projet d'irrigation s'intéressera plutôt aux valeurs moyennes de l'évapotranspiration potentielle et à l'étude fréquentielle des besoins en eau des plantes pour déterminer la capacité de son réseau à des besoins correspondants à une fréquence donnée.

Son importance sur le plan hydrologique n'en est pas moindre, car il entre (même faiblement) dans les modèles permettant, par exemple, de prédire les crues.

## CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DE L'ETP

Sur les continents, l'enrichissement en eau de l'atmosphère est dû à deux phénomènes, d'une part l'évaporation directe de l'eau à partir des plans d'eau ou du sol lui-même, d'autre part la transpiration des végétaux qui favorise le transfert de l'eau du sous sol à l'atmosphère.

La demande évaporative, généralement connue sous le terme d'ETP, traduit la hauteur d'eau évaporée et/ou transpirée par le système sol-plante.

Les phénomènes physiques de l'évaporation et physiologique de la transpiration se conjuguent pour déterminer la quantité d'eau totale rejetée dans l'atmosphère et cette consommation globale est désignée sous le terme, " évapotranspiration ". L'évapotranspiration est le plus souvent exprimée par la hauteur de la lame d'eau consommée: une lame d'eau de 1 millimètre correspond à une consommation de 1 litre d'eau par mètre carré ou 10 mètres cube par hectare.

L'évapotranspiration est donc la résultante de deux facteurs :

- le premier qui caractérise le pouvoir évaporant de l'atmosphère, c'est-à-dire la capacité de l'atmosphère à provoquer l'évaporation au voisinage de la surface évaporante, est fonction des paramètres climatiques.
- le second, qui mesure l'aptitude du couvert végétal à répondre à la demande l'environnement aérien, dépend à la fois de la nature et de l'état de la végétation.

L'expérience montre en effet qu'en présence d'un couvert végétal continu, couvrant bien le sol et ne souffrant d'aucune restriction en eau, l'évapotranspiration tend vers une valeur maximale qui varie très peu avec les espèces végétales et la nature du sol.

Cette valeur limite, connue depuis les travaux de *Thornthwaite* sous le nom d' " Evapotranspiration potentielle " peut être considérée en première approximation comme une fonction des paramètres climatiques et est une caractéristique importante du climat de la région étudiée.

L ETP peut être évaluée de diverses façons :

- ◇ par le calcul : Turc, Blaney Criddle, Penman, etc.
- ◇ par mesure : Bac A, Bac Colorado, Piche.

### **Méthodes de calcul de l'ETP et leur zones d'application**

La multiplicité de ces méthodes, leurs limites, ainsi que la diversité des approches qu'elles proposent fait qu'il est actuellement difficile d'obtenir un bon référentiel de la demande évaporative.

On peut pour simplifier, dire que l'applicabilité des formules varie avec la zone climatique dans laquelle on se trouve :

- ◆ en zones tempérées humides, les formules qui donnent les meilleurs résultats sont celles de Thornthwaite et toutes celles qui font intervenir la radiation (Turc, Penman, Brochet-Gerbier, etc.).
- ◆ en zones méditerranéennes, semi-arides et arides, les formules qui conviennent le mieux sont celles de Turc, Penman et Bouchet.
- ◆ en zones tropicales humides, les formules qui ne font intervenir que la température sont inadéquates ; la formule de Turc est souvent utilisée.

Il est donc nécessaire de choisir une méthode fiable qui puisse s'appliquer à l'ensemble des pays étudiés, et qui donne des résultats satisfaisants à l'échelle décadaire et mensuelle, pas de temps qui ont été retenus pour l'étude temporelle et spatiale.

Nous présentons ici deux méthodes de calcul très utilisées en Afrique de l'Ouest : la méthode Penman et la méthode Turc.

#### **I.1 Méthode Penman**

Sur le plan scientifique, la formule Penman repose sur une base théorique indiscutable et est universellement reconnue par les chercheurs comme la meilleure. Malheureusement, sur le plan pratique elle est très difficile à utiliser car les calculs sont très longs à mener, et d'autre part des coefficients correctifs à appliquer ne sont pas tous connus avec précision, ce qui retire beaucoup à la valeur finale des résultats.

L'ETP Penman se calcule à partir de l'équation du bilan énergétique au niveau de la surface évaporante.

L'énergie disponible au niveau des surfaces à deux sources :

⇒ L'énergie radiative ( $R_n$ ) qui permet d'évaluer la demande évaporative découlant du bilan radiatif net,

⇒ L'énergie advective ( $E_a$ ) qui traduit l'effet de l'air ambiant sur la demande en eau. Ce terme est fonction du déficit hygrométrique et du renouvellement des masses d'air des surfaces foliaires.

On exprime l'évapotranspiration par la formule :

$$ETP = C \times (\alpha \times R_n + \beta \times E_a)$$

### I.1.1 Terme radiatif $R_n$

Le rayonnement net  $R_n$  est le bilan de tous les flux radiatifs au niveau de la surface évaporante supposée saturée d'eau.

Le sol reçoit :

⇒ un rayonnement solaire  $R_s$  direct et diffus de courte longueur d'onde,

⇒ un rayonnement thermique  $R_{ta}$  provenant de l'atmosphère et des nuages.

Le sol émet :

⇒ une fraction  $a \times R_s$  du rayonnement solaire, par réflexion. Le coefficient de réflexion ou albédo ( $a$ ) dépend de la nature du couvert superficiel :

- $a = 0.05$  pour une nappe d'eau libre
- $a = 0.25$  pour une culture

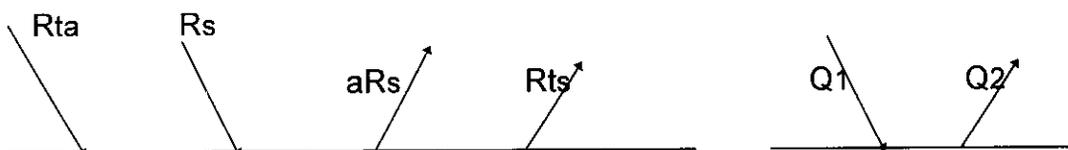
⇒ un rayonnement thermique  $R_{ts}$  de grande longueur d'onde.

Le rayonnement net  $R_n$  peut donc s'exprimer comme la somme de deux termes :

$$R_n = Q_1 + Q_2$$

$Q_1 = (1-a)R_s$  = rayonnement net de courte longueur d'onde

$Q_2 = R_{ta} - R_{ts}$  = rayonnement net de grande longueur d'onde



calcul de Q1

$$Q_1 = (1 - a) R_s$$

Généralement, on ne dispose pas de mesures du rayonnement global  $R_s$ . On utilise la formule d'Angström établie statistiquement à partir du rayonnement extra-terrestre IGA (rayonnement très courte longueur d'onde reçu à la limite de l'atmosphère et exprimé en Joules par  $cm^2$  et par jour).

$$R_s = IGA \left( A + B \times \frac{INS}{DAJ} \right)$$

◇ IGA est fonction de la latitude LA (en rad), de la déclinaison DE (en rad) et du quantième du jour de l'année NOJ.

$$IGA = 3822,76$$

$$\times \left[ \sin DE \times Ar \cos(-tgLA \times tgDE) + \sqrt{\cos LA - \sin DE} \right]$$

$$\times (1 + 0,033 \cos(0,0172 \times NOJ))$$

◇ La déclinaison du soleil DE, c'est l'angle que fait le soleil avec l'équateur, s'exprime par la relation :

$$DE = 0,0066241 + 0,406149 \times \sin(0,0172029 \times (NOJ - 81,95))$$

$$+ 0,006675 \times \sin(0,0344057) \times (NOJ - 42,85))$$

$$+ 0,000149 \times \sin(0,0688115) \times (NOJ - 17,57))$$

$$+ 0,003009 \times \sin(0,0516088) \times (NOJ - 21,42))$$

◇ INS est la durée d'insolation journalière mesurée, exprimée en heure et dixièmes.

◇ DAJ est la durée astronomique du jour ou insolation maximale théorique, exprimée en heure et dixième.

$$DAJ = 7,6394 \times (Ar \cos(-tgLA \times tgDE) + \frac{0,01055}{\sqrt{(\cos LA - \sin DE)}})$$

◇ Les coefficients A et B sont les coefficients d'Angström.

On leur affecte généralement différentes valeurs selon la zone.

	A	B
Zone méditerranéenne	0.18	0.55
Zone semi-aride chaude	0.25	0.45
Zone tropicale humide	0.29	0.42

Etant donné que le rayonnement global varie avec la latitude, et pour éviter toute discontinuité arbitraire, il est préférable d'utiliser les formules de GLOVER et MACCULLOCH suivantes qui sont utilisées parfois pour des calculs sur des zones d'étude:

$$A = 0,29 \cos LA$$

$$B = 0,42 + 0,0015 \times LA$$

connaissant  $IGA$ ,  $INS$ ,  $DAJ$ ,  $A$ ,  $B$  on peut alors calculer  $(1-a)R_o$ .

**NB :** Ces formules de GLOVER et MACCULLOCH ne donnent pas de bons résultats dans toutes les stations, il est donc nécessaire de déterminer expérimentalement  $A$  et  $B$ . Pour cela il est évidemment indispensable de disposer de mesures de  $R_s$ ; ce qui rend inutile la formule empirique. Cette dernière méthode peut cependant être utile pour des stations proches de la station où les coefficients sont connus ou pour des stations qui ont des rayonnements solaires comparables. Cette dernière notion est cependant bien précise et, en fait, on est jamais très sûr de la validité des coefficients déterminés à l'avance.

Calcul de  $Q_2$

$$Q_2 = R_{ta} - R_{ts}$$

Le rayonnement de l'atmosphère s'exprime par la relation:

$$R_{ta} = \sigma T_k^4 \times (0,44 + 0,079 \times \sqrt{ed})$$

où :

- ◇  $\sigma$  = Constante de Boltzmann
- ◇  $T_k = 273,6 + T$  (° C) température au sol en degré Kelvin

◇  $ed$  = tension de vapeur d'eau mesurée sous abri, exprimée en mbars.

On constate donc que le rayonnement atmosphérique est évalué à partir des paramètres mesurés au sol.

Le rayonnement terrestre est exprimé sous la forme:

$$R_{ts} = \epsilon \sigma T_k^4$$

où

◇  $\epsilon$  = emissivité du couvert végétal

◇  $T_s$  = température de surface du couvert

En général,  $T_s$  n'étant mesurée, on considère que la température de surface est égale à celle de l'air mesurée sous abri:  $T_k$ .

$$\begin{aligned} R_{ta} - R_{ts} &= -\sigma T_k^4 (1 - 0,44 - 0,079\sqrt{ed}) \\ &= -\sigma T_k^4 (0,56 - 0,079\sqrt{ed}) \end{aligned}$$

On doit de plus tenir compte d'un facteur correctif dû aux nuages, exprimé par l'intermédiaire de la durée d'insolation et qui est :  $0,1 + (INS / DAJ)$

soit :

$$R_{ta} - R_{ts} = -\sigma T_k^4 (1 - 0,44 - 0,079\sqrt{ed})(0,1 + 0,9(INS / DAJ))$$

le rayonnement net peut donc s'exprimer par la relation:

$$\begin{aligned} R_n &= (1 - a) IGA (A + B \times INS / DAJ) \\ &\quad - \sigma T_k^4 (0,56 - 0,079\sqrt{ed})(0,1 + 0,9)(INS / DAJ) \end{aligned}$$

Afin de convertir le terme  $R_n$  en mm/j, on divise  $R_n$  par le coefficient  $CLA$ , qui représente la chaleur latente de vaporisation de l'eau exprimée en cal/cm<sup>2</sup>.mm

( 1mm correspond à 246,6 Joules / cm<sup>2</sup>.mm )

L'expression finale de  $R_n$  sera donc :

$$R_n(\text{mm} / j) = (1 / CLA \times R_n(\text{Joules} / \text{cm}^2 . j))$$

### I.1.2 Terme advectif $E_a$

Pour une surface ayant des caractéristiques aérodynamiques données, l'advection dépend du renouvellement de l'air au-dessus de la surface et de l'humidité relative.

Le terme advectif est alors calculé comme le produit de deux fonctions:

$$E_a = f_1(ed) \times f_2(VEN)$$

#### Calcul de $f_1(ed)$

L'influence de l'humidité relative ( ou la tension de vapeur ) est exprimée par le déficit hygrométrique.

$$f_1(ed) = ea - ed$$

où

◇  $ea$  = tension de vapeur saturante à la température  $T_{mo}$  (°C),

◇  $ed$  = tension de vapeur à la température  $T_{mo}$  (°C), en mbar

#### Calcul de $f_2(VEN)$

Il s'agit d'un facteur lié au renouvellement des masses au-dessus de la surface considérée.

$$f_2(VEN) = 0,26 (r + K \times VEN)$$

où :

◇  $VEN$  = vitesse moyenne du vent en m/s, mesurée à 2m du sol

◇  $r = 1$  pour un couvert végétal

0,5 pour une nappe d'eau libre

◇  $K$  = coefficient variant en fonction de l'amplitude thermique

$$K = 0,54 + 0,35 / (1 + 50 e^{0,9 \times (9,5 - T_{max} + T_{min})})$$

$T_{max}$  et  $T_{min}$  sont les températures maximales et minimales journalières ( ° C ).

### I.1.3 Coefficient pondérateurs $\alpha$ , $\beta$ et $C$

$$\alpha = P^* / (P^* + \tau) \quad \beta = \tau / (P^* + \tau) = 1 - \alpha$$

où  $P^* = (P_o / P_r) \times \delta$

- ◇  $P_o$  = pression atmosphérique au niveau de la mer exprimée en millibars
- ◇  $P_r$  = pression atmosphérique à la station de mesure, exprimée en millibars
- ◇  $\delta$  = variation de la tension de vapeur saturante en fonction de la température TMO, exprimée en mbars/°C
- ◇  $\tau$  = constante psychrométrique = 0,66

Calcul de  $P_o/P_r$

$P_o/P_r$  est fonction de l'altitude et de la température moyenne:

$$P_o / P_r = 10^{[ALT / (67,4072 \times T_k)]}$$

- ◇  $ALT$  = altitude de la station en m.

Calcul de  $\delta$

La tension de vapeur saturante à la température TMO est exprimée par la formule de LOWE:

$LA_0 = 0,107799961$	$LA_3 = 0,0002650648471$
$LA_1 = 0,4436518521$	$LA_4 = 0,3031240396 \cdot 10^{-5}$
$LA_2 = 0,01428945805$	$LA_5 = 2,034080948 \cdot 10^{-8}$
	$LA_6 = 6,136820929 \cdot 10^{-11}$

$$\delta = \frac{d(ea)}{d(TMO)} = LA_1 + TMO(2 \times LA_2 + TMO(4 \times LA_4 + TMO(5 \times LA_5 + TMO \times LA_6))))$$

$C$ : est un facteur de correction pour compenser les conditions diurnes et nocturnes. Il est fonction de l'humidité relative maximale ( $Hmax$ ), du rayonnement solaire ( $Rs$ ), de la vitesse du vent de la journée ( $VEN_{jour}$ ) et du ratio de la vitesse du vent de la journée par celle de la nuit ( $VEN_{ratio}$ ).

$$C = 0,6817006 + 0,0027864 \times Hmax + 0,0181768 \times Rs$$

$$- 0,0097297 \times UEN_{jour} + 0,0126514 \times VEN_{ratio}$$

$$+ 0,43025 \times 10^{-4} \times Hmax \times Rs \times VEN_{jour}$$

$$- 0,92118 \times 10^{-7} \times Hmax \times Rs \times VEN_{ratio}$$

## 1.2 Formule de Turc

La formule établie par Turc, et donnant l'ETP mensuelle en mm/mois, s'écrit :

$$ETP = (Rs + 50) \times 0,40 \times \frac{Tk}{Tk + 15}$$

dans laquelle  $R_s$  est la valeur mensuelle de la radiation solaire globale exprimée en petites calories par  $cm^2$  de surface horizontale et par jour, et  $T_k$  est la température moyenne mensuelle en  $0^\circ C$ .

Pour tenir compte de la durée réduite du mois de février, le calcul de l'ETP pour ce mois nécessite le remplacement du coefficient 0.40 par 0.37 .

### 1.2.1 Influence de l'humidité relative

Lorsque, l'humidité relative tombe en dessous de 50%, il est nécessaire d'introduire un terme correctif qui majore la valeur trouvée pour l'ETP. La formule prend alors la forme :

$$ETP = (Rs + 50) \times 0,40 \times \frac{Tk}{Tk + 15} \left(1 + \frac{50 - Hd}{70}\right)$$

$Hd$  : Humidité relative

### 1.2.2 Détermination de la radiation solaire globale

$R_s$  est donnée par la formule suivante, établie par Turc.

$$R_s = IGA \left(0,18 + 0,62 \times \frac{INS}{DAJ}\right)$$

dans laquelle  $IGA$  est l'énergie de la radiation solaire qui atteindrait le sol en l'absence d'atmosphère. Exprimée en  $cal / cm^2 / jour$  ; elle dépend la latitude du lieu et est fournie par les tables de Angot.

Le rapport  $\frac{INS}{DAJ}$  est l'insolation relative où  $INS$  est la durée d'insolation en heures mesurée à l'héliographe et  $DAJ$  la durée astronomique du jour exprimée dans la même unité ; la valeur de  $H$  ne dépend que de la latitude et est également donnée par les tables.

## **CHAPITRE II. BASES DE CALCUL**

---

Il semble que depuis quelques années, la formule de Penman soit communément admise. Des études comparatives telle que celle présentée par la F.A.O dans le "bulletin d'irrigation et de drainage no 24 (1976):les besoins en eau des cultures " confirment la validité de la méthode.

Bien que cette formule nécessite la connaissance d'un grand nombre de données de base, nous l'avons retenu pour le calcul de l'ETP des stations du Burkina Faso.

Nous exposons ainsi dans ce chapitre les considérations prises en compte pour ce calcul .

### **II.1 Les coefficients intervenant dans le calcul de l'ETP Penman**

#### **II.1.1 L'albédo**

La réflectance du sol dépend de sa nature et de son couvert. Nous avons pris une valeur moyenne constante de 0.25 correspondant à l'Albédo d'un couvert végétal. On observe de grandes variations d'un couvert à l'autre. A la mise en culture d'un champ il est certain que l'Albédo d'un sol nu serait le meilleur choix tant que le développement de la culture ne permet pas une occupation significative du terrain. Mais dans ce cas, suivant la réflectance du sol, l'Albédo du sol varie entre 0.05 et 0.2. on peut penser qu'une grande amélioration consisterai à réaliser des cartes moyennes d'Albédo à divers pas de temps, en compilant toutes les données existantes, notamment les mesures faites avec METEOSAT. Disposant ainsi des réflectances observées on aurait une meilleure approche du rayonnement d'origine solaire et on pourrait réaliser de meilleures cartes d'ETP.

#### **II.1.2 Les coefficients d'Angström**

Ce sont les coefficients A et B de la formule d'Angström permettant de calculer le rayonnement global à partir de l'insolation. Ces coefficients varient en

fonction de la station et pour une station donnée en fonction de la saison (Cf. *Annexe 3 : Tableau 2*).

La meilleure méthode consisterait à déterminer ces coefficients pour chaque microclimat. Ceci n'étant pas possible vu la diversité de microclimats du Burkina Faso. Les estimations de mesures sont nombreuses et souvent contradictoires, ce qui nous a conduit à prendre des formules théoriques telle que celle de GLOVER et MACCULLOCH (Cf. *paragraphe 1.2.1.1*)

### **II.1.3 Le coefficient C**

C'est le coefficient de correction pour tenir compte des conditions diurnes et nocturnes pour lesquels la fonction du vent a été déterminée.

Nous ne disposons pas de données permettant de l'estimer, mais son influence sur les résultats est très négligeable. La lecture sur les tables (J. Doorenbos) donne un coefficient sensiblement égale à 1 en tenant compte des conditions météorologiques moyennes du Burkina Faso.

### **II.1.4 Méthodes d'estimation des paramètres**

Les données de base sont sous forme de fichiers décennaires. Nous avons retenu comme base de calcul le pas de temps décennaire.

Nous avons exploité les données des huit stations existantes au Burkina Faso. Pour ces stations, nous disposons des données de mesure décennaires des paramètres intervenant dans le calcul de l'ETP Penman. Ces paramètres sont :

- ⇒ vitesse du vent à 10m du sol
- ⇒ humidité relative maximale
- ⇒ humidité relative minimale
- ⇒ température maximale
- ⇒ température minimale
- ⇒ insolation

Ces paramètres n'entrent pas directement dans le calcul. Ainsi, nous donnons ci-après les méthodes d'évaluation de ces paramètres de calcul.

### II.1.4.1 Températures moyennes, humidité relative moyenne

Disposant de la température maximale et de la température minimale, on peut calculer la température moyenne décadaire par la relation :

$$T_{\text{moy}} = \frac{1}{2} \times (T_{\text{max}} + T_{\text{min}})$$

De même pour l'humidité relative

$$H_{\text{moy}} = \frac{1}{2} \times (H_{\text{max}} + H_{\text{min}})$$

### II.1.4.2 Vitesse du vent

On a été obligé d'estimer la vitesse du vent à 2m du sol, à partir d'une mesure à 10m du sol par la formule :

$$V(2\text{m}) = 2 \times V(H) / \text{Log}_{10}(50 \times H).$$

### II.1.4.3 Evaluation des données manquantes

Nous avons identifié dans le fichier de données, des lacunes ou trous d'observation. On a cependant essayé d'évaluer ces valeurs manquantes par interpolation linéaire temporelle.

## II.2 Sensibilité des paramètres

Les paramètres qui entrent dans le calcul de l'ETP ont un rôle important sur la variabilité du résultat. Nous avons après les calculs essayé d'évaluer le poids de chaque paramètre sur le résultat.

L'imprécision sur la valeur d'Albédo, l'incertitude sur les coefficients d'Angström en absence de leur mesure entraînent une erreur sur l'évaluation du rayonnement solaire qui peut atteindre 30%.

Une variation de 10 points sur l'humidité apporte une modification de l'ETP d'environ 2%.

La même variation sur l'insolation fait changer l'ETP de 1%.

Dans la moyenne des cas, l'imprécision des mesures des paramètres entraîne une incertitude de 10% sur l'ETP.

Dans le cas de climat assez humide et venteux l'incertitude peut atteindre 30%; en effet le vent fort est un paramètre qui influe de façon majeure sur la précision de l'ETP quand l'humidité dépasse 60%.

Ceci montre l'intérêt d'un contrôle rigoureux sur les mesures du vent.

Le rôle de la température est primordial, d'ailleurs certains auteurs proposent des formules basées uniquement sur ce paramètre.

### **CHAPITRE III. VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DE L'ETP**

Dans ce chapitre, nous exposerons les variations de l'ETP dans le temps et sa répartition dans l'espace pour un certain nombre de stations des pays de la zone étudiée, pour lesquelles les mesures portent sur plusieurs années.

#### **III.1 Aperçu de l'environnement géographique et climatique de l'Afrique de l'Ouest**

L'Afrique de l'Ouest est une péninsule d'altitude comprise entre 300 et 500 mètres. Cette partie du continent Africain est entourée, à l'Ouest par les reliefs Guinéens dépassant 1000 mètres et à l'Est par des massifs pouvant dépasser 2000 même 3000 mètres.

Ces reliefs ont une influence sur la circulation des masses d'air en basses couches qui conditionne le climat. Or les vallées et dépressions comme le cas de notre zone d'étude, ne favorisent pas les ascendances thermiques et souvent entraînent des affaissements des masses d'air. La pluie étant essentiellement d'origine convective n'y prennent pas naissance, ce qui permet d'observer une diminution relative des pluies dans ces zones.

La situation météorologique générale de l'Afrique de l'Ouest subit l'influence de trois anticyclones permanents (centres des hautes pressions) situés, le premier sur l'atlantique aux environs des Açores, le second sur le Nord du continent Africain ( Libye - Soudan ), le troisième sur l'Atlantique Sud aux-environs de Saint-Hélène : respectivement, Anticyclone des Açores, Anticyclone Saharien, Anticyclone Austral.

Les versants et les bords des plateaux sont souvent plus arrosés surtout s'ils sont soumis aux vents d'Est qui déplacent les masses nuageuses, ou du Sud-Ouest qui apportent de l'air humide " Mousson ". Le relief, même faible, entraîne des déformations de l'écoulement des masses d'air. L'effet le plus fréquent est le soulèvement qui, favorisant les ascendances, se manifestera par des nuages convectifs.

## III.2 Variation des facteurs climatiques

L'analyse des facteurs climatiques est essentielle pour expliquer les variations spatio-temporelles de l'ETP.

Les principaux facteurs climatiques influençant l'évapotranspiration, comme l'évaporation d'une nappe d'eau libre, sont le rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité de l'air, et la vitesse du vent.

Par manque des données, on étudiera seulement les stations du Burkina Faso. Parmi ces stations, nous en avons choisi trois : une station à l'extrême Nord (Dori), une station à l'extrême Sud (Gaoua) et enfin une station située au centre du pays (Ouagadougou) afin d'obtenir une meilleure répartition dans les trois grandes zones climatiques de ce pays.

### III.2.1 Rayonnement solaire

Une partie du rayonnement solaire, source d'énergie dans la nature, sera utilisée pour vaporiser l'eau dans le processus de l'évapotranspiration.

Le rayonnement solaire qui atteindrait le sol dans ces zones en l'absence d'atmosphère est  $I_{GA}$ . Il indique le taux d'évaporation qui serait atteint si toute l'énergie pourra être utilisée pour l'évaporation.

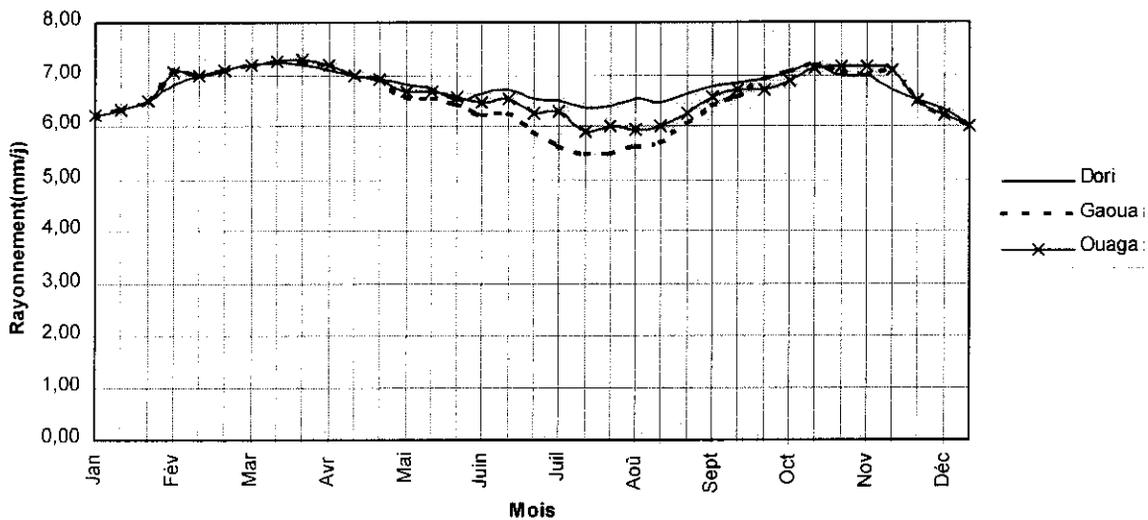
En réalité, ce n'est qu'une partie du rayonnement extraterrestre qui va atteindre le sol. Cette partie dépendra des caractéristiques de l'atmosphère, et est donc fortement déterminée par le degré de nébulosité.

L'insolation relative, qui est l'inverse de la nébulosité, est maximale (100%) en absence des nuages. A ce moment l'insolation réelle  $INS$  est à l'insolation maximale théorique appelée encore durée astronomique du jour  $DAJ$ . Par contre si toute la journée le ciel reste totalement couvert, l'insolation relative serait égale à zéro. L'ordre de grandeur de l'insolation dans la zone d'étude est de 30 à 90% ce qui correspond à une durée d'insolation réelle de 4 à 11,8 heures par Jour.

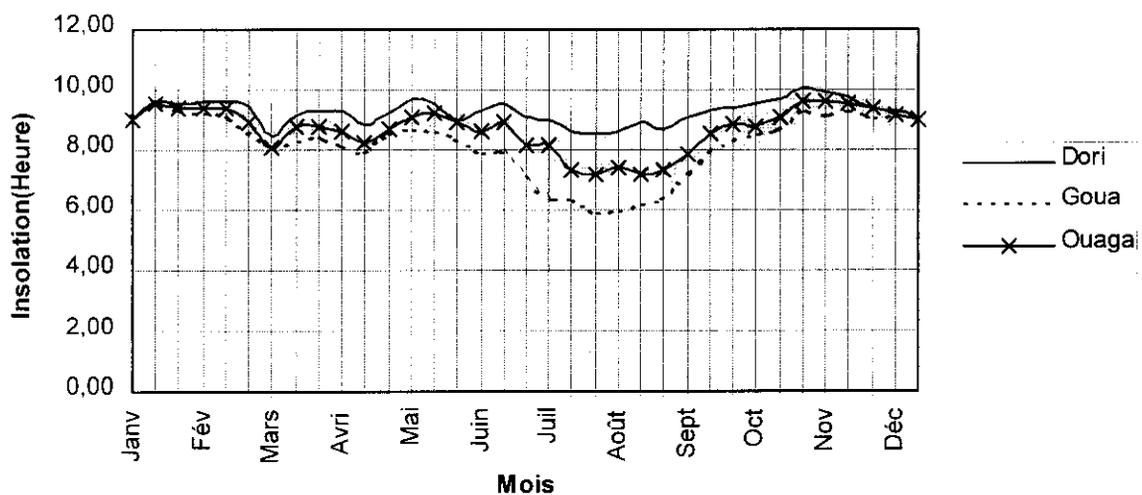
La moyenne des valeurs décennales du rayonnement solaire des trois stations de 1971 à 1990 est reportée sur la Figure 1 ci-après.

La figure fait apparaître que le rayonnement solaire est minimum en Juillet-Août et Décembre-Janvier. Le minimum absolu s'observe vers Juillet-Août. C'est à dire la période durant laquelle l'insolation est minimum, correspondant ici à la saison des pluies. Pendant cette saison, Dori reçoit un rayonnement plus important que Ouagadougou et Gaoua. Cela s'explique par l'abondance des pluies à Gaoua par rapport à Dori.

Durant l'année le rayonnement suit les mêmes fluctuations que l'insolation (Figure 2).



**Figure 1 : Variation de l'insolation**



**Figure 2 : Rayonnement solaire**

### III.2.2 Température de l'air

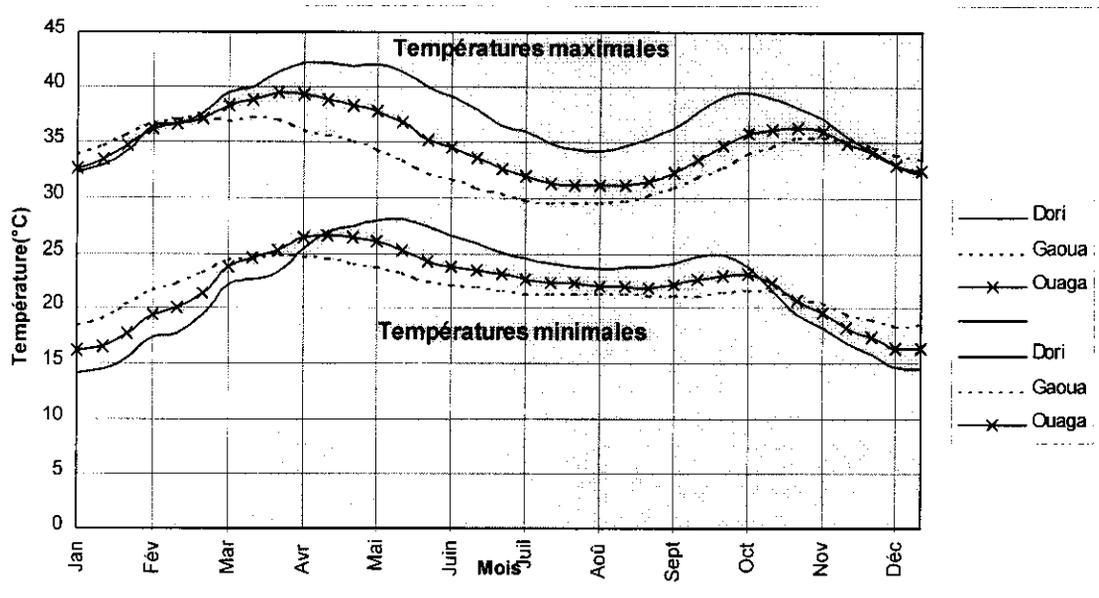
La température de l'air est également liée au rayonnement solaire. En plus, elle commande en partie l'humidité de l'air (un autre facteur influençant l'évapotranspiration).

La moyenne des valeurs décadaires de la température minimale et maximale et la température moyenne de l'air de 1971 à 1990 sont reportées sur la Figure 3 et 4. L'allure de la variation présente deux saisons fraîches, l'une en Décembre-Janvier, l'autre en Août.

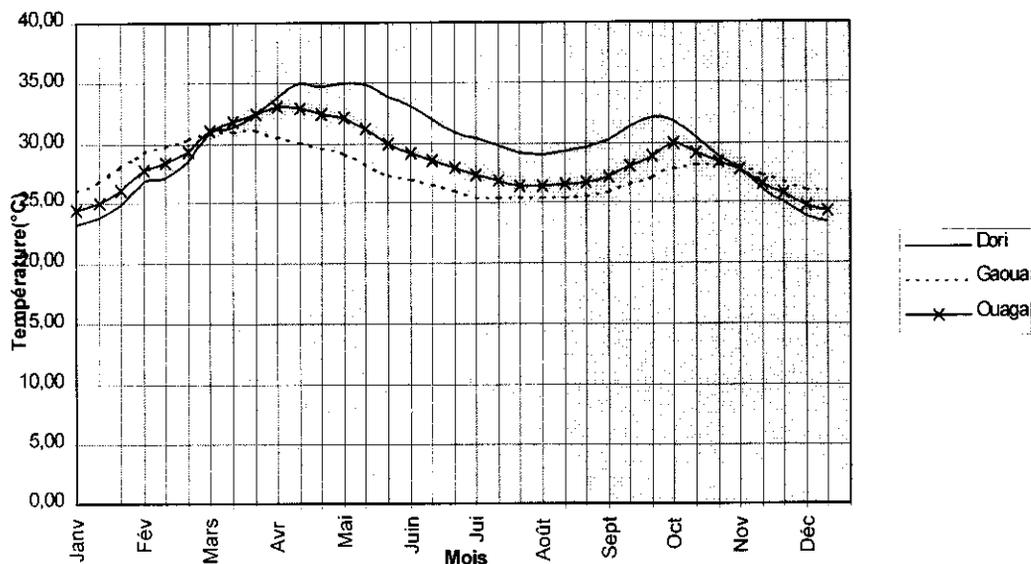
De Novembre à Mars l'amplitude thermique la plus importante s'observe à Dori. Les températures minimales sont plus élevées à Gaoua qu'à Ouagadougou et Dori que les maxima restent à peu près identiques pour toutes les stations. Pendant une bonne partie de la saison sèche l'amplitude thermique suit donc un gradient croissant du Nord au Sud.

Du mois d'Avril au mois d' Octobre, les maxima et minima deviennent plus importants à Dori. Donc pendant toute la saison des pluies la température croit du Sud au Nord.

La figure 4 montre que les températures moyennes sont maximales en Avril-Mai et en début du mois d'Octobre. Les plus faibles températures se situent en Décembre-Janvier pour les stations de Ouagadougou et Dori.



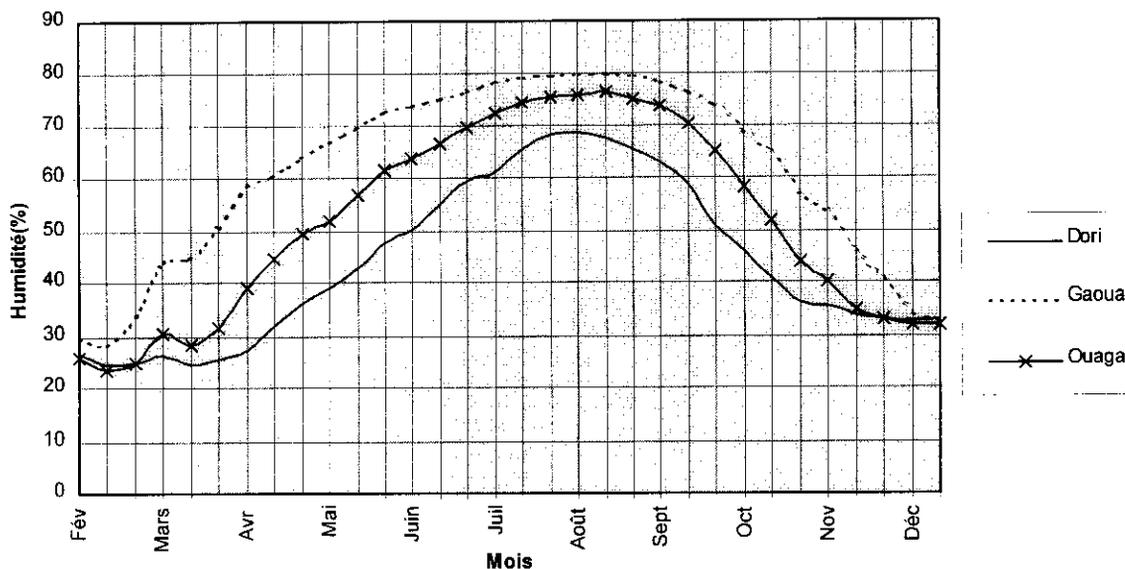
**Figure 3:** Température minimale et maximale



**Figure 4 :** Température moyenne de l'air

### III.2.3 Humidité de l'air

L'humidité de l'air détermine le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère. La moyenne des valeurs décennales de l'humidité relative de 1971 à 1990 est reportée dans la Figure 5 ci-dessous. La figure montre que l'humidité moyenne est de l'ordre de 50 à 80% pendant la saison des pluies et s'abaisse jusqu'à 25% en saison sèche. On note une diminution de l'humidité du Sud vers le Nord. Les variations annuelles des moyennes décennales sont très faibles pour toutes les stations. Elles sont de l'ordre de 4.6%.



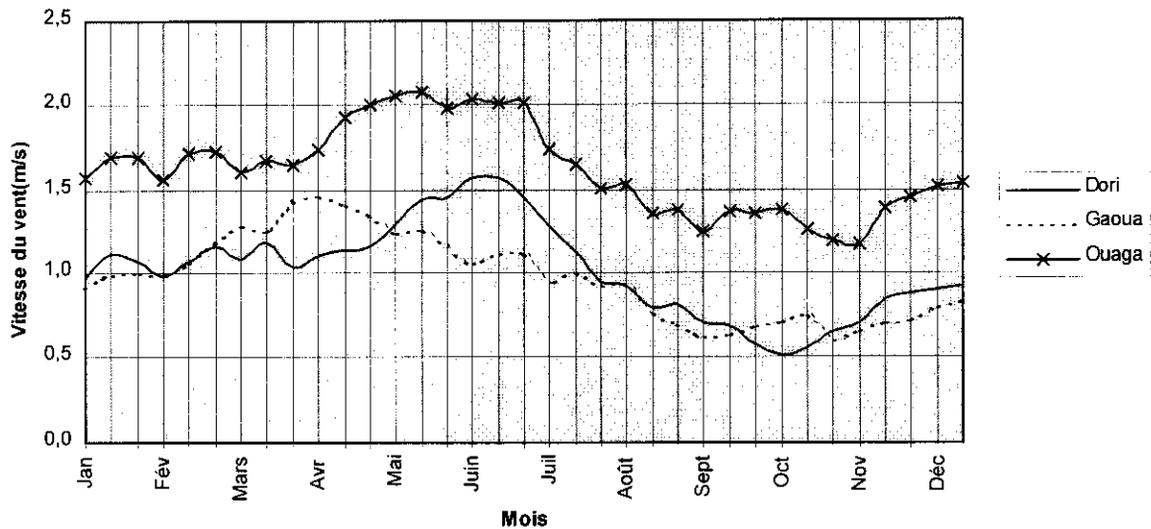
**Figure 5 :**Humidité relative

### III.2.4 Vitesse du vent

La vitesse du vent détermine la vitesse avec laquelle la masse d'air, devenue saturée au-dessus de la surface évapotranspirante, est remplacée par une masse d'air fraîche.

La moyenne des valeurs décadaires de la vitesse du vent de 1971 à 1990 est reportée dans la Figure 6 . Les vitesses du vent mesurées à 10m du sol sont ramenées à 2m. La figure fait ressortir que les vitesses du vent sont plus fortes en début d'hivernage. Elles diminuent progressivement pour atteindre leur minimum en fin de saison des pluies, puis elle croit jusqu'à Décembre. Pendant le reste de l'année, les variations sont faibles. On note que, les vitesses du vent sont plus importantes à Gaoua.

On constate que c'est le seul paramètre qui ne respecte pas trop cette prépondérance de la latitude constatée dans les autres.



**Figure 6** : Vitesse du vent

### III.3 Variation temporelle de l'ETP

Nous avons étudié dans cette partie les variations dans le temps de toutes les stations. Pour les stations du Burkina Faso nous avons fait le calcul de l'ETP par la méthode Penman. Les autres stations, nous nous sommes servi des données ETP Penman, mais nous ignorons leurs modes de calcul.

#### III.3.1 Variations Interannuelles

Le report sur un graphique des séries annuelles permet de voir cette variation. L'ETP accuse au fil des années des fluctuations très faibles pour l'ensemble des stations étudiées. Nous donnons à titre indicatif les deux séries de Ouagadougou et de Bobo-dioulaso sur la figure 7 ci-dessous . Pour mesurer cette variation, nous avons utilisé le coefficient de variation.

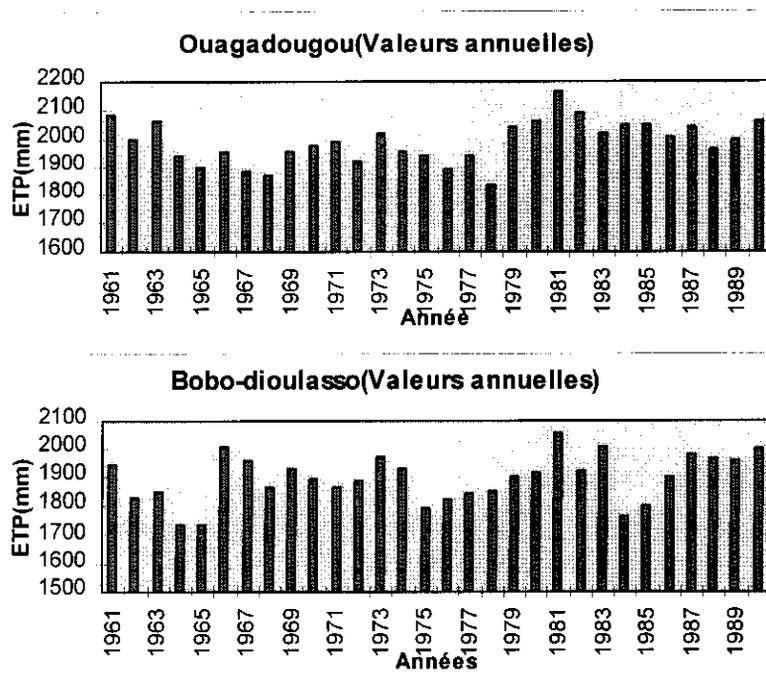
Le coefficient de variation (CV) d'une série d'observations est donné par :

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

où  $\sigma$  est l'écart type de la série et  $\bar{x}$  la moyenne. Le coefficient de variation donne une mesure de la variabilité, dans les données, exprimée en pourcentage de la valeur moyenne.

Les coefficients de variation sont de 4.3% pour Ouagadougou et 3.7% pour Bobo-dioulasso. Ils sont relativement faibles.

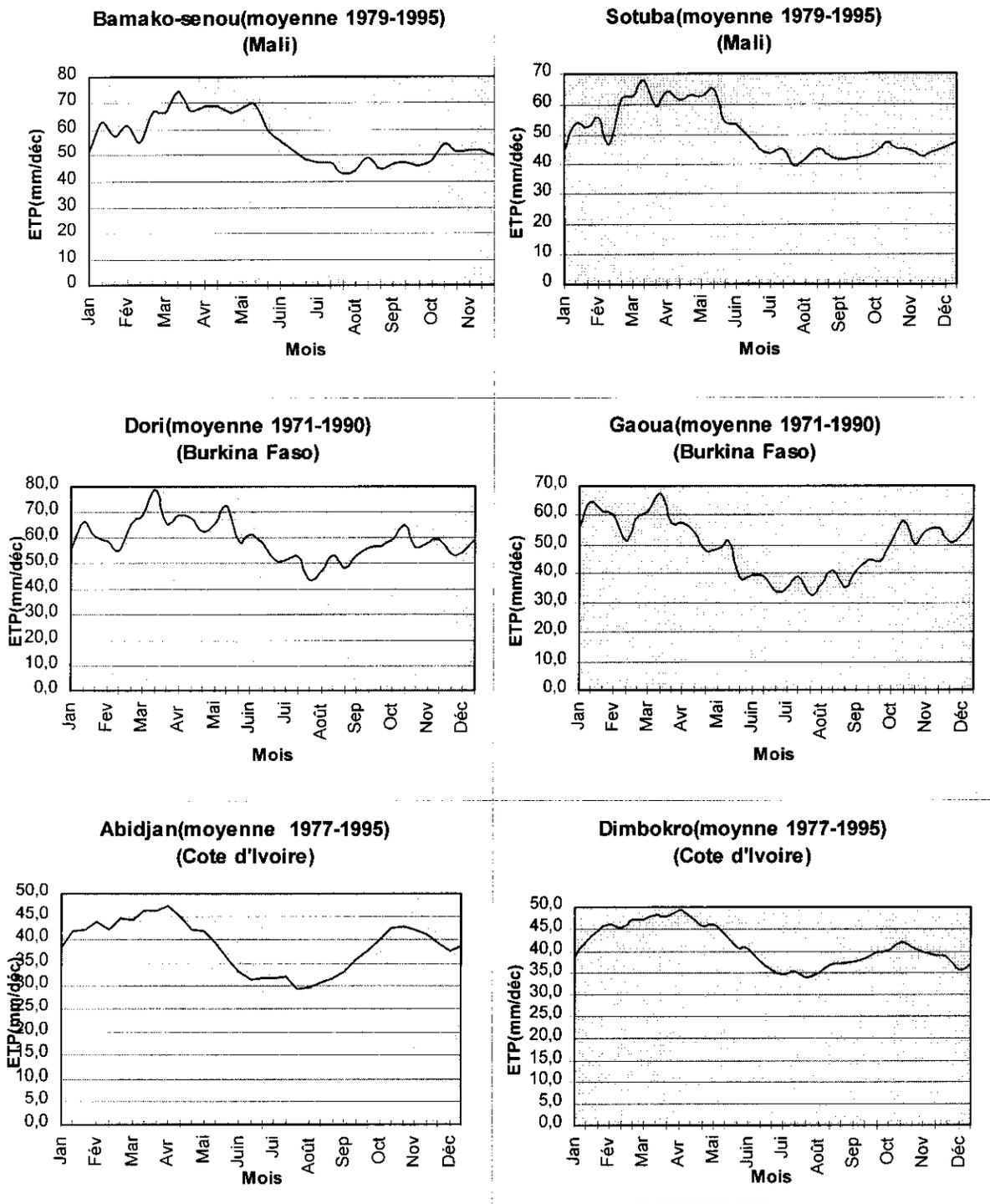
**Figure 7 : Variation interannuelle de l'ETP**



### III.3.2 Variation décadaire

Le report sur un graphique, en fonction du mois ou de la décade, des paramètres statistiques classiques ( moyenne, variance ou quantiles ) permet d'avoir une vision globale de l'évolution de l'ETP durant l'année, des périodes maximales et minimales (Figure 8)

**Figure 8 : Variation décadaire**



**III.3.2.1 Résultats et exploitations**

Les évolutions de l'ETP Penman au cours de l'année pour toutes les stations sont indiquées dans les graphiques ( *Annexe 1 : figure 1,2 et 3*).

La figure 8 montre à titre indicatif cette variation par décade pour certaines stations réparties dans les trois pays.

◇ En zone sahélienne au (Burkina Faso et Mali), l'ETP présente deux maximums et un minimum bien marqués : maximum entre Mars et Octobre, minimum entre Juin et Août (*Annexe 1 : Figure 1*).

◇ Plus au Nord le deuxième maximum devient moins marqué, c'est le cas de quelques stations du Mali (*Annexe1 : Figure 3*).

◇ Au sud enfin, nous retrouvons deux maximums, mais aussi deux minimums, c'est le cas des stations de la Côte d'Ivoire(*Annexe1 : Figure 2*).

La demande est faible en saison des pluies car elle correspond à une période où on enregistre les plus faibles valeurs de l'insolation. C'est aussi dans cette saison que les températures sont moins élevées.

La saison des pluies s'accompagne du rayonnement global dû à la présence des nuages, et surtout des effets combinés de la chute de la vitesse du vent et de l'augmentation de l'humidité relative.

- En saison sèche, L'ETP atteint son maximum. Le rayonnement solaire, ainsi que la température de l'air et les vitesses du vent sont très élevés, tandis que l'humidité relative n'est pas (encore) trop élevée.

En effet pendant la saison sèche, l'anticyclone Saharien prédomine et se dirige sur la zone un flux d'air Nord-Est à Est, sec, chaud pendant la journée, frais la nuit par suite de très forts rayonnements. Ce qui expliquera les pics entre Février et Avril.

On note une diminution générale de l'ETP du Nord vers le Sud.

### **III.3.3 Conclusion**

Pour un emplacement donné, l'ETP varie selon les années et différentes périodes d'une même année. D'autre part, la valeur annuelle totale de l'ETP varie quelque peu d'une année sur l'autre pour de nombreux climats, car elle dépend beaucoup de l'apport d'énergie solaire qui, hors de l'atmosphère, peut être considérée, comme constante annuelle. La variation de l'ETP annuelle peut être

d'environ 10% à peine sous les climat humides, et atteindre jusqu'à 25% sous les climats continentaux, cela dépend surtout du degré de nébulosité.

Comparées avec la variation annuelle, les variations mensuelles de l'ETP pour un mois et un emplacement donnés auront tendance à être supérieure. Cette variation ayant un rapport étroit avec les fluctuations des conditions météorologiques. Pour les climats continentaux des latitudes moyennes, le rayonnement peut varier à l'extrême pour un mois donné. Dans les zones à saisons sèches et humides bien nettes, les mois de transition normale peuvent aussi accuser des variations importantes pour le même mois d'une année sur l'autre ; si les pluies sont exceptionnellement précoces ou tardives, les valeurs décadaires de l'ETP pour la décade considérée peuvent varier de 50% ou plus d'une année à l'autre.

Les valeurs journalières de l'ETP peuvent varier très fortement et l'on enregistrera des valeurs faibles les jours pluvieux, humides, nuageux et calme et des valeurs fortes les jours secs, ensoleillés, venteux.

### **III.4 Variation spatiale de l'ETP**

Le but de cette partie est de pouvoir cartographier les ETP puis d'analyser sa répartition dans la zone d'étude. Nous avons sélectionné uniquement les stations dont leurs données nous semble plus complète.

#### **III.4.1 Méthode de cartographie**

Les cartes ne sont pas dessinées manuellement mais automatiquement avec le logiciel SURFER de golden Software Inc, Colorado. C'est un logiciel qui permet de calculer les interpolations spatiales des données irrégulièrement distribuées sur le terrain. Les résultats de calcul est une grille de valeurs espacées avec des intervalles réguliers et permettant le tracé de courbes d'isovaleurs. Le logiciel produit des interpolations acceptables si on tient compte d'un certain nombre de règles d'utilisation. La méthode d'interpolation retenue est le krigeage qui emploie une formulation statistique tenant compte de la variabilité des données.

### **III.4.2 Analyse et exploitation des résultats**

Les résultats des calculs ont été reportés sur des cartes pour rendre l'exploitation plus aisée : on dispose ainsi d'une série de 13 cartes donnant les valeurs de l'évapotranspiration moyenne mensuelle pour les douze mois de l'année ainsi que leurs valeurs moyennes annuelles. Les valeurs mensuelles sont des moyennes de 20 ans d'observation(1971-1990).(Annexe 5)

Sur chaque carte, on a reporté la valeur exacte calculée pour les différentes stations.

#### **Saison sèche**

Durant la saison sèche (Novembre à Mars), les isolignes ou d'égales valeurs d'ETP se caractérisent par plusieurs centres de maxima. L'ETP atteint en début de saison (Novembre) les maximums à Niolo, Bamako, Hombori et Gao pour les stations du Mali, puis sur la bande Dédougou, Boromo, Ouagadougou et Fada pour celles du Burkina Faso.

Un accroissement générale de la demande évaporative se fait constater dans toute la zone jusqu'à en fin de saison. Ceci s'accompagne par un léger déplacement des isolignes vers la direction Nord.

Nous avons vu dans l'analyse temporelle que l'ETP suit fortement l'évolution de ses paramètres les plus influents, il en ai de même pour la répartition spatiale.

Tout au sud, en Cote d'ivoire la demande reste faible du à l'influence presque constante de la cote atlantique.

#### **Saison des pluies**

Nous considérons le mois d'Avril et le mois de Mai comme étant les mois de transition vers la saison des pluies. Pendant cette saison, l'évapotranspiration potentielle est moins forte dans toute la zone. Les centres de maximums disparaissent progressivement et les lignes d'égale ETP deviennent subparallèles en se déplaçant légèrement. Cette répartition est rigoureusement similaire à celle observée pour la pluie. Elle pourrai être la cause majeure. En effet la pluie provoque,

une baisse de l'insolation et de la température par l'abondance des masses nuageuses.

### **III.4.3 Avertissements à l'utilisation des cartes**

Les perturbations apportées par les variations d'altitude rendent l'interprétation des résultats plus difficile et l'utilisation des courbes plus incertaine dans ces zones. Il faudrait pouvoir disposer des résultats d'un plus grand nombre de stations pour étudier les microclimats engendrés par les diverses orientations des pentes.

Certaines stations présentent des anomalies et d'autres des trous d'enregistrement. Nous avons omis quelques uns, mais les méthodes d'évaluations des données manquantes appliquées sur les autres ne reflètent pas trop la réalité.

Ces quelques remarques permettront à l'utilisateur de ces cartes de bien garder à l'esprit que les valeurs de l'ETP ainsi calculées ne sont qu'une approche de la réalité et qu'elles devront être révisée lorsqu'on disposera d'un plus grand nombre de stations et d'un nombre suffisant de mesures expérimentales.

### **III.4.4 Conclusion**

L'ETP présente dans la zone plusieurs centres de maxima et minima pendant la saison sèche. En saison des pluies, ces centres disparaissent peu à peu et les lignes d'égales valeurs prennent une disposition semblable à celle des isohyètes de la zone.

Nous avons comparé ces résultats avec ceux de L. Lémoine et J.C. Prat qui ont établi en 1972 des cartes mensuelles d'évapotranspiration sur le bassin côtier de Côte d'Ivoire. Nous notons d'une part un léger écart sur les moyennes mensuelles au niveau de toutes les stations. Cet écart est dû à la formule de Turc qui a été appliquée pour le calcul d'ETP sur le bassin. Or la formule Turc est moins précise et a tendance à surestimer l'ETP. D'autre part la disposition des isolignes n'est pas rigoureusement la même car ils disposent d'un plus grand nombre de

stations. A ce niveau, nous reconnaissons que les cartes de L. Lemoine et J.C. Prat sont à même de mieux représenter la réalité.

Dans le cas général l'évapotranspiration potentielle annuelle présente un gradient croissant régulièrement de l'équateur jusqu'aux environs de 20<sup>ème</sup> parallèle de latitude Nord. L'influence de la cote est prépondérante.

## CHAPITRE IV. ANALYSE DE LA SERIE CHRONOLOGIQUE DE L'ETP

Dans cette partie, nous étudierons principalement le caractère aléatoire de la série chronologique de l'ETP et les éventuelles ruptures. Pour cela nous faisons appel à un traitement utilisant des méthodes statistiques.

Nous nous sommes servi du Logiciel KhronoStat pour réaliser ces traitements.

Les méthodes statistiques dont il est fait état dans cette étude concernent l'exploitation d'une série de donnée et une seule. Ce type d'analyse est qualifié de ponctuelle. ( *Annexe 2* )

Les auteurs s'accordent pour décomposer une série temporelle typique en quatre parties :

- \* une tendance
- \* une périodicité : oscillation plus ou moins régulière autour d'une tendance
- \* une autocorrélation ou effet de mémoire : la grandeur d'une observation est dépendante de la magnitude des observations précédentes.
- \* une composante aléatoire, non systématique, irrégulière, c'est-à-dire due au constituants.

Toute série peut être représentée par l'un ou plusieurs de ces constituants. Nous appliquons cette logique à la série d'ETP qui nous concerne.

Les tests ont été effectués d'abord sur :

- ◇ la station de Ouagadougou aéroport et la station de Bobo-dioulasso

dont les séries de données sont plus longues et plus complètes (1961-1990). Pour les autres stations nous ne disposons que des séries courtes de 1971 à 1990.

- ◇ ensuite nous généralisons le traitement pour toutes les stations du Burkina Faso dans le but de donner une dimension spatiale à notre étude.

## IV.1 Présentation du Logiciel KhronoStat

Le logiciel KhronoStat a été élaboré dans le cadre d'une étude sur la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne et est donc orienté sur l'analyse de séries hydrométéorologiques. Il a été développé par l'IRD. Il présente un menu très simple et facilement utilisable.

### \* Fichiers d'entrée

Une attention particulière doit être portée sur la taille des séries d'entrée. Elles doivent être longues et complètes. La taille n devrait approcher 30.

Les fichiers d'entrée de KhronoStat (\*.ksi) sont des fichiers-texte.

Les fichiers 'ksi' ont le format suivant :

Partie	n°ligne	Structure	Description
<b>Entête du fichier</b>	1	[chaîne]	Description générale du poste ou de la station de mesure (code, nom, latitude, longitude, ...)
	2	[chaîne]	Variable étudiée
	3	[chaîne]	Unité variable étudiée
<b>Période de la chronique</b>	4	entier; entier	Début période; Fin période
<b>Données</b>	5 à n	entier; réel	Rang et valeur

*Remarque* : les 3 lignes de l'entête sont obligatoires mais peuvent ne pas être renseignées.

Les fichiers d'entrée de KhronoStat (\*.ksi) sont les fichiers qui sont lus puis traités par le logiciel. Ces fichiers ne peuvent pas être créés directement sous le logiciel mais doivent l'être sous un éditeur de texte ou un tableur quelconque.

### \* Fichiers de sortie (Résultats)

Après avoir sélectionné et exécuté les méthodes, on peut faire un aperçu global des résultats des différents tests. On pourra également imprimer ces résultats (Annexes 5).

## **IV.2 Méthodes d'analyse des séries chronologiques**

### **IV.2.1 Test de normalité**

Ce test permet de vérifier si la série peut être ajustée suivant la loi normale. Ce est un résultat important pour des études fréquentielles.

Si la série n'obéit pas à cette loi les méthodes Buishand et Lee&Heghinian citées ci-après ne peuvent pas être exécutées.

### **IV.2.2 Test de vérification du caractère aléatoire d'une série chronologique**

Ces tests portent bien souvent sur la constance de la moyenne de la série tout au long de sa période d'observation permettant ainsi de faire une distinction entre le caractère aléatoire et le caractère non aléatoire de la série en fonction de leur régions d'acceptation.

Il existe une gamme de méthodes permettant d'y arriver. Khronostat a retenu le test de corrélation sur le rang de (Kendall et Stuart, 1943 ;WMO,1966) . Ce test à été appliqué dans le contexte Africain (Olaniran, 1991).

### **IV.2.3 Tests de détection de rupture au sein d'une série chronologique**

Comme leur noms l'indiquent, ces tests ont pour rôle de détecter d'éventuelles ruptures dans une série chronologique. Une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu.

Les méthodes sont les suivantes :

- ◇ BUISHAND ellipse de contrôle pour la détection de rupture
- ◇ PETTIT pour la détection du point de rupture, mais aussi elle précise sa position
- ◇ LEE&HEGHINIAN pour la position à posteriori du point de rupture. Cette méthode ne détecte pas les ruptures mais donne la position sous l'hypothèse que la série présente déjà une rupture.

◇ Et enfin la méthode de HUBERT qui propose une segmentation de la série, donc pouvant signaler plusieurs ruptures.

### **IV.3 Résultats des tests**

#### **IV.3.1 Séries longues de Ouagadougou et Bobo-dioulasso**

##### Test de normalité

Le test de normalité effectué sur les séries annuelles d'ETP de Ouagadougou et Bobo-dioulasso montre qu'elles suivent la loi normale.

##### Caractère aléatoire

Les résultats des tests montrent que l'hypothèse de série aléatoire de l'ETP peut être acceptée au seuil de confiance de 99% et 95% pour les deux stations, mais rejetée au seuil de confiance de 10%.

##### Hypothèse de rupture

Les résultats des tests effectués sur les mêmes stations sont les suivants :

##### **1. Station de Bobo-dioulasso**

##### Test de BUISSAND et ellipse de contrôle

- \* l'hypothèse d'une rupture est refusée au seuil de confiance de 99%
- \* l'hypothèse d'une rupture est refusée au seuil de confiance de 95%
- \* l'hypothèse d'une rupture est refusée au seuil de confiance de 90%

##### Méthode non paramétrique de PETTIT

- \* l'hypothèse d'une rupture est refusée au seuil de confiance de 99%
- \* l'hypothèse d'une rupture est refusée au seuil de confiance de 95%
- \* l'hypothèse d'une rupture est refusée au seuil de confiance de 90%

##### Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Le mode de la fonction densité de probabilité a posteriori de la position du point de rupture est : 0,1703 en **1965**.

Segmentation de HUBERT

Le test indique une absence de rupture.

2. Station de Ouagadougou aéroportTest de BUISSHAND et ellipse de contrôle

- \* l'hypothèse d'une rupture est refusée au seuil de confiance de 99%
- \* l'hypothèse d'une rupture est acceptée au seuil de confiance de 95%
- \* l'hypothèse d'une rupture est acceptée au seuil de confiance de 90%

Méthode non paramétrique de PETTIT

- \* l'hypothèse d'une rupture est accepté au seuil de confiance de 99%
- \* l'hypothèse d'une rupture est accepté au seuil de confiance de 95%
- \* l'hypothèse d'une rupture est accepté au seuil de confiance de 90%

Le mode de la fonction densité de probabilité a posteriori de la position du point de rupture est : 6,15 E-03 en **1978**.

Méthode Bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité a posteriori de la position du point de rupture : 0,6357 en **1978**.

Segmentation de HUBERT

Deux ruptures sont décelées : 1963-1964 et 1978-1979

**Conclusion** : Les deux séries présentent un caractère aléatoire.

A priori la série de Bobo-dioulasso n'a pas subi un changement, par contre à Ouagadougou il y a eu bien rupture en 1978.

**IV.3.2 Synthèse de résultats des différentes stations(1971-1990)**

Ici les séries sont moins longues, nous suggérons une interprétation très prudente des résultats. Le but est de pouvoir donner une dimension aux résultats.

Le tableau 1 ci-dessous récapitule les résultats des tests effectués sur les séries 1971-1990 de toutes les stations du Burkina Faso.

Les séries sont testées sous l'hypothèse nulle [série chronologique aléatoire] ou [absence de rupture] . Dans le tableau les notations suivantes signifient :

- acc1                    hypothèse accepté au seuil de confiance de 99%
- acc2                    hypothèse accepté au seuil de confiance de 95%
- acc3                    hypothèse accepté au seuil de confiance de 90%
- rej1                    hypothèse rejetée au seuil de confiance de 99%
- rej2                    hypothèse rejetée au seuil de confiance de 95%
- rej3                    hypothèse rejetée au seuil de confiance de 90%
- d                        densité de probabilité à posteriori du point rupture
- P                        position a posteriori du point de rupture
- Début , Fin            date du début et fin de la segmentation
- Cases vides            la méthode n'a pas été exécutée

**Tableau 1** : Résultats des tests effectués sur les séries courtes des stations de Burkina Faso

Station	Test caractère aléatoire(hypothèse : série aléatoire)	Tests de détection de rupture (hypothèse : absence de rupture)			
		Rang	Buishand	Pettitt	Lee&Heghinia n
<b>Ouahigouya</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• acc3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• rej3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• acc3</li> </ul>	d = 0.2168 P = 1987	Début Fin 1971 1990 pas de rupture
<b>Boromo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• acc3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• acc3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• acc3</li> </ul>	d = 0.1086 P = 1988	Début Fin 1971 1990 pas de rupture
<b>Bobo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• rej3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• rej3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• acc3</li> </ul>	d = 0.1510 P = 1986	Début Fin 1971 1990 pas de rupture
<b>Gaoua</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• acc3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• rej3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• rej3</li> </ul> P = 1976	d = 0.5014 P = 1976	P = 1976-1977
<b>Fada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rej1</li> <li>• rej2</li> <li>• rej3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rej1</li> <li>• rej2</li> <li>• rej3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rej1</li> <li>• rej2</li> <li>• rej</li> </ul> P = 1980	d = 0.9087 P = 1980	P = 1980-1981
<b>Dori</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rej1</li> <li>• rej2</li> <li>• rej3</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• rej1</li> <li>• rej2</li> <li>• rej3</li> </ul> P = 1980		P = 1980-1981
<b>Ouaga</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• acc2</li> <li>• acc3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acc1</li> <li>• rej2</li> <li>• rej3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rej1</li> <li>• rej2</li> <li>• rej3</li> </ul> P = 1978	d = 0.7659 P = 1978	P = 1978-1979

Toutes les séries suivent la loi normale sauf celle de Dori.

### IV.3.3 Validation des résultats obtenus sur les séries courtes

Les résultats seront d'autant meilleurs que les séries sont longues (supérieures ou égales à 30). Ce pendant, dans notre cas, les séries longues et courtes des stations de Ouagadougou et Bobo-dioulasso aboutissent à des résultats semblables, ce qui laisse supposer que les résultats obtenus sur des séries de 20 ans sont relativement acceptables. La seule différence se situe au niveau de la rupture détectée à Bobo-dioulasso qui apparaît en 1986 dans la série courte.

### IV.4 Conclusion

L'examen des résultats montre le caractère aléatoire de toutes les séries sauf les séries de Dori et Fada. Ces deux séries seront caractérisées par une tendance générale qui est l'hypothèse alternative reconnue du test. La figure 9 montre que cette tendance est à la baisse.

Les ruptures sont signalées au niveau des stations de Fada, Dori et Ouagadougou..

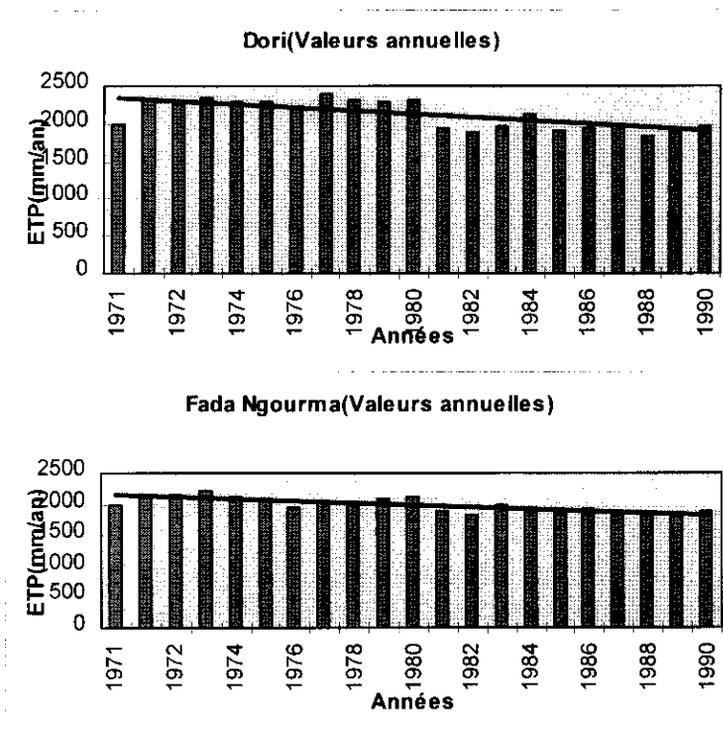


Figure N°9 : Courbe de tendance

## CONCLUSION GENERALE

La méthode de Penman a été un outil indispensable pour estimer l'évapotranspiration potentielle de la zone d'étude. Cette formule s'adapte aussi bien dans le contexte Africain qu'ailleurs. Malgré qu'elle nécessite un grand nombre de données de base et disposer de toutes ces données est souvent onéreux, il n'en demeure pas moins qu'elle est la seule fondée sur une base scientifique indiscutable. Les difficultés d'estimer l'ETP Penman résultent des coefficients correctifs (Albédo, d'Angström, C) à appliquer. L'imprécision sur ces derniers peut entraîner une erreur de l'ordre de 35% sur l'évaluation du rayonnement solaire. C'est pourquoi il est capital de régionaliser d'abord ces coefficients qui sont caractéristiques d'une zone donnée et de son microclimat afin d'établir de meilleures cartes ETP.

Comparée à la variation annuelle, les variations décadaires de l'ETP pour un mois et un emplacement donné sont largement supérieures. Les variations décadaires sont en rapport étroit avec les fluctuations des conditions météorologiques saisonnières qui sont importantes. D'autre part la valeur annuelle totale varie quelque peu d'une année à l'autre pour de nombreux climats, car elle dépend surtout de l'énergie solaire. L'ordre de grandeur de cette variation est de 10 à 25%.

Dans la zone étudiée, la répartition spatiale de l'ETP en toute saison, présente un gradient croissant régulièrement de Sud jusqu'aux environs du 20<sup>ème</sup> parallèle de latitude Nord. Les moyennes mensuelles varient entre 100 et 250mm.

Les distributions l'ETP Penman annuelle sont normales pour l'ensemble des stations étudiées sauf pour la station de Dori.

Les séries chronologiques de l'ETP étudiées présentent un caractère aléatoire exceptées les séries de Dori et de Fada Ngourma. Ces deux séries sont caractérisées par une tendance à la baisse. Et enfin des points de rupture ont été signalés au niveau des stations de Fada (1980), de Ouagadougou (1978). et de Dori (1976 à un seuil de confiance faible)

**REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :**

**Dirk RAES, B. Sy.** 1992. Analyse de la pluviométrie et de l'évapotranspiration potentielle de la zone du Fleuve Sénégal. Projet de gestion de l'eau. Coopération scientifique KULeuven - SAED. Bulletin technique N°5. Saint-Louis, Sénégal. 67p.

**H. Hubes, J.M. Masson, E. Servat, J.E Paturel, B. Kouamé, J.F. Boyer.** 1994. Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par application des tests statistiques. Etude bibliographique. Programme ICCARE. Rapport N°3 - ORSTOM - DC UR2. Montpellier, France.21p.

**J. Doorenbos, , W.O. Pruitt.**1986. Les besoins en eau des cultures. FAO, Bulletin d'irrigation et de drainage N°24. Rome, Italy. 198p.

**L. Lemoine, J.C. Prat.** 1972. Cartes d'évapotranspiration Potentielle. Notice Générale. Série climatique - CIEH. Ouagadougou, Haute Volta. 22p.

**M.L. Compaoré.** 1998. Les données de base de l'irrigation. Polycopié du cours EIER. 2<sup>ème</sup> édition.

**N. André, F. Clauss,D. Minot, H. Piaton, E. Cagneaux.** 1989. Etude régionale de L'évapotranspiration potentielle. Aspects méthodologiques et outils développés. Série agroclimatique CIEH. Ouagadougou, Burkina Faso. 83p.

**R. Morel,** 1992. Atlas agroclimatique es pays de la zone du CILSS. Notice. Coopération Française. Programme AGHRYMET. Niamey, Niger.

# ANNEXES

**Annexe 1 : Variation saisonnière**

**Annexe 2 : Techniques de tests statistiques**

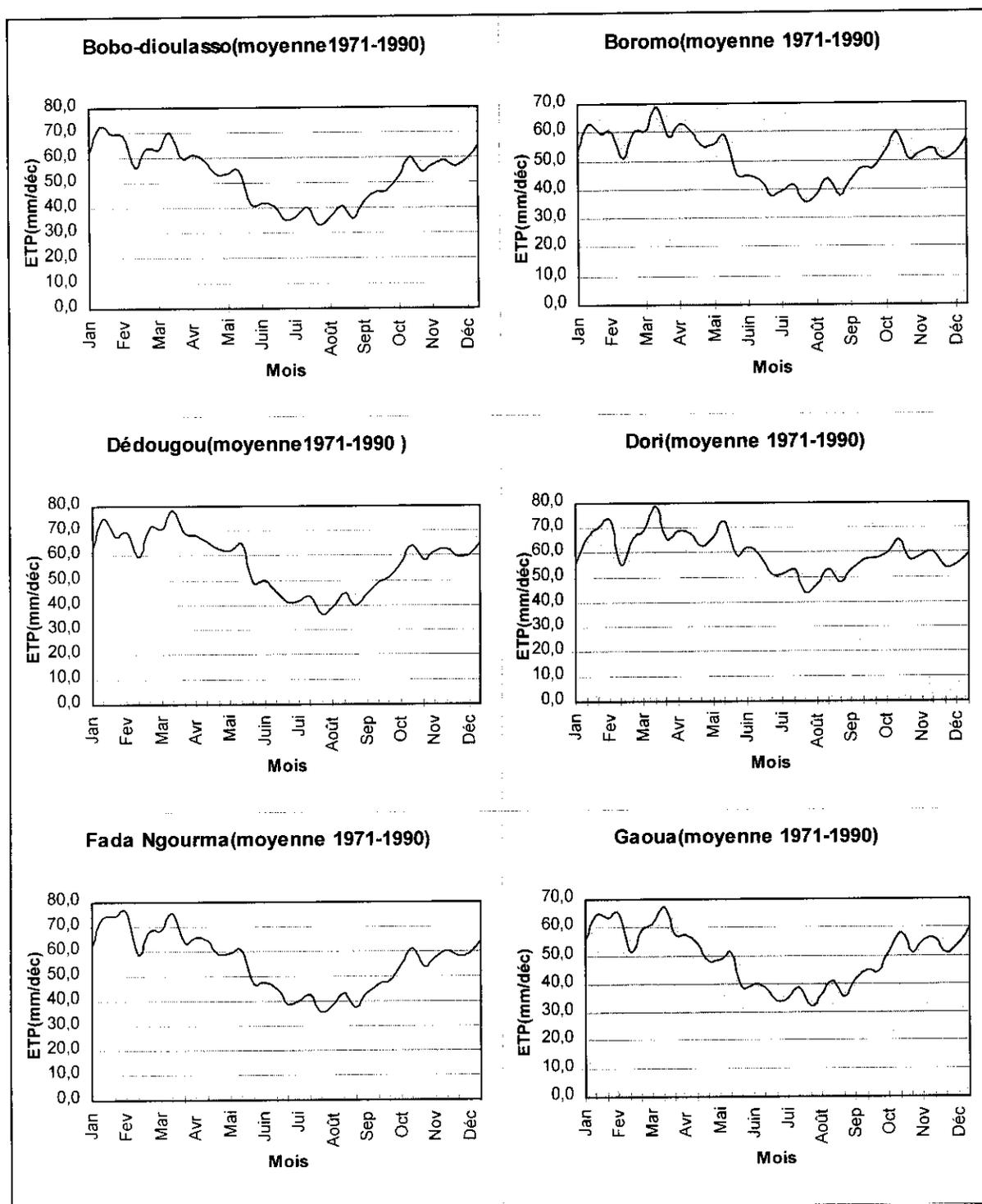
**Annexe 3 : coefficients d'Angström**

**Annexe 4 : Résultats des tests statistiques(Ouagadougou et Bobo-dioulasso)**

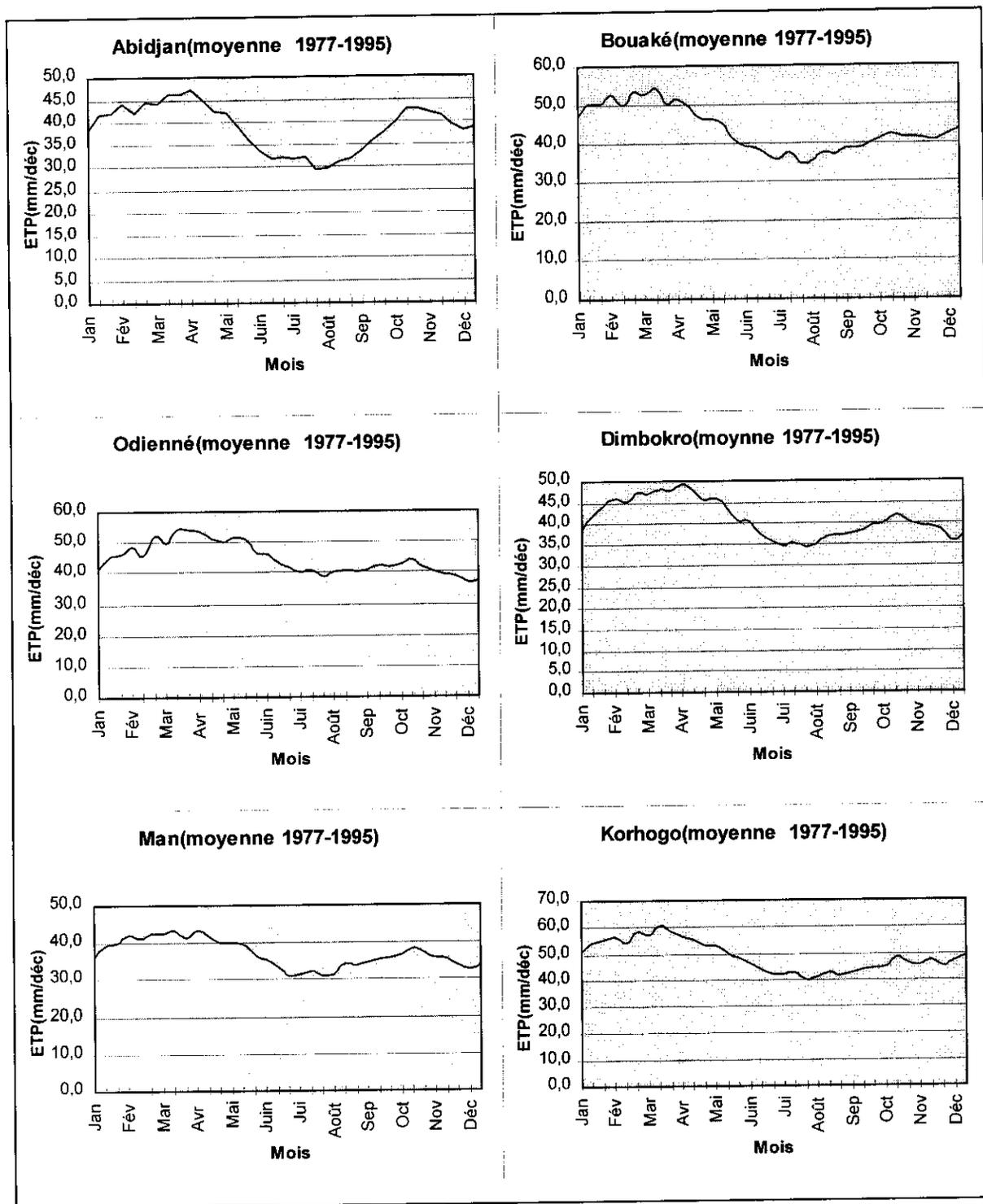
**Annexe 5 : Cartes mensuelles d'évapotranspiration potentielle**

## **ANNEXE 1 : VARIATION DECADAIRE**

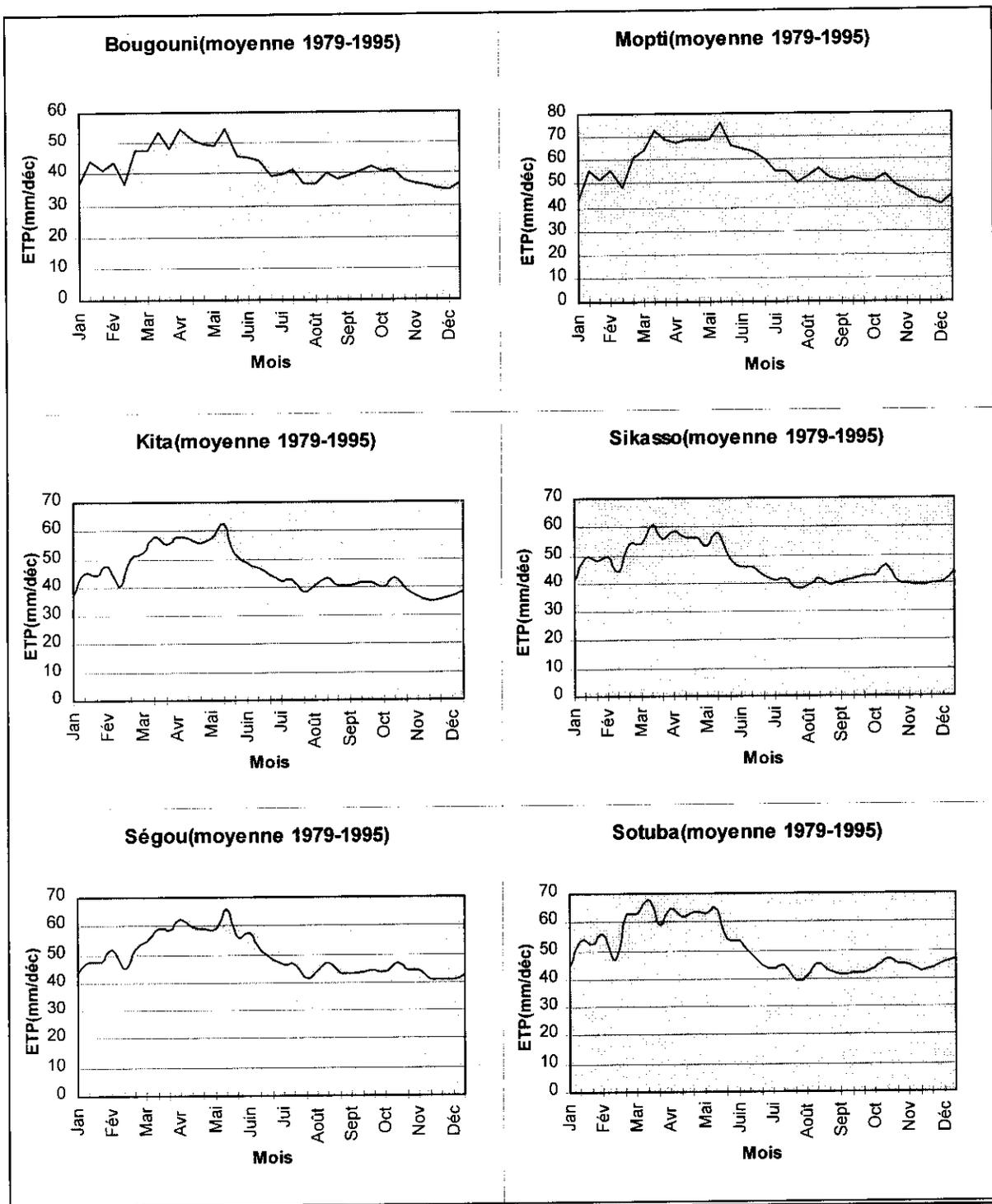
**Figure 1 : BURKINA FASO (variation décadaire de l'ETP)**



**Figure 2 : COTE D'IVOIRE (variation décadaire de l'ETP)**

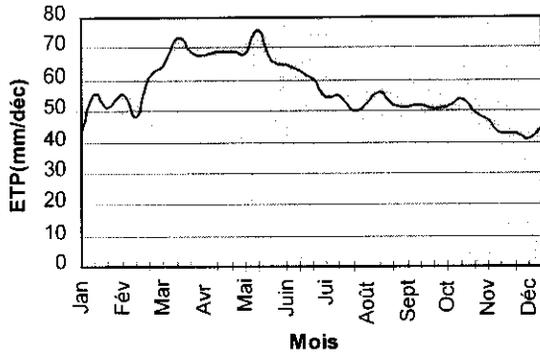


**Figure 3 :MALI (variation décadaire de l'ETP)**

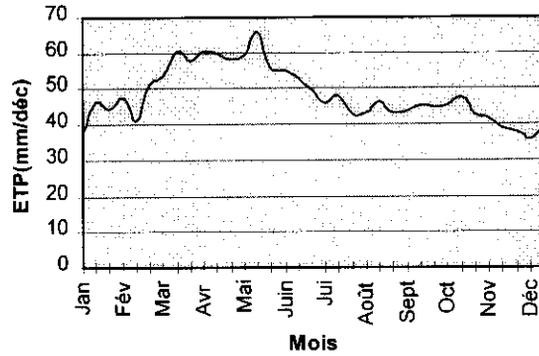


**(Suite Figure 3 : Mali)**

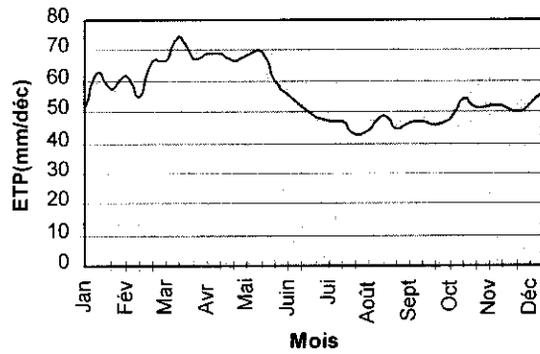
**Mopti(moyenne 1979-1995)**



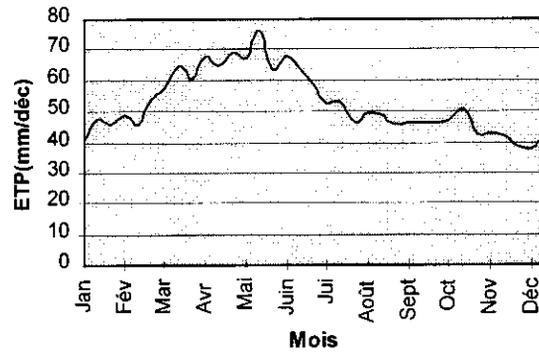
**San(moyenne 1979-1995)**



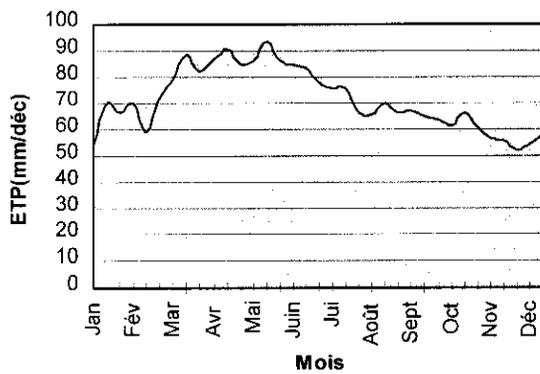
**Bamako-senou(moyenne 1979-1995)**



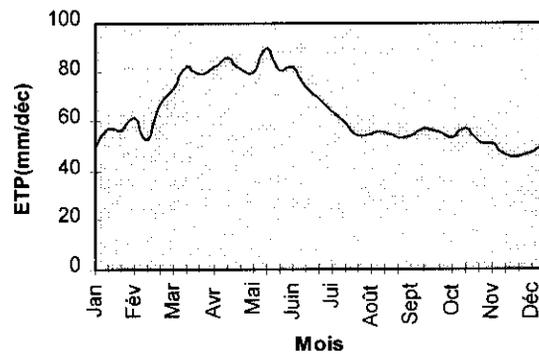
**Kayes(moyenne 1979-1995)**



**Gao(moyenne 1979-1995)**



**Nioro(moyenne 1979-1995)**



## **ANNEXE 2 : TECHNIQUES DE TESTS STATISTIQUES**

## **1. Test de caractère aléatoire**

Ces tests portent sur la constance de la moyenne de la série tout au long de sa période d'observations. Ces tests sont en générale très puissants pour faire une distinction entre le caractère aléatoire et le caractère non aléatoire de la série. Certains permettent d'identifier une alternative à la constance du type tendance, discontinuité brutale, oscillations. D'autres sont relativement puissants vis à vis d'une alternative spécifique, qui le plus souvent relève d'une alternative d'un changement brutal.

### **Test de corrélation sur le rang (Kendall et Stuart, 1943 ; WMO, 1966)**

Ce test se propose de calculer le nombre de paires  $P$  pour lesquelles  $X_j > X_i$ ,  $j > i$ , avec

$i = 1, \dots, N-1$ .

$$\tau = 1 - \frac{4Q}{N(N-1)} \quad \text{avec} \quad Q = \frac{N(N-1)}{2} - P$$

suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance égale à

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(2N+5)}{9N(N-1)}$$

Il résulte que l'hypothèse nulle est vraie, la variable  $U = \tau/\sigma_\tau$  est une variable normale réduite.

Pour un risque  $\alpha$  de première espèce donné, la région d'acceptation de l'hypothèse est comprise entre :

$$- U_{1-\alpha/2} \sigma_\tau \quad \text{et} \quad U_{1-\alpha/2} \sigma_\tau$$

L'hypothèse alternative reconnue de ce test est celle de la tendance.

Lorsque l'on s'intéresse directement de la distribution asymptotique de la variable  $P$ , ce test porte le nom de Mann-kendall. Les deux formulations sont équivalentes.

## 2. Test de détection de ruptures

Une rupture peut être définie de façon général par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu.

### **Test de Mann-Whitney (PETTITT, 1979 ; CERESTA, 1986)**

Le test de Mann-Whitney est le suivant ( Ceresta, 1986).

La série étudiée est divisée en deux sous-échantillons respectivement de taille m et n.

Les valeurs des deux échantillons sont regroupés et classées par ordre croissant. On calcul alors la somme des rangs des éléments de chaque sous-échantillon dans l'échantillon total. Une statistique est définie à partir des deux sommes ainsi déterminées, et testée sous l'hypothèse nulle d'appartenance des deux sous échantillons à la même population.

La formulation du test de Mann-Whitney modifiée par Pettitt (Pettitt, 1979) est la suivante :

L'hypothèse nulle du test est l'absence de rupture dans la série.

La mise en oeuvre du test suppose que pour tout instant t variant de 1 à N, les séries  $(X_i)$ ,  $i = 1, t$  et  $(X_j)$ ,  $i = t+1, N$  appartiennent à la même population.

Soit  $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$  avec  $\text{sgn}(X) = 1$  si  $X > 0$ , 0 si  $X < 0$ .

On considère la variable  $U_{t,N}$  telle que :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

Soit  $K_N$  la variable définie par le maximum en valeur absolue de  $U_{t,N}$  pour t variant de 1 à N-1.

Si k désigne la valeur de  $K_N$  prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par :

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6k^2 / (N^3 - N^2))$$

Pour un risque  $\alpha$  de première espèce donné, si  $\text{Prob}(K_N > k)$  est inférieure à  $\alpha$ , l'hypothèse nulle est rejetée.

## **Statistique U (BUISHAND, 1982, 1984)**

Ce test fait référence au modèle simple :

$$x_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i=1, \dots, m \\ \mu + \Delta + \varepsilon_i, & i=m+1, \dots, n \end{cases}$$

Les  $\varepsilon_i$  sont des variables aléatoires normales de moyenne nulle et de variance commune inconnue  $\sigma^2$ . Le point de rupture  $m$  et les paramètres  $\mu$  et  $\Delta$  sont inconnus.

Plusieurs méthodes statistiques ont été développées pour tester l'hypothèse nulle  $\Delta = 0$  contre l'hypothèse alternative  $\Delta \neq 0$ .

On s'intéresse aux termes de cumul d'écart suivants :

$$S^*_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \text{ pour } k = 1, \dots, N$$

$$S^*_0 = 0$$

$\bar{x}$  est la moyenne des valeurs  $x_1, x_2, \dots, x_N$

$S^*_k$  est tel que :

$$E(S^*_k) = -k(N-1)N^{-1}\Delta, k = 1, \dots, m$$

$$E(S^*_k) = -m(N-k)N^{-1}\Delta, k = m+1, \dots, N$$

$$E(S^*_k) = -k(N-k)N^{-1}\sigma^2, k = 0, \dots, N$$

On observe que la moyenne des  $S^*_k$  est nulle pour une série homogène ( $\Delta=0$ ), positif pour  $\Delta < 0$  et négatif pour  $\Delta > 0$ . La variance est maximale si  $k = N/2$ . Même pour une série purement aléatoire, les valeurs de  $S^*_k$  peuvent différer considérablement de zéro, spécialement pour  $k$  au voisinage de  $N/2$ .

Le test ici présenté est de nature Bayésienne.

En supposant une distribution à priori uniforme pour la position du point de rupture  $m$ , la statistique  $U$  est définie par :

$$U = [N(N+1)]^{-1} \sum_{k=1}^{N-1} (S^*_k / D_x)^2$$

Des valeurs critiques de la statistique U sont données par Buishand(1982) à partir d'une méthode de Monte Carlo.

### **Ellipse de contrôle**

On rappelle ci-après le modèle de base

$$x_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i=1, \dots, m \\ \mu + \Delta + \varepsilon_i, & i=m+1, \dots, n \end{cases}$$

Les  $\varepsilon_i$  sont des variables aléatoires normales de moyenne nulle et de variance commune inconnue  $\sigma^2$ . Le point de rupture m et les paramètres  $\mu$  et  $\Delta$  sont inconnus. L'hypothèse nulle est  $\Delta=0$ .

Soit par ailleurs la définition des variables suivantes :

$$S^*_k = \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2 \text{ pour } k = 1, \dots, N$$

$\bar{x}$  est la moyenne des valeurs des valeurs  $x_1, x_1, \dots, x_N$

$S^*_k$  est telle que

$$E(S^*_k) = -k(N-1)N^{-1}\Delta, k = 1, \dots, m$$

$$E(S^*_k) = -m(N-k)N^{-1}\Delta, k = m+1, \dots, N$$

$$E(S^*_k) = -k(N-k)N^{-1}\sigma^2, k = 0, \dots, N$$

Sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série, la variable  $Sk^*$  suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance

$$k(N-k)N^{-1}\sigma^2, k = 0, \dots, N.$$

$\sigma^2$  inconnue est remplacée par son estimateur à partir de la série étudiée.

Il en résulte que sous l'hypothèse nulle, la variable  $Sk^*$  suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance approximative.

$$k(N-k)(N-1)^{-1} D_x^2, k = 0, \dots, N \text{ avec } D_x^2 = N^{-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

Il est possible de définir une région de confiance contenant pour un seuil de confiance donné, sous l'hypothèse nulle, la série de  $Sk^*$ . Pour un seuil de confiance  $1-\alpha/2$  donné, sous l'hypothèse nulle, la région de confiance est définie par :

$$\pm \frac{U_{1-\alpha/2} \sqrt{k(N-k)}}{\sqrt{(N-1)}} D_x. U \text{ désigne la variable normale réduite. Cette région de}$$

confiance et un nombre maximum admissible de points hors de l'ellipse pour que la série étudiée soit déclarée homogène peut être estimée par simulation, comme cela a déjà été fait pour les résidus d'une régression (Bois, 1971 ; 1986).

### ANNEXE 3 : COEFFICIENTS D'ANGSTRÖM

**Tableau 2** : Quelques constantes déterminées expérimentalement en Afrique de l'ouest

Sources	Emplacement	Constantes		Latitude (°)
		A	B	
<u>Cité par Lingare(1967)</u>				15 N
Page(1961)	Dakar, Sénégal	0,10	0,70	12 N
Davis (1965)	Kano, Nigeria	0,26	0,54	7 N
Stanhill (1963)	Nigeria	0,26	0,38	6N
Davis (1965)	Accra, Ghana	0,30	0,37	
<u>Etudes à multiples amplacements</u>				-
Glover et McCulloch(1958)	0 - 60°	0.29 cos LAT	0,52	5 - 15°
Davies(1965)	Afrique occidentale	0,19	0,60	

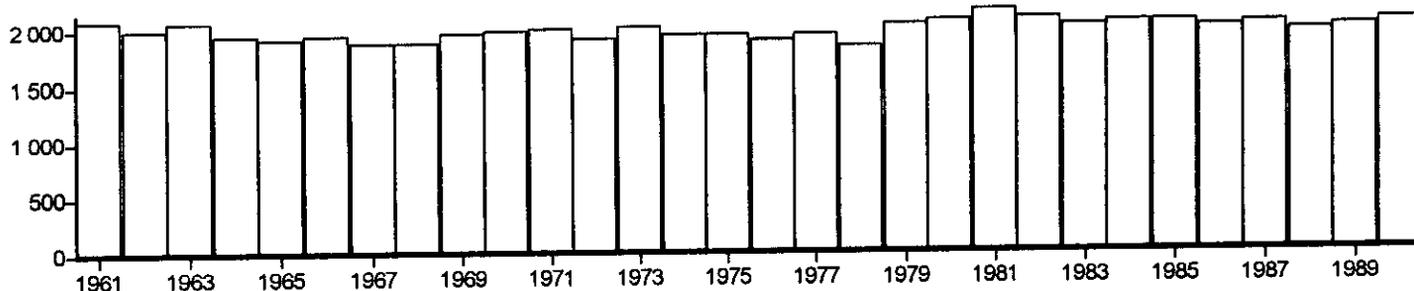
**ANNEXE 4 : RESULTAT DES TESTS STATISTIQUES(OUAGADOUGOU ET  
BOBO-DIOULASSO)**

# Analyse de séries chronologiques

\\Ouedraogo\c\Program Files\ORSTOM\ChronoStat\INPUT\Ouaga.ksi

**Identification** Ouagadougou  
**Variable étudiée** ETP annuelle  
**Unité** mm  
**Chronique de** 1961 à 1990

## Valeurs



## Tests de vérification du caractère aléatoire

### Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%  
 Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 95%  
 Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **1,6592**

## Tests de détection de rupture

### Test de BUIHAND et ellipse de contrôle

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%  
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%  
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

### Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 99%  
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 95%  
 Hypothèse nulle (absence de rupture) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Probabilité de dépassement de la valeur critique du test: **6,15E-03** en **1978**

### Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0,6357** en **1978**

### Segmentation de HUBERT

Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

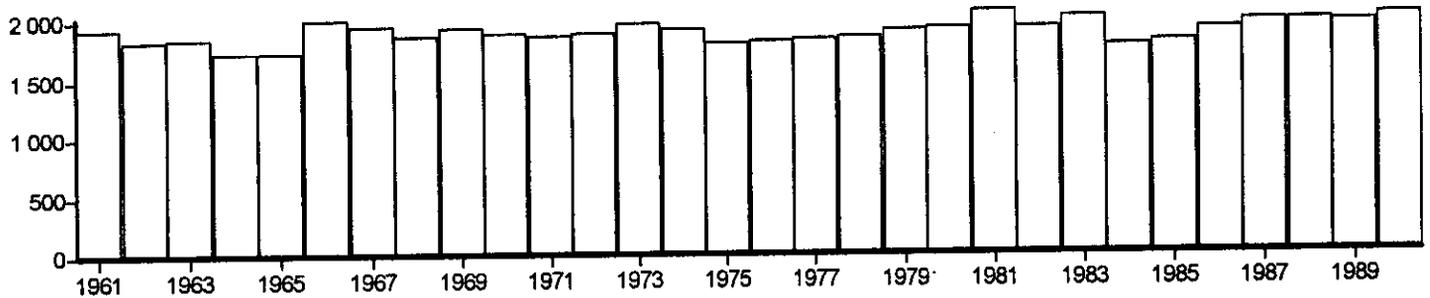
Début	Fin	Moyenne	Ecart type
1961	1963	2048,867	44,188
1964	1978	1932,947	49,074
1979	1990	2046,292	49,575

# Analyse de séries chronologiques

\\Ouedraogo\c\Program Files\ORSTOM\KronoStat\INPUT\Bobo.ksi

**Identification** Bobo-dioulasso  
**Variable étudiée** ETP annuelle  
**Unité** mm  
**Chronique de** 1961 à 1990

## Valeurs



## Tests de vérification du caractère aléatoire

### Test de corrélation sur le RANG

Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 99%  
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **acceptée** au seuil de confiance de 95%  
Hypothèse nulle (série chronologique aléatoire) **rejetée** au seuil de confiance de 90%

Valeur de la variable de calcul: **1,6592**

## Tests de détection de rupture

### Test de BUISSHAND et ellipse de contrôle

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%  
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 95%  
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 90%

### Méthode non paramétrique de PETTITT

Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 99%  
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 95%  
Hypothèse nulle (absence de rupture) **acceptée** au seuil de confiance de 90%

### Méthode bayésienne de LEE et HEGHINIAN

Mode de la fonction densité de probabilité *a posteriori* de la position du point de rupture: **0,1703** en 1965

### Segmentation de HUBERT

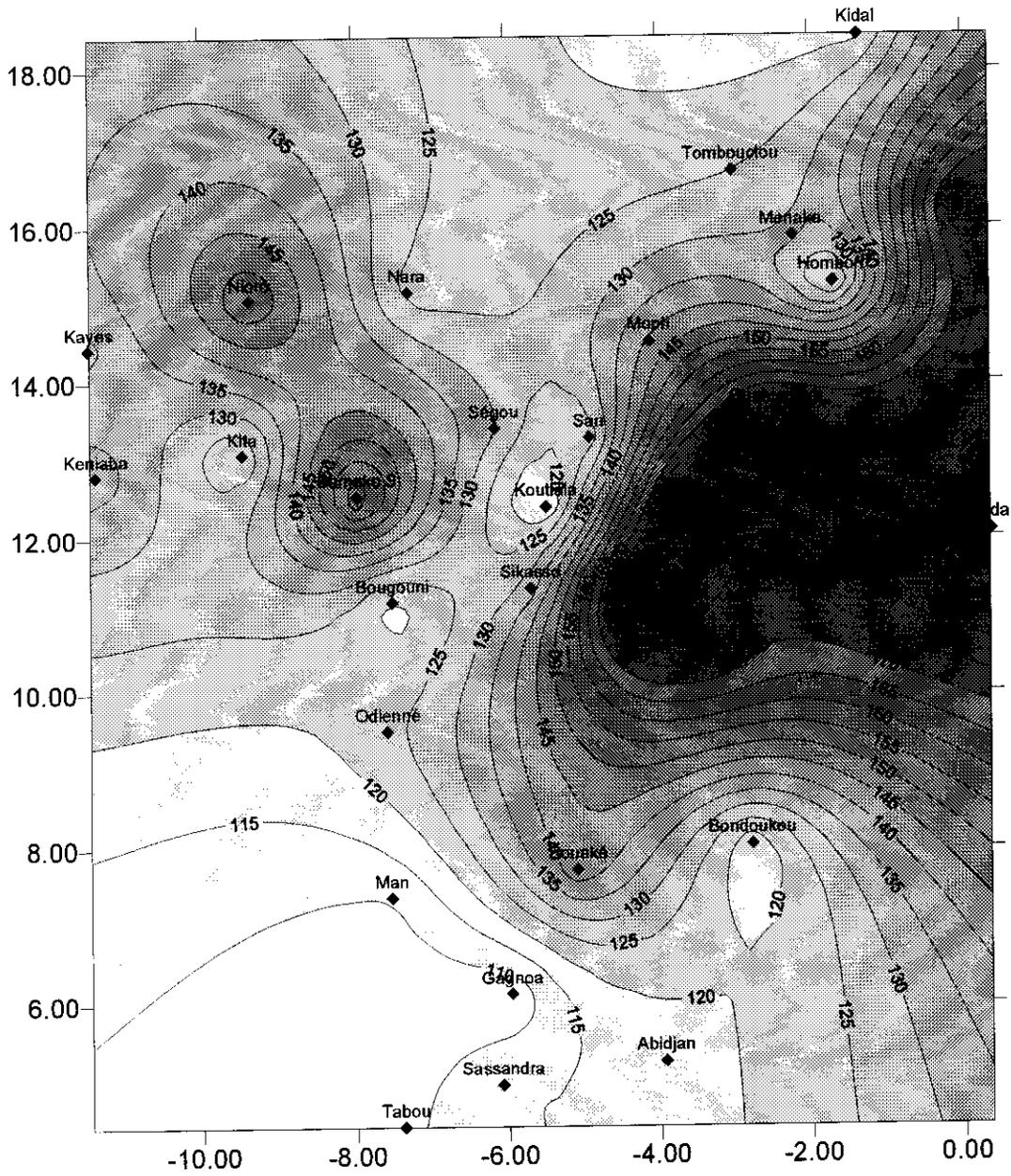
Niveau de signification du test de Scheffé: **1%**

Début	Fin	Moyenne	Ecart type
1961	1990	1897,777	82,041

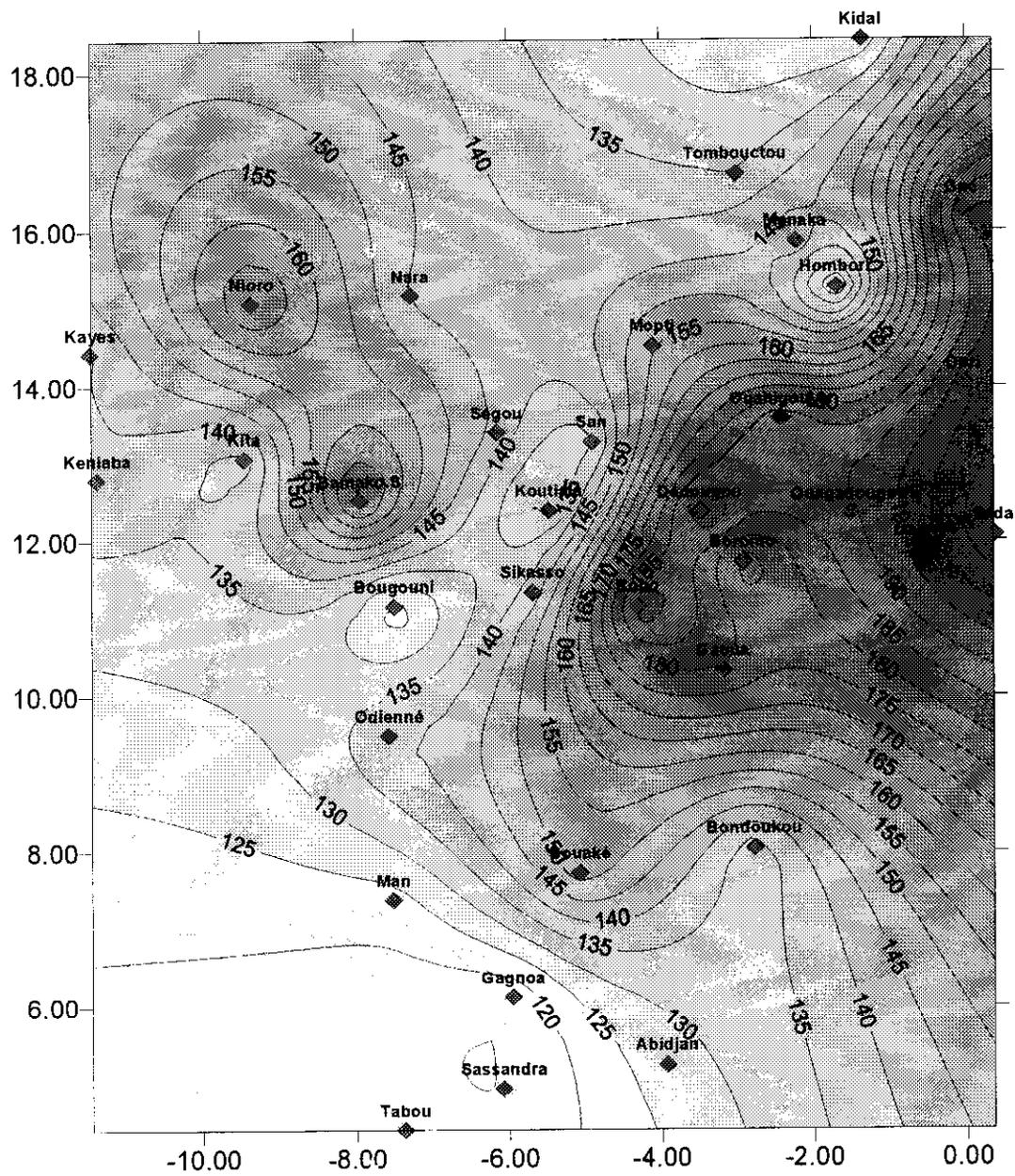
**ANNEXE 5 : CARTES MENSUELLES D'EVAPOTRANSPIRATION  
POTENTIELLE**

**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Janvier**

Source: FAO, 1980

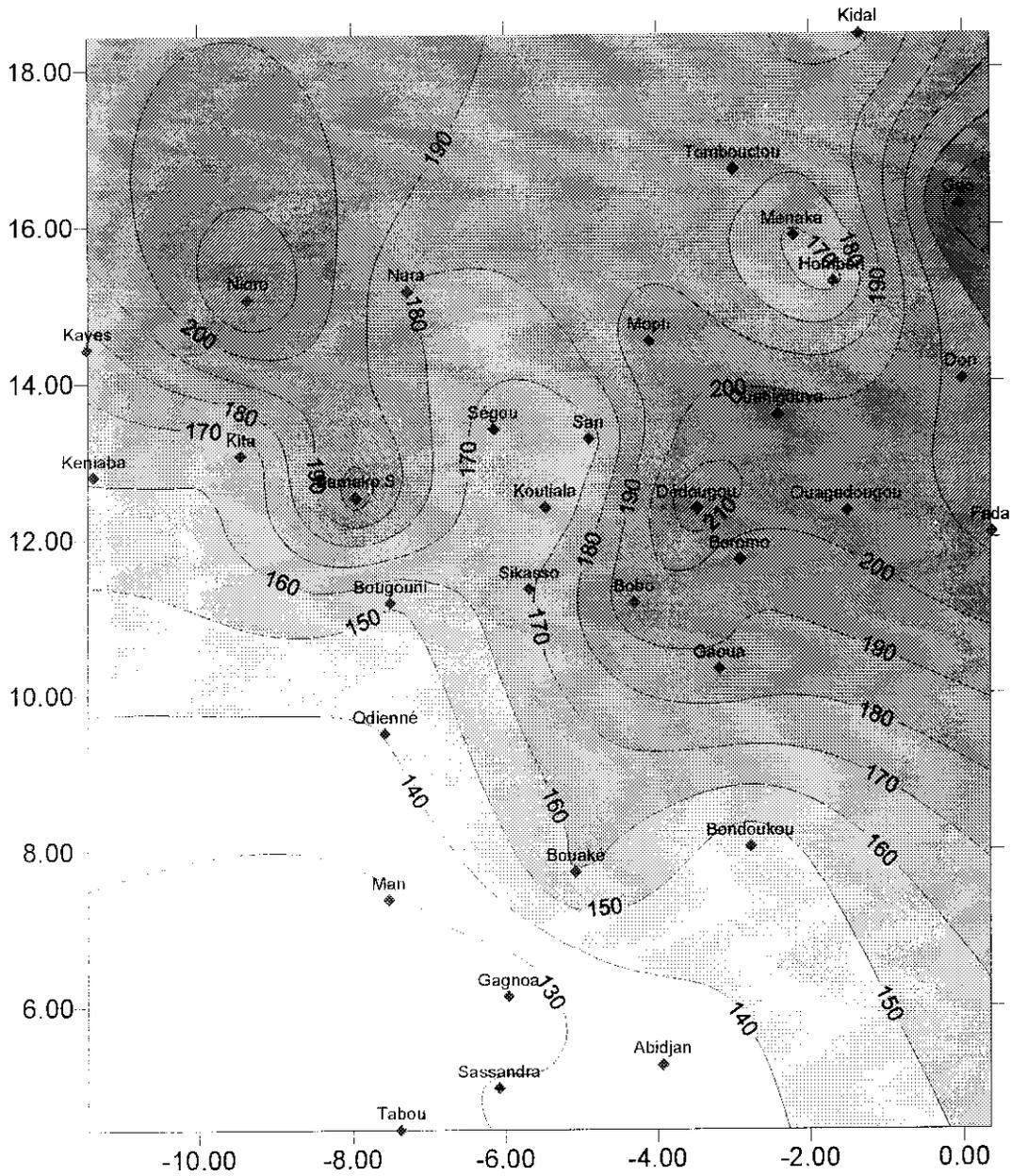


**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Février**  
 D'après la formule de Penman



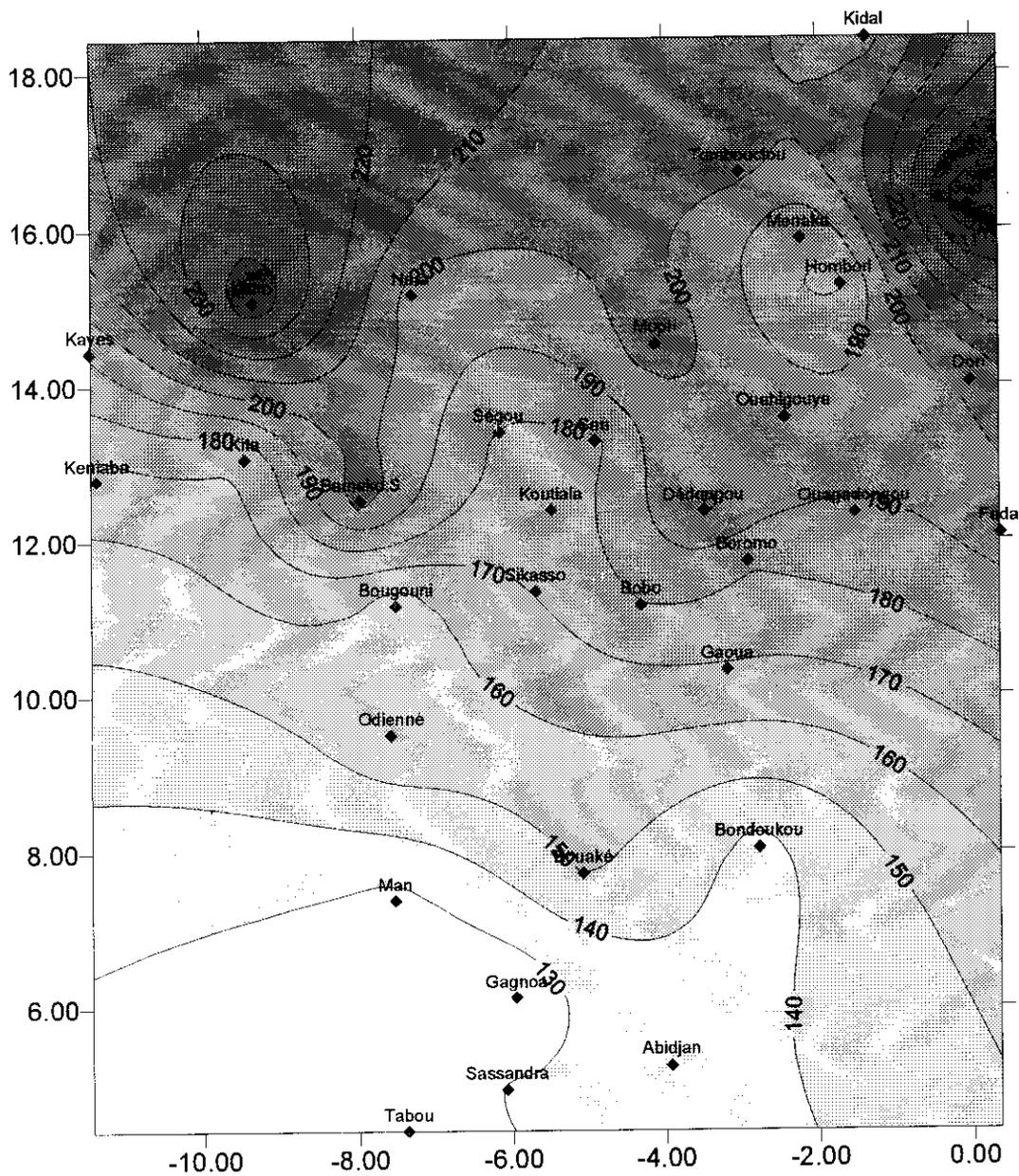
**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Mars**

d'après la Formule Thornthwaite



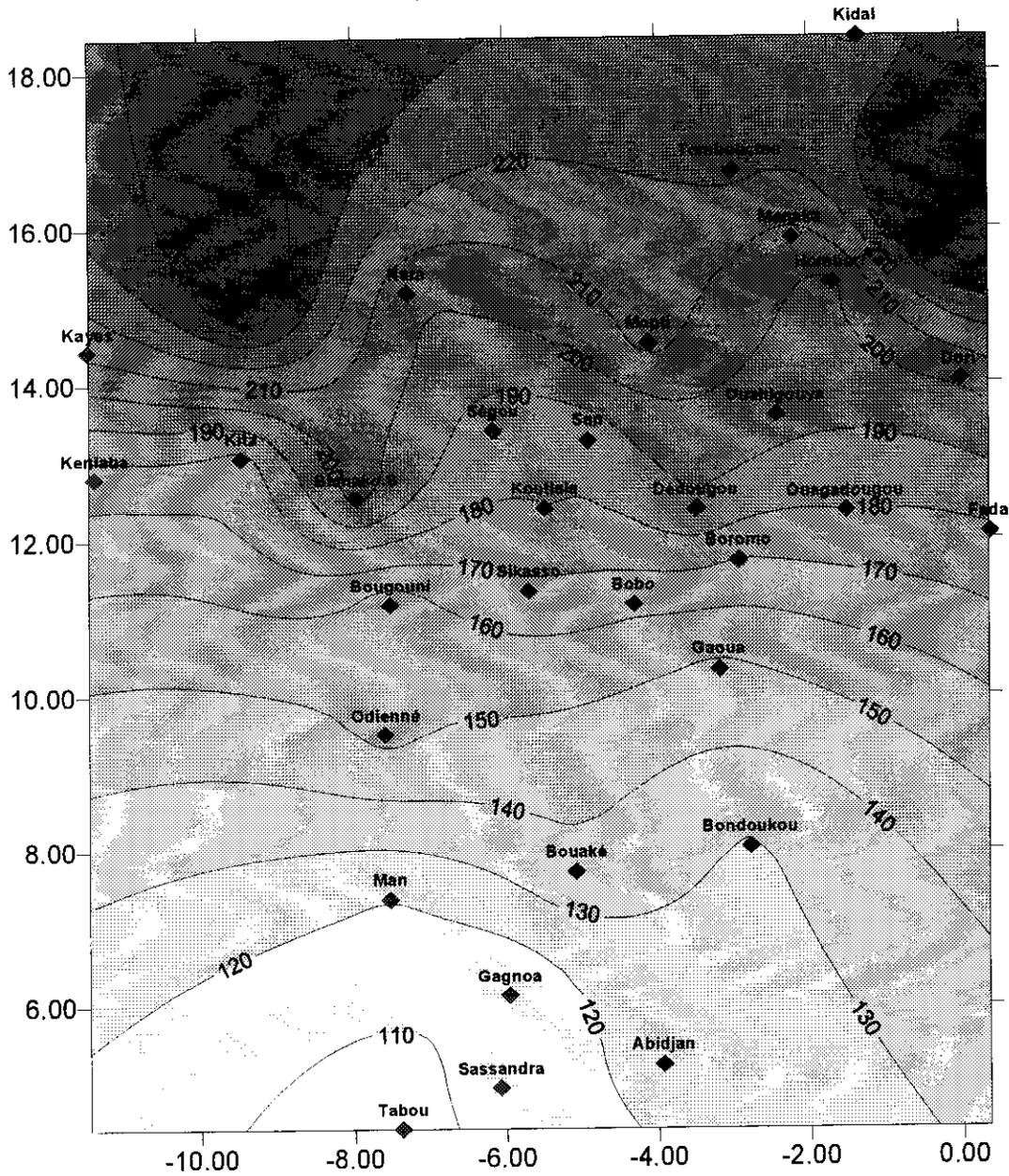
**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Avril**

D'après la formule Penman



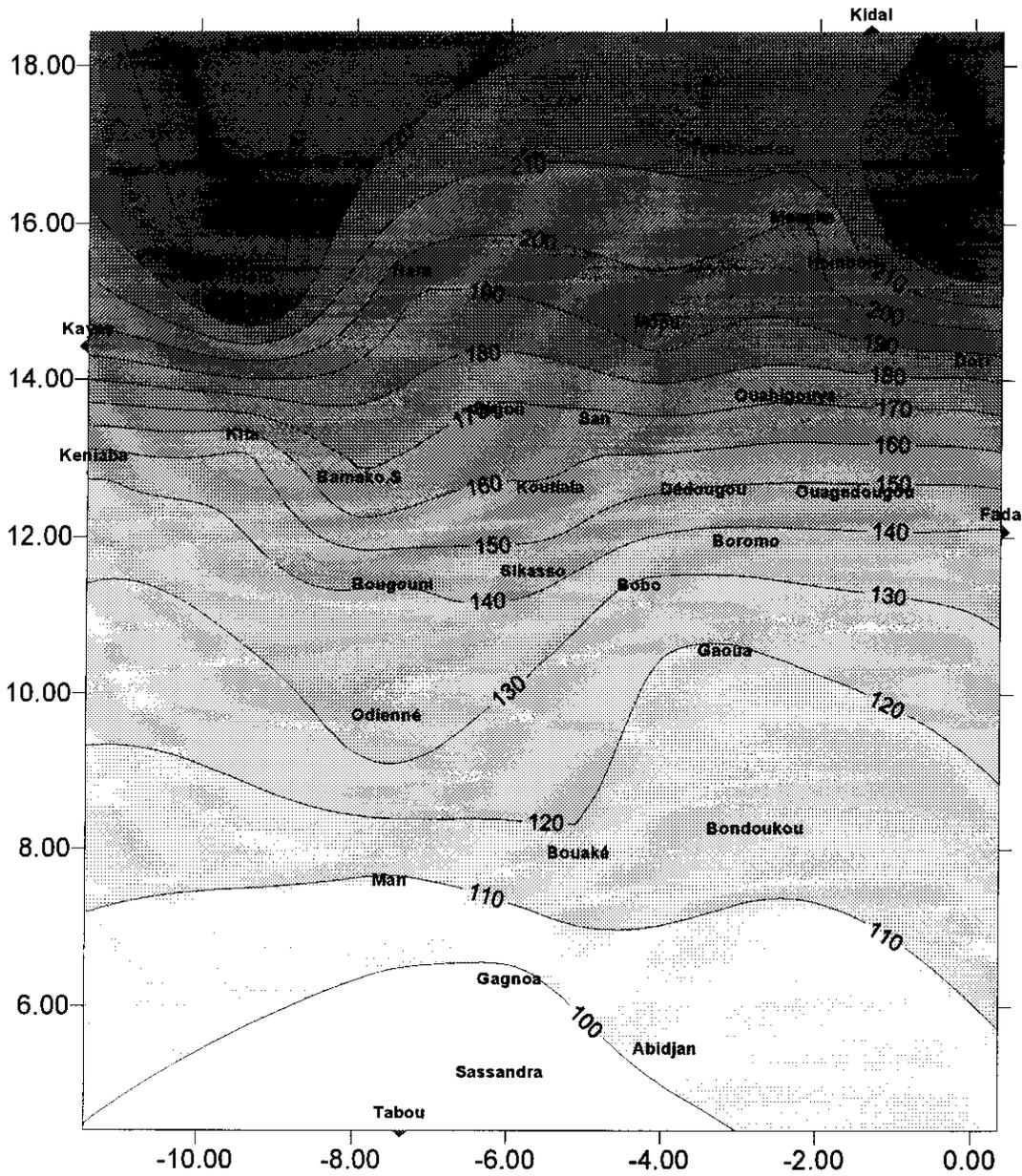
**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Mai**

D'après la formule de Penman

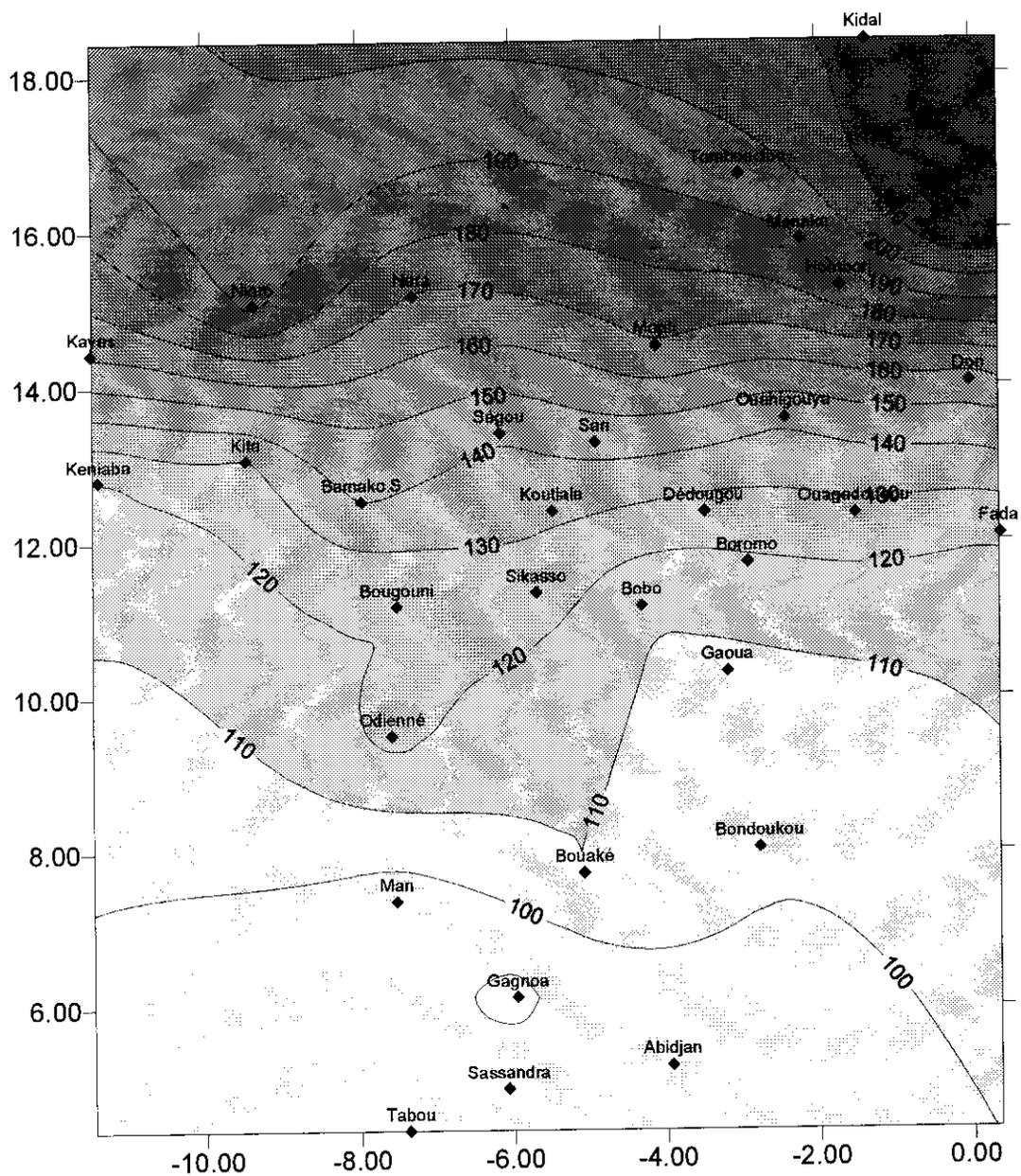


**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Juin**

d'après la Formule Penman

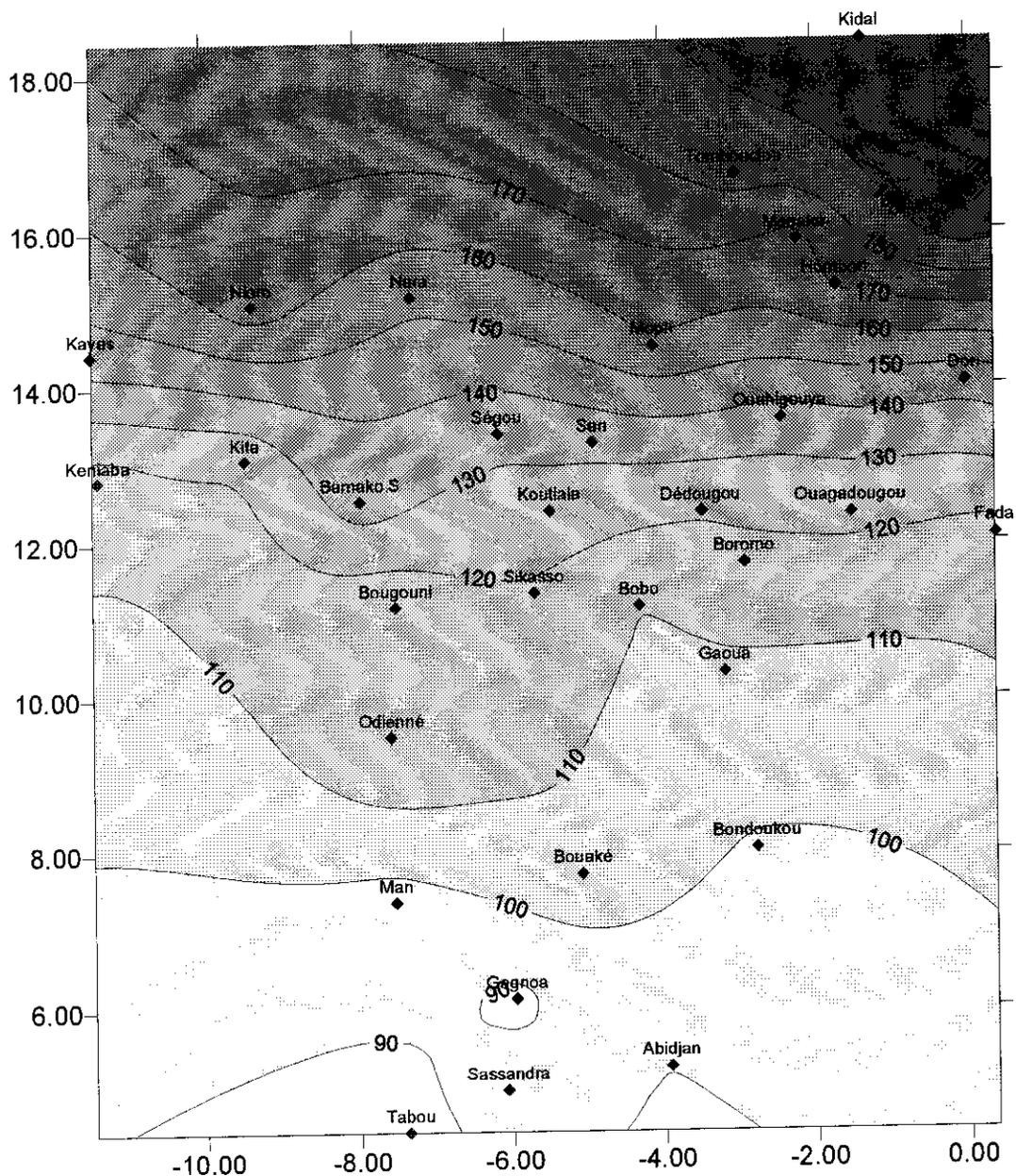


**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Juillet**  
 d'après la Formule Penman



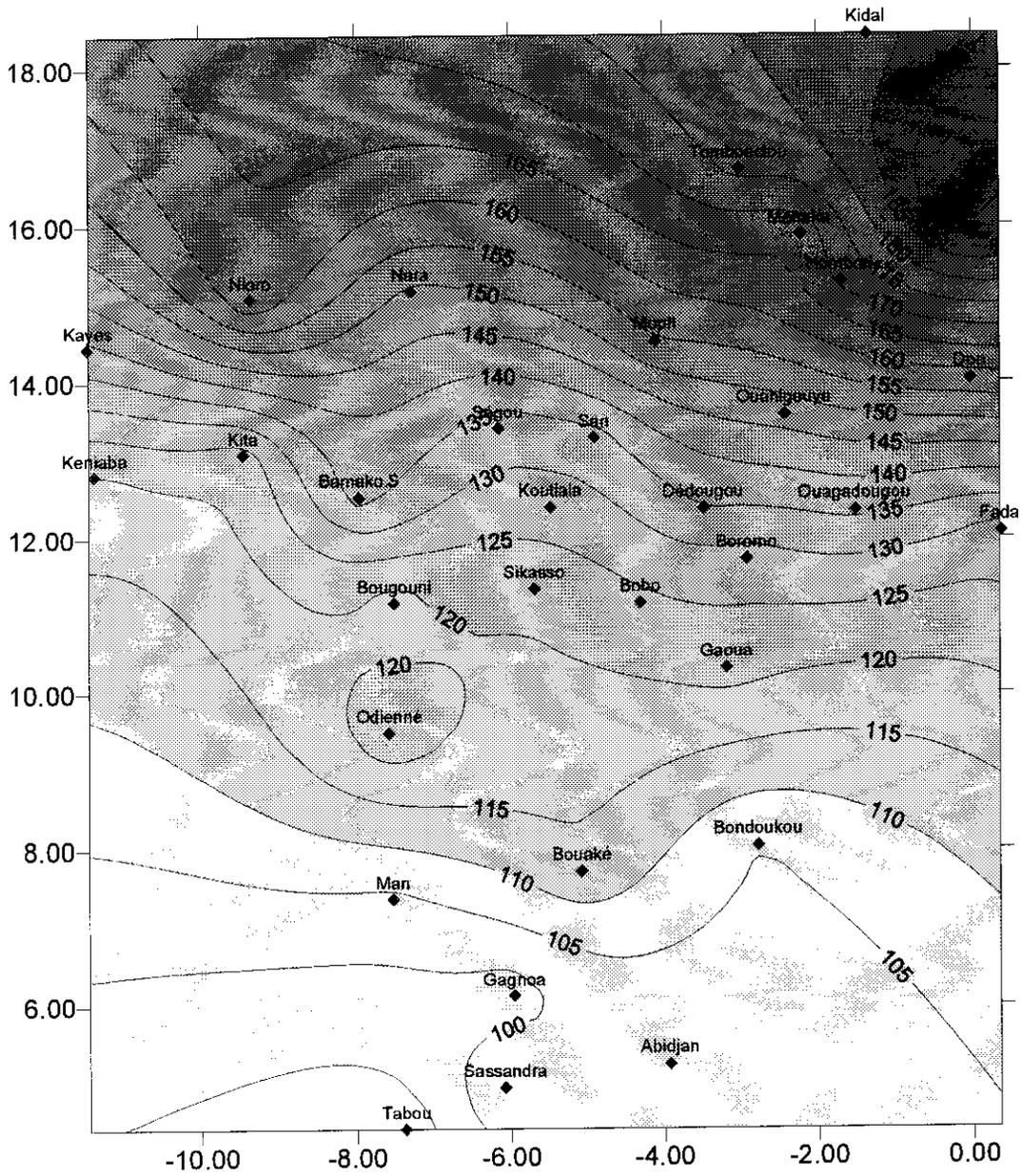
**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Aout**

Daphné Le Ferron de Penman



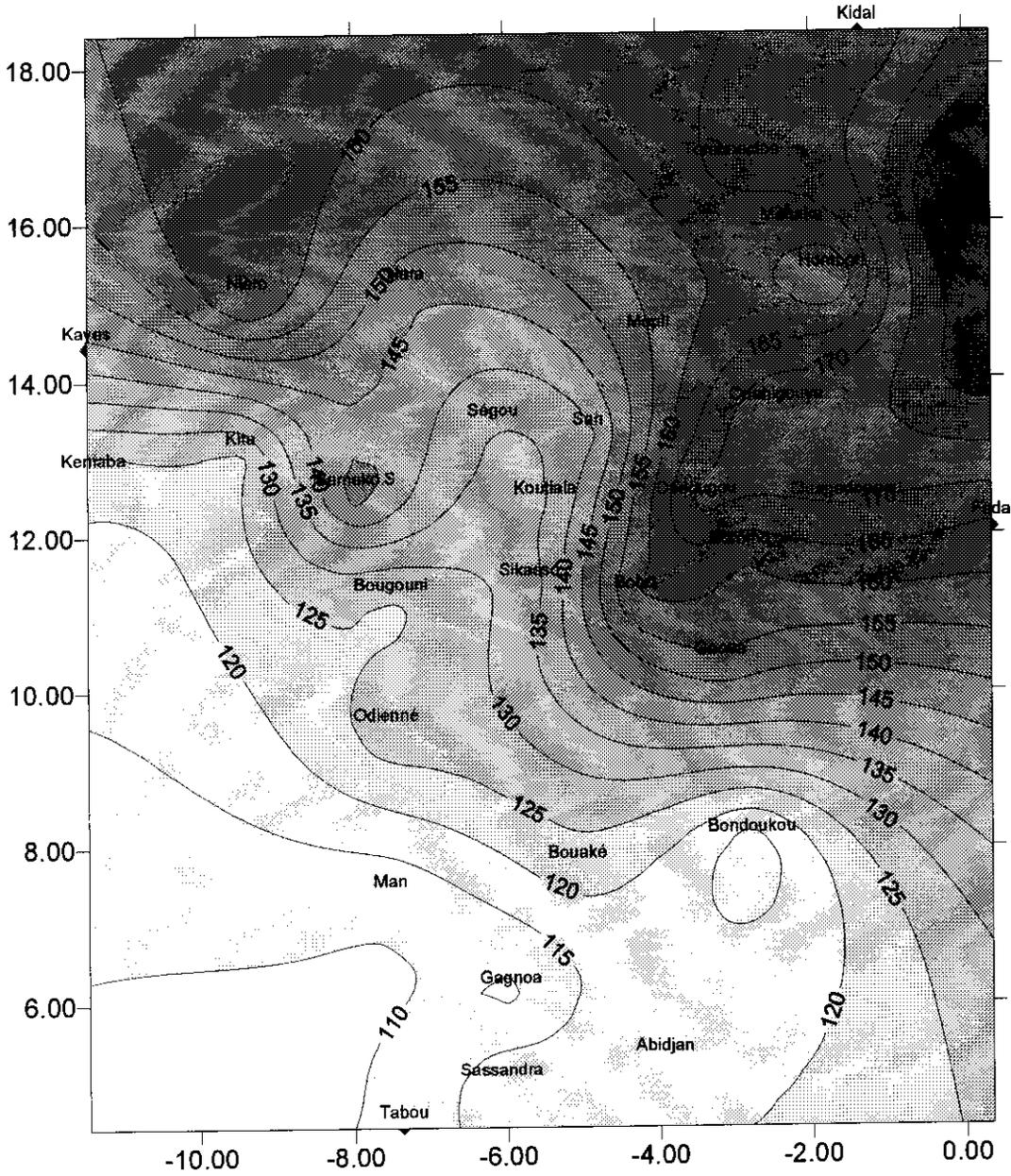
**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Septembre**

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180

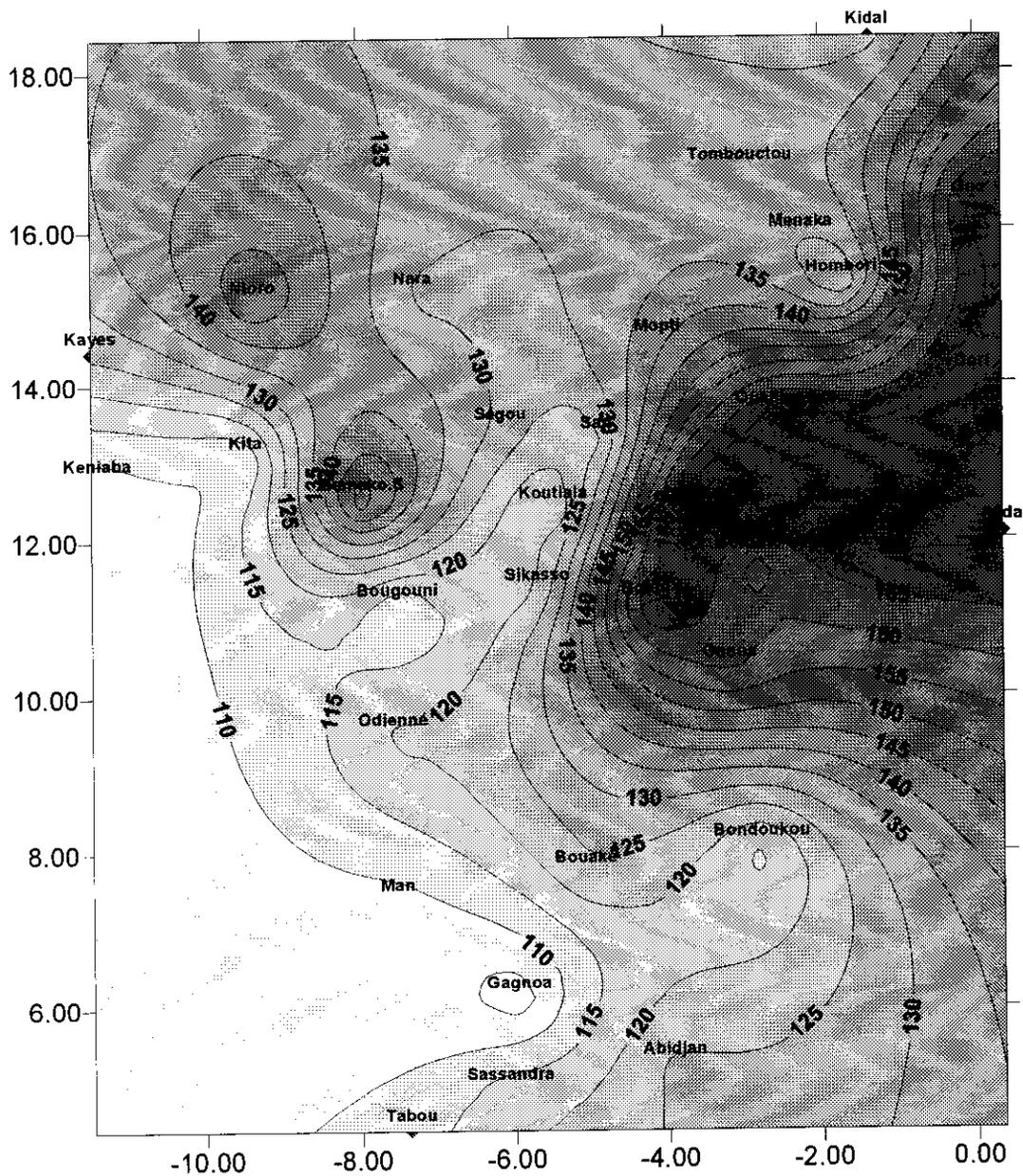


**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Octobre**

Diapne le Formula Penman

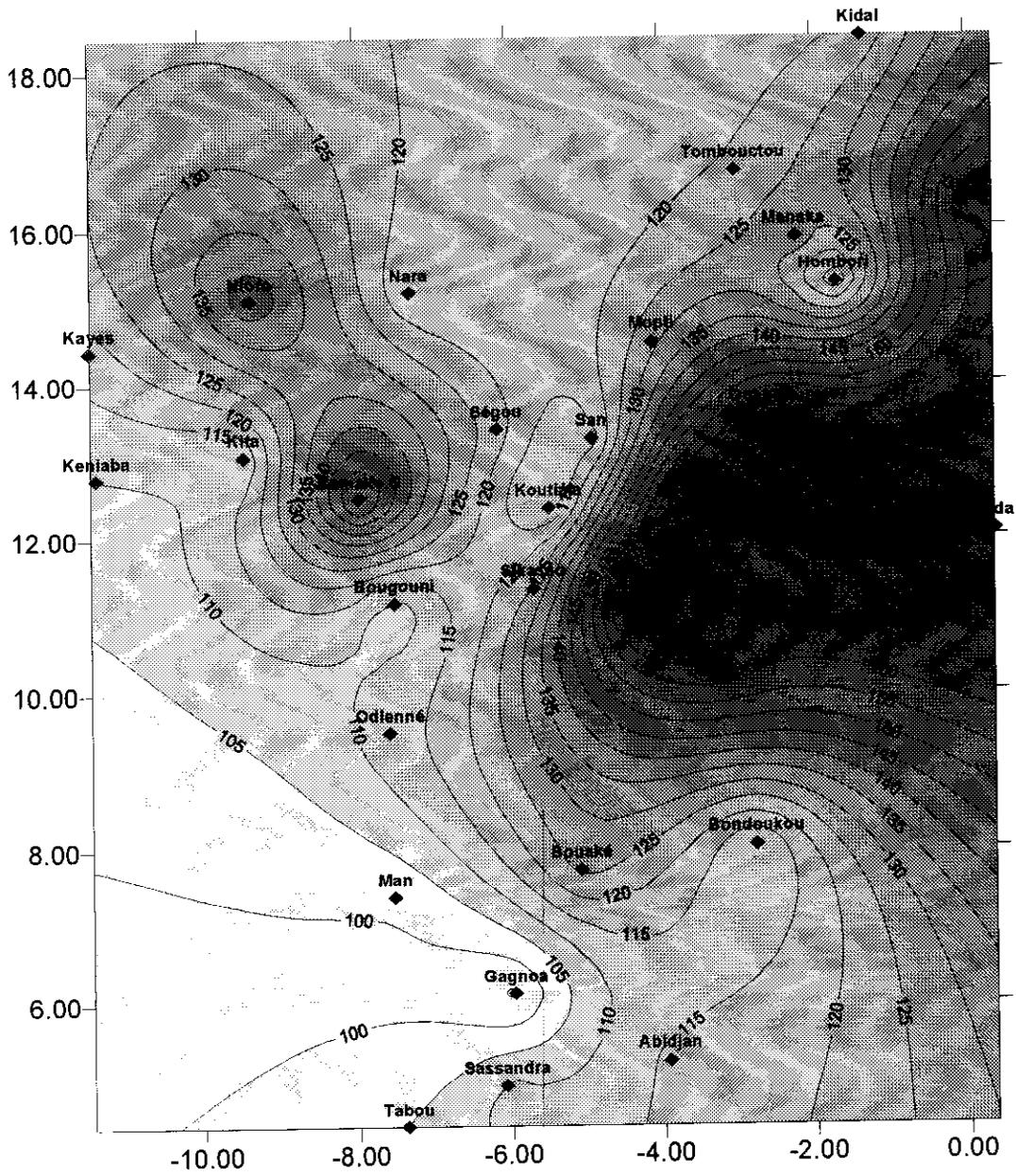


**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Novembre**  
 D'après la Formule Penman



**Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire**  
**Evapotranspiration potentielle moyenne en mm**  
**Mois de Décembre**

D'après la Formule Penman



Burkina Faso - Mali - Cote d'Ivoire  
Evapotranspiration potentielle annuelle en mm

D'après la formule Penman

