

REPUBLIQUE DU BENIN

Université d'Abomey-Calavi



Centre interfacultaire de formation
et de recherche en environnement
pour le développement durable
(CIFRED)

Faculté des sciences et techniques
Chaire UNESCO de Science,
Technologie et Environnement
(CUSTE)

Formation au diplôme de Master II

N° d'enregistrement :2007/ CIFRED/CUSTE

Option : Sciences de l'Environnement et Développement Durable

Evolution des variables météorologiques sur le haut bassin de l'Ouémé et leurs influences sur l'évapotranspiration de référence

Présenté par : Flore B. A. ROKO

Pour l'obtention du Master II de Recherche

Sous la direction de :

Professeur Michel BOKO
Directeur du CIFRED

Docteur. Sylvie GALLE
Chargée de recherche à l'IRD, LTHE

Composition du jury

- Président : Michel BOKO, Professeur Titulaire, DGAT, UAC
- Rapporteur : Sylvie GALLE, Chargée de Recherche à l'IRD, LTHE
- Examineur : Christophe HOUSSOU, Maître Assistant, DGAT, UAC
- Date de soutenance : 21 septembre 2007
- Mention : Très bien

3ème promotion



Année académique 2006-2007



DEDICACE

En mémoire de mon cher et regretté père ROKO Anselme René Koladé.

Merci pour tout l'amour que tu m'as donné.

SOMMAIRE	PAGES
Avant-Propos	v
Résumé - Abstract	vi
Acronymes	vii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
<i>CHAPITRE I- PROBLEMATIQUE ET JUSTIFICATION DU SUJET, OBJECTIF, HYPOTHESE ET REVUE DE LA LITTERATURE.....</i>	3
1.1. Problématique et justification du sujet.....	3
1.2. Objectifs.....	4
1. 3. Hypothèses	5
1. 4. Définition des concepts.....	5
1. 5. Revue et analyse critique de la littérature.....	7
<i>CHAPITRE II- PRESENTATION DU CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE ET APPROCHE METHODOLOGIQUE.....</i>	14
2. 1. Cadre géographique de l'étude.....	14
2. 2. Approche méthodologique.....	16
<i>CHAPITRE III- CARACTERISATION CLIMATOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....</i>	22
3. 1. Variables météorologiques.....	22
3. 2. Evapotranspiration de référence	34
<i>CHAPITRE IV- ANALYSE DE L'EVOLUTION ANNUELLE, INTERANNUELLE, ET SAISONNIERE DE L'ETo</i>	36
4. 1. La pluie.....	36
4. 2. La température de l'air.....	38
4. 3. l'Humidité relative de l'air.....	40
4. 4. Insolation.....	41
4. 5. Vitesse du vent.....	42

4. 6. Tension de vapeur.....	43
4. 7. Pression atmosphérique.....	44
4. 8. Evolution interannuelle et saisonnière de l'ET ₀	45
CHAPITRE V : SENSIBILITE DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE (ET₀) AUX PARAMETRES METEOROLOGIQUES.....	47
5. 1. Analyse de la sensibilité.....	47
5. 2. Analyse et comparaison de l'Eto entre Parakou, Natitingou et Djougou	52
5. 3. Comparaison de l'ETo sur trois sites	55
CONCLUSION GENERALE.....	57
Références bibliographiques	59
ANNEXE 1 : liste des tableaux et illustrations	63
ANNEXE 2 : Equipement des stations étudiées	66
Sommaire détaillé	70

AVANT-PROPOS

Ce mémoire de DESS en Sciences de l'Environnement et Développement Durable préparé concomitamment au cours de mon stage à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et les cours au Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le Développement Durable (CIFRED) est une contribution aux études sur l'impact hydrologique du changement climatique en Afrique de l'Ouest, précisément sur le haut bassin de l'Ouémé au Bénin.

La réalisation de ce document a été possible grâce au concours, à l'assistance et aux conseils d'un certain nombre de personnes à qui nous exprimons nos sincères reconnaissances.

- Au Professeur Michel BOKO, Directeur du CIFRED pour avoir contribué à notre formation au département de géographie et ensuite au CIFRED : Veuillez accepter ici nos profondes gratitudee.

- A madame Sylvie GALLE, pour avoir conduit notre stage à l'IRD et dirigé le présent mémoire. Veuillez accepter notre profonde reconnaissance pour tous les efforts consentis à l'achèvement de ce travail.

- A tout le personnel de l'ASECNA Bénin en l'occurrence, ceux du Service Météo, à monsieur Dominique AGBANGLA pour sa disponibilité et ses précieux conseils.

- A Messieurs Fulgence AFOUDA, Christophe HOUSSOU, et Benoît N'BESSA, qu'ils retrouvent ici nos sincères remerciements pour leur soutien moral et leurs nombreux conseils.

- A notre mère, à tous nos frères et sœurs, oncle, pour leur soutien moral, matériel et spirituel auxquels nous sommes restés très sensibles.

- A tous nos camarades de la troisième promotion pour la bonne ambiance qui a régné durant toute la formation.

- A nos camarades Noël OWOLABI, Cyr Gervais ETENE pour leurs contributions à la réalisation du présent document, qu'ils trouvent ici l'expression de nos profondes gratitudee.

Résumé

La présente étude a fait l'analyse de l'évolution (annuelle, interannuelle et saisonnière) des variables météorologiques et la sensibilité de l'évapotranspiration de référence journalière à ces différentes variables météorologiques.

L'approche utilisée a consisté d'abord à évaluer les tendances enregistrées sur le haut bassin de l'Ouémé au cours des années, de 1965 à 2006, suivant les saisons et suivant chaque variable. Ensuite, on a procédé à l'analyse de la sensibilité de l'évapotranspiration de référence à chacune des variations de ces paramètres sur les stations de Parakou, de Natitingou et de Djougou.

Les principales variables météorologiques qui intéressent l' ET_0 dans la zone d'étude ont été identifiées et ont permis de constater que l' ET_0 varie de façon sensible dans les trois sites pendant la saison sèche contrairement à la saison pluvieuse où l' ET_0 reste invariable. L'analyse de sensibilité de l' ET_0 aux variables météorologiques a révélé que le vent, l'insolation et la température maximale de l'air ont une influence très remarquable sur l' ET_0 dans le haut bassin de l'Ouémé.

Mots clés : variables météorologiques, sensibilité, évapotranspiration de référence.

Abstract

This study analyzed the seasonal and annual variations of meteorological variables of interest to reference evapotranspiration (ET_0) and the sensitivity of ET_0 to these variables.

First, trend analysis has been used to assess variations of meteorological variables in the Ouémé catchment from 1965 to 2006. Next, sensitivity analysis helped analyze the sensitivity of ET_0 to meteorological variables at Parakou, Natitingou and Djougou stations.

Trend analysis of key meteorological variables of importance to ET_0 in the study area revealed that ET_0 is subject to significant variations in all three stations during the dry season but there is almost no variation between the three stations during rainy season. Of all key meteorological variables of importance to ET_0 in the study area, it is clear that ET_0 is more sensitive to wind speed, radiation, and maximal air temperature.

Key-words: meteorological variable, sensitivity, reference evapotranspiration.

ACRONYMES ET SIGLES

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

ASECNA: Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar

DMN: Direction de la Météorologie Nationale

ET : Evapotranspiration

ETo : Evapotranspiration de Référence

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

FAO: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture/
Food and Agriculture Organization of the United Nations

GIEC/IPCC: Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du Climat/
Intergovernmental Panel on Climate Change

HRmax: Humidité Maximum de l'air

HRmin: Humidité Minimum de l'air

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

PM : Penman Monteith

Rn: Rayonnement Net

Rs: Radiation Solaire

ZCIT: Zone de Convergence Intertropicale

INTRODUCTION GENERALE

Dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique de l'ouest, on assiste à une précarité de la ressource en eau qui se fait ressentir dans les régions sahéliennes et environnantes (PATUREL et al, 1986). Un des défis de notre siècle serait la disponibilité en quantité et en qualité de l'eau pour la satisfaction des besoins de l'homme.

Pour ce faire, une gestion rationnelle des ressources en eau passe par la connaissance des termes du bilan hydrologique. L'évapotranspiration fait partie des termes majeurs du bilan hydrologique et constitue à l'échelle annuelle, 40% à 80% du bilan au Bénin selon les années (Le Lay, 2005 ; Giertz, 2004).

Cette préoccupation est un enjeu important, d'une part, pour les connaissances scientifiques et d'autre part, pour la mise en œuvre d'une politique efficiente de développement. C'est ainsi que, dans le cadre du projet AMMA, on cherche à estimer l'impact hydrologique du changement climatique en Afrique de l'Ouest.

La mesure de l'évapotranspiration étant délicate et chère, de nombreux auteurs ont développé des relations empiriques la reliant à l'évapotranspiration de référence (ET_o).

L'extension des réseaux de stations météorologiques permet l'accès aux chroniques climatiques détaillées et subséquentement une meilleure estimation de l'évapotranspiration de référence (ET_o) (DOORENBOS et PRUITT, 1997). Cette estimation est fondamentale, non seulement pour les hydrologues, mais aussi pour les physiciens de l'atmosphère et les agronomes.

La présente recherche vise à étudier la sensibilité de l'évapotranspiration de référence journalière du bassin de l'Ouémé supérieur aux différentes variables météorologiques qui la déterminent: température minimum et maximum, humidité relative de l'air minimum et maximum, vitesse moyenne du vent, rayonnement ou durée d'insolation, pression atmosphérique moyenne.

L'évolution de ces variables au cours des quarante dernières années est ensuite étudiée ainsi que leur impact sur la variabilité de l'évapotranspiration de référence depuis quarante ans sur le haut bassin de l'Ouémé.

ainsi, notre travail s'articulera autour de cinq chapitres à savoir :

- Problématique et justification du sujet, objectif, hypothèse et revue de la littérature ;

- présentation du cadre géographique de l'étude et approche méthodologique ;

- caractérisation climatologique de la zone d'étude ;

- analyse de la variabilité annuelle, interannuelle, et saisonnière de l'ET_o ;

- sensibilité de l'évapotranspiration de référence (et_0) aux paramètres météorologiques ;

et enfin la conclusion générale.

CHAPITRE I- PROBLEMATIQUE ET JUSTIFICATION DU SUJET, OBJECTIF, HYPOTHESE ET REVUE DE LA LITTERATURE

1.1. Problématique et justification du sujet

L'Afrique tropicale est très sensible à la variabilité climatique et par conséquent au changement climatique. Dans un contexte de pression anthropique croissante, des modifications du climat, même légères, pourraient se traduire par des déséquilibres en terme de ressources en eau et de santé publique (Louvet, 2005).

En effet, depuis plus de deux décennies, le Bénin comme les autres pays de l'Afrique de l'Ouest est soumis à des perturbations climatiques dont les conséquences sont d'une part la sécheresse de 1970 et 1980 (BOKONON-GANTA, 1987 ; BOKO et IGUE, 1988 ; LE BARBE et LEBEL, 1997, HOUDENOU, 1999 ; YABI 2001) et d'autre part la dégradation des ressources en eau (VISSIN, 2001 ; TOSSA, 2005), le développement des maladies tels que le paludisme, la méningite, le choléra. C'est dans ce contexte d'impacts socio-économiques forts, auxquels s'ajoute la perspective de changement global lié à l'augmentation des gaz à effet de serre, qu'il est apparu essentiel à la communauté scientifique de décrire et de comprendre les modes de variabilité du climat en Afrique de l'Ouest pour en améliorer les prévisions (NICHOLSON, 1979 et 1986 ; PATUREL et al, 1986 ; BOKO, 1988 ; MORON, 1994 ; HOUDENOU et HERNANDEZ, 1998, LE BARBE et al., 2002). C'est d'ailleurs l'un des objectifs du projet AMMA.

Au Bénin, de nombreuses études ont été menées pour montrer l'impact de la variabilité du climat (BOKONON-GANTA, 1987 ; BOKO et IGUE, 1988 ; BOKO, 1988 ; Le BARBE, 1993 ; MORON, 1994 ; HOUNDENOU et HERNANDEZ, 1998 ; HOUNDENOU, 1999 ; VISSIN, 2001 ; YABI, 2002; TOSSA, 2005 ; LE LAY, 2006, OGOUWALE, 2006). Si l'évolution des variables météorologiques est connue globalement, et notamment la hausse de température (rapport du GIEC de 2007), il s'est avéré que très peu d'études ont été faites sur l'évolution locale des variables

météorologiques et leur impact sur l'évapotranspiration de référence. Or, il faut noter que l'estimation de l'évapotranspiration réelle est primordiale à la fois pour les agronomes (l'eau utilisée par les forêts, les cultures et les pâturages) ; les hydrologues (elle est un des termes majeurs du bilan hydrologiques) et les climatologues (l'ETR contribue à alimenter l'atmosphère en eau). Les modifications de l'ETR impliquent donc des conséquences agronomiques, hydrologiques et climatologiques. Cette évapotranspiration réelle est liée à l'évapotranspiration de référence. C'est au regard de ces constats que la présente recherche se propose d'étudier les variables météorologiques qui influencent l'évapotranspiration de référence.

C'est ce qui justifie le choix de cette étude intitulée : **«Evolution des variables météorologiques sur le haut bassin de l'Ouémé et leur influence sur l'évapotranspiration de référence»**

1.2. Objectifs

Objectif général

L'objectif général est d'améliorer notre compréhension sur l'évolution des variables météorologiques ainsi que leurs influences sur l'évapotranspiration de référence.

Objectifs spécifiques

De façon spécifique, la présente recherche vise à :

- identifier les variables météorologiques qui intéressent l' ET_0 ;
- analyser la variabilité annuelle, interannuelle et saisonnière de l' ET_0 ;
- étudier la sensibilité de l'évapotranspiration de référence aux différentes variables climatiques et météorologiques sur le haut bassin de l'Ouémé.

1. 3. Hypothèses

α - les variables météorologiques qui intéressent le calcul de l'ET₀ sont identifiées.

β - la sensibilité de l'ET₀ varie suivant les climats.

γ - la sensibilité varie au cours de l'année lorsqu'on a des saisons contrastées

\forall - l'ET₀ est sensible aux effets des variables météorologiques pris isolement de même qu'aux effets cumulés de ces variables.

1. 4. Définition des concepts

- **Variables météorologiques**

Une variable est une grandeur physique dont la valeur varie dans le temps et l'espace. Ses variations peuvent être caractérisées statistiquement pour une période ou une saison donnée. Elles peuvent également évoluer par rapport à cette moyenne en raison par exemple du changement climatique.

Ainsi, le terme d'évolution des variables météorologiques traduit les écarts que présentent les statistiques des variables météorologiques relatives à une période particulière (par exemple un mois, une saison ou une année donnée) par rapport aux statistiques à long terme des variables météorologiques relatives à la même période du calendrier (en ce sens, l'évolution de la variable météorologique est mesurée par ces écarts, que l'on qualifie habituellement d'anomalie).

- **Bassin hydrographique**

Un bassin-versant ou bassin hydrographique est une portion de territoire délimitée par des lignes de crête, dont les eaux alimentent un exutoire commun : cours d'eau ou lac. La ligne séparant deux bassins versants adjacents est une ligne de partage des eaux. Chaque bassin-versant se subdivise en un certain nombre de bassins

élémentaires correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal.

Chaque bassin-versant se caractérise par différents paramètres géométriques (surface, pente), pédologiques (nature et capacité d'infiltration des sols), urbanistiques (présence de bâti) mais aussi biologiques (type et répartition de la couverture végétale). On peut également y distinguer trois types de continuité :

- une continuité longitudinale, de l'amont vers l'aval (rus, ruisseaux, rivières, fleuves).
- une continuité latérale, des crêtes vers le fond de la vallée.
- une continuité verticale, des eaux superficielles vers les eaux souterraines et inversement.

Sa connaissance est fondamentale dans toute étude hydrologique

- **Evapotranspiration**

L'évapotranspiration (ET) encore appelée l'évapotranspiration réelle (ETR) est la somme de la quantité d'eau retournée à l'atmosphère à travers les processus d'évaporation et de transpiration (Hansen et al.1980). Il en découle que l'évapotranspiration revêt deux composantes à savoir l'évaporation du sol et la transpiration des plantes.

Ainsi, l'évaporation est le processus par lequel l'eau - des lacs, des fleuves, rivières, sols, végétation...etc – s'est évaporée en passant de l'état liquide à l'état de vapeur d'eau (Allen et al, 1998). Tandis que la transpiration consiste à la transformation de l'eau contenue dans les tissus des plantes en vapeur d'eau émise dans l'atmosphère à travers les stomates (Allen et al, 1998).

1. 5. Revue et analyse critique de la littérature

La recherche documentaire au cours de la présente étude a été effectuée dans les institutions de recherche dont les activités sont liées à l'objet de cette recherche. Elle a été conduite respectivement au laboratoire de climatologie (UAC), à l'Institut de recherche pour le Développement (IRD), au Service Météorologie de L'ASECNA, au CIFRED et sur les sites internet. Ainsi, plusieurs documents ont été lus et analysés. Ces documents ont abordé les aspects tels que la définition du concept de l'évapotranspiration, son utilisation par de nombreux auteurs et surtout dans d'autres régions et sous d'autres climats, ses mesures et enfin ses rapports avec certains paramètres météorologiques.

- Le concept de l'ET et sa mesure

Dans la littérature, plusieurs concepts sont utilisés pour caractériser l'ET (Fontenot, 1999 ; Chong 2006). L'évapotranspiration (ET), l'évapotranspiration réelle (ETR), l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration de référence (ET_0) sont les termes les plus utilisés.

Dingman (1994), cité par Fontenot (1999), a défini l'évapotranspiration potentielle (ETP) comme le taux maximal possible de l'évapotranspiration d'un plan d'eau, elle représente la demande atmosphérique.

Allen et al (1998) ont défini l'évapotranspiration de référence (ET_0) comme le pouvoir évaporatif de l'atmosphère sur une végétation spécifique non limitée en eau.

Le concept de ET_0 a été introduit à la fin des années 1970 et au début des années 1980 par des ingénieurs en irrigation et des chercheurs pour éviter les ambiguïtés relatives à la définition de l'ETP (Allen et al, 1998).

Cette mise au point, a donné lieu à une nouvelle définition de l' ET_0 . Elle se définit comme l'évapotranspiration correspondant à l'évapotranspiration d'une surface de référence (gazon de 12 cm de haut, albédo de 0,23 et résistance de surface de 70 s.m^{-1})

bien irriguée. L'évapotranspiration réelle est fonction de l'évapotranspiration de référence qui traduit la demande climatique, de la limitation due à la teneur en eau réelle, et d'un coefficient cultural caractérisant la végétation étudiée par rapport au gazon.

De la même manière que le concept de l'ET a connu une évolution, plusieurs formules ont été mises au point pour sa mesure.

- Estimation de l'ETP

La mesure de l'ETP n'est pas possible directement, mais plusieurs auteurs – qui se sont penchés sur la question – ont tenté de développer des formules et des modèles pour l'estimer. Ces modèles et formules ont été classés en trois principales catégories : modèles basées sur la température, modèles basées sur la radiation et modèles basés sur la combinaison de plus d'une variable climatique (Watson et Burnett, 1995 ; Smith, 2000; Bouhlassa et Paré, 2006).

Le calcul de l'ETP quel qu'il soit utilise toujours les données climatiques et météorologiques. Ainsi tous les modèles de l'ETP sont basés sur l'utilisation d'une variable ou de combinaison de variables climatiques et météorologiques.

- modèles basées sur la température : les modèles basés sur la température prennent généralement en compte uniquement les mesures de température de l'air pour l'estimation de l' ET_0 . Il existe plusieurs modèles basés sur la température, mais les plus connus et utilisés sont les modèles de Thornwaite, Hargreaves, Jensen-Haise et Blaney-Criddle (Smith, 2000 ; Bouhlassa et Paré, 2006).

- mesures basées sur la radiation : les modèles de radiation sont spécifiquement basés sur l'utilisation des composantes de l'énergie, en l'occurrence différentes formes des mesures du bilan d'énergie (Fontenot, 1999). Les modèles les plus souvent utilisés sont ceux de FAO-Radiation et Priestley-Taylor (Fontenot, 1999 ; Smith, 2000)

- Ces différentes mesures ont été testées dans des contextes spécifiques et ont abouti à de bons résultats. En revanche, ces mêmes mesures ne sont pas toujours

vérifiées hors les contextes climatiques spécifiques, car ils surestiment ou sous-estiment l'ET₀ (Magali et al 2002 ; Fisher et al, 2003 ; Bouhlassa et Paré 2006).

- mesures basées sur la combinaison de paramètres : les modèles basés sur la combinaison de plusieurs paramètres météorologiques et climatiques sont considérés comme les modèles les plus précis à estimer l'ET₀ (Fontenot, 1999). La plupart de ces modèles ont été élaborés par Penman d'où l'appellation des modèles de la famille de Penman. Le plus fiable, le plus utilisé et le plus accepté à l'échelle mondiale des modèles de cette famille est actuellement Penman-Monteith (Fontenot, 1999 ; Smith, 2000; Allen, 2001; Magali et al, 2004 ; Meza, 2004 ; Fisher, 2004 ; Allen, 2006 ; Bouhlassa et Paré, 2006 ; Gavilan, 2007). Il a été normalisé par la FAO sous le nom PM FAO 56 (Allen, 98).

- PM FAO 56

Les différentes méthodes de mesure présentées plus haut révèlent la multiplicité des modèles conçus pour estimer l'ET₀. Il en ressort que bon nombre de ces méthodes ou modèles sont plus ou moins imprécis quand l'on s'éloigne du contexte climatique de départ. Ce constat a été à l'origine de la standardisation de la méthode d'estimation de l'ET₀ avec l'avènement du modèle Penman-Monteith FAO-56 (Allen *et al.*, 1998).

Ce qui fait la robustesse du modèle Penman-Monteith FAO-56 par rapport aux autres modèles est le choix d'une surface de référence (surface standard) et l'intégration d'un plus grand nombre de données climatiques et météorologiques : la température, l'humidité relative, l'insolation et la vitesse du vent (Allen, 1998 ; Smith, 2000).

- Les limites de PM 56

L'une des insuffisances majeures de cette méthode est l'exigence d'un certain nombre de variables pour le calcul de l'ET₀ (Smith, 2000 ; Droogers et Allen, 2001 ; Magali, 2004 ; Chong et al, 2006 ; Gong et al, 2006 ; Bouhlassa et Paré, 2006).

En effet, en dehors des stations synoptiques (6 stations au Bénin), la plupart des stations météorologiques ne disposent pas d'équipements adéquats pour

l'enregistrement des paramètres météorologiques relatifs à l'humidité et l'insolation parce que ces instruments sont coûteux (Droogers et Allen, 2001 ; Gong et al, 2006 ; Bouhlassa et Paré, 2006). La question de l'interpolation des données d'évapotranspiration entre ces stations doit donc être étudiée.

Eu égard à ce qui précède, notre étude ne peut prendre en compte qu'un cadre d'étude où le maximum de mesures est possible sur les stations d'observations ; et c'est une des raisons pour laquelle nous avons choisi le haut bassin de l'Ouémé où il existe grâce aux projets AMMA et à la Météorologie Nationale, un réseau de stations permettant de mettre en œuvre une pareille étude.

- La sensibilité de ET aux variables climatiques : variabilité temporelle et saisonnière (variabilité climatique)

La sensibilité de l' ET_0 aux variables climatiques a été analysée par certains auteurs en s'appuyant sur la variabilité spatiale et saisonnière de l' ET_0 (Magali et al, 2004 Chong et al, 2005). Certaines études réalisées sur cette question ont montré que la méthode de PM permettait de détecter la sensibilité de l' ET_0 aux variables climatiques dans la mesure où la formule permet de mesurer l'influence des facteurs radiatifs (l'effet de la radiation) et ceux aérodynamiques (vitesse du vent).

L'étude réalisée par Magali et al (2004) dans l'Altiplano bolivien a révélé que la formule de PM était plus apte que d'autres formules de mesures de l' ET_0 à mesurer la variation spatiale et saisonnière des effets de la radiation et des facteurs aérodynamiques sur l' ET_0 . Il en est de même pour l'étude réalisée par Chong et al (2005) sur le bassin du fleuve Yangtze qui a fait cas de la sensibilité de l' ET_0 aux effets de la radiation et de l'humidité qui varient selon la saison et l'emplacement dans le bassin du fleuve. Chong et al (2005) dans leur étude sur le bassin Yangzet ont démontré qu'une tendance à la baisse significative de l' ET_0 a correspondu à une même tendance à la baisse de radiation nette totale. La baisse sensible de l' ET_0 correspondait aussi dans une certaine mesure à une baisse de la vitesse du vent (influence des

facteurs aérodynamiques). En d'autres termes, la baisse de l' ET_0 a été causée principalement selon Chong et al (2005) par la baisse drastique de la radiation nette totale et secondairement par la baisse de la vitesse du vent.

- Définition de l'évapotranspiration de référence : ET_0

L' ET_0 au pas de temps journalier et selon la formule de Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1994 ; Smith, 1991), nécessite les données journalières sur la température maximale et minimale de l'air, l'humidité relative maximale et moyenne, le rayonnement net (ou la durée d'insolation) et la vitesse du vent. Celles-ci doivent être mesurées sur des surfaces de référence (gazon). Ainsi l'évapotranspiration de référence (mmJ^{-1}) se calcule à l'aide de la formule (1) :

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} v(e_w - e)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34v)} \quad (1)$$

où:

- Δ la pente de la courbe de la tension de vapeur saturante ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot t}{t + 237,3}\right) \right]}{(t + 237,3)^2} \quad (2)$$

- R_n représente le rayonnement net ($W \cdot m^{-2}$) ; en l'absence de cette mesure on peut l'estimer par la formule (7) basée sur la durée d'insolation et la température max.

- G le flux de chaleur dans le sol

$G=0$ au pas de temps journalier ;

- γ la constante psychrométrique ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$)

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot P \quad (3)$$

- v la vitesse du vent à 2m ($m \cdot s^{-1}$), elle est généralement mesurée à 10mètres au niveau des stations synoptiques de la météorologie du Bénin et est convertie à 2 mètres par la formule :

$$U_2 = \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} * U_z \quad (4)$$

- e_w la tension de vapeur saturante (kPa) à la température T de l'air en °C. Cette variable est fournie par la météorologie nationale à partir d'une abaque déjà pré-établi, nous l'avons également déterminé ici par la formule :

$$e_w(t) = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27t}{t + 237,3}\right) \quad (5)$$

- e la tension de vapeur (kPa) s'obtient à partir des humidités relatives de l'air maximum (HRmax) et minimum (HRmin) ainsi que des pressions de vapeur saturante aux températures minimale $e_w(T_{\min})$ et maximale $e_w(T_{\max})$

$$e = \frac{e_w(t_{\min}) \cdot \frac{HR_{\max}}{100} + e_w(t_{\max}) \cdot \frac{HR_{\min}}{100}}{2} \quad (6)$$

- t la température moyenne quotidienne de l'air à 2m (°C), elle est obtenue par la demi somme des températures maxi plus celles des minis journaliers ;

Le rayonnement net peut être estimé par la formule suivante où

$$Rn = (1 - \alpha) * \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) * Ra - \sigma \left[\frac{T_{\max} K^4 + T_{\min} K^4}{2} \right] \left(0,34 - 0,14\sqrt{e} \right) \left(1,35 \frac{Rs}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (7)$$

- α : albédo de la surface étudiée ; $\alpha=0.23$ pour le gazon de référence

- a_s et b_s des constantes empiriques adimensionnelles. En l'absence de renseignement les valeurs moyennes de 0,25 et 0,5 respectivement sont recommandées (Doorenbos et Pruitt, 1997). Au nord Bénin la météorologie nationale utilise $a_s=0.25$ et $b_s=0.45$, pour Natitingou comme Parakou.

- n , la durée d'insolation journalière observée en h

- N , la durée d'insolation potentielle, fonction de la latitude et du jour.

$$N = 24 / \cos \omega_s \quad (8)$$

- Ra est la radiation solaire extra-terrestre [Mj.m-2.j-1] fonction de formule

$$Ra = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} Dr [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (9)$$

- σ est appelé constante de Stefan - Boltzmann $4,90E-09 \text{ MJK}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$

- la radiation solaire R_S a été estimée à partir des données d'insolation par la formule suivante

$$R_S = (a_s + b_s * n / N) * R a \quad (10)$$

$$- R_{so} = (a_s + b_s) * R a \quad (11)$$

Pour que la formule soit fiable, il faut la vérification des hypothèses suivantes:

- La végétation est un gazon bien irrigué et couvrant à une hauteur de 0,12m, de résistance extérieure de 70 s.m^{-1} et un albédo de 0,23.
- Le flux de la chaleur quotidien dans le sol est considéré comme négligeable devant le rayonnement net à ce pas de temps ($G \approx 0$)

CHAPITRE II- PRESENTATION DU CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE ET APPROCHE METHODOLOGIQUE

2. 1. Cadre géographique de l'étude

L'Ouémé est le plus long cours d'eau du Bénin. Sa partie supérieure est située en zone soudanienne et couvre une superficie de 14300 km² (LE BARBE et al., 1993).

Bordé au nord-ouest par le massif de l'Atacora qui cumule à 650m, le haut bassin de l'Ouémé est situé entre 9 et 10° de latitude Nord et 1,5 et 2,5° de longitude Est. Il repose sur le socle Dahoméyen fracturé constitué essentiellement de migmatites et de gneiss. Le relief est peu marqué avec des altitudes comprises entre 200 et 480m.

La structure verticale du sol se présente en 3 zones (VARADO, 2004, KAMAGATE, 2006) : une zone de surface (1-3 m d'épaisseur), une zone d'altérites formée par les arènes issues de la décomposition des roches du sol (10-20 m d'épaisseur) et un socle fracturé ou fissuré dans sa partie supérieure puis de moins en moins fracturé, altéré et fissuré en profondeur.

La circulation atmosphérique de deux masses d'air et leur mouvement saisonnier caractérisent le régime pluviométrique : l'harmattan sec (alizé continental venant du nord-est) et la mousson humide (alizé maritime austral).

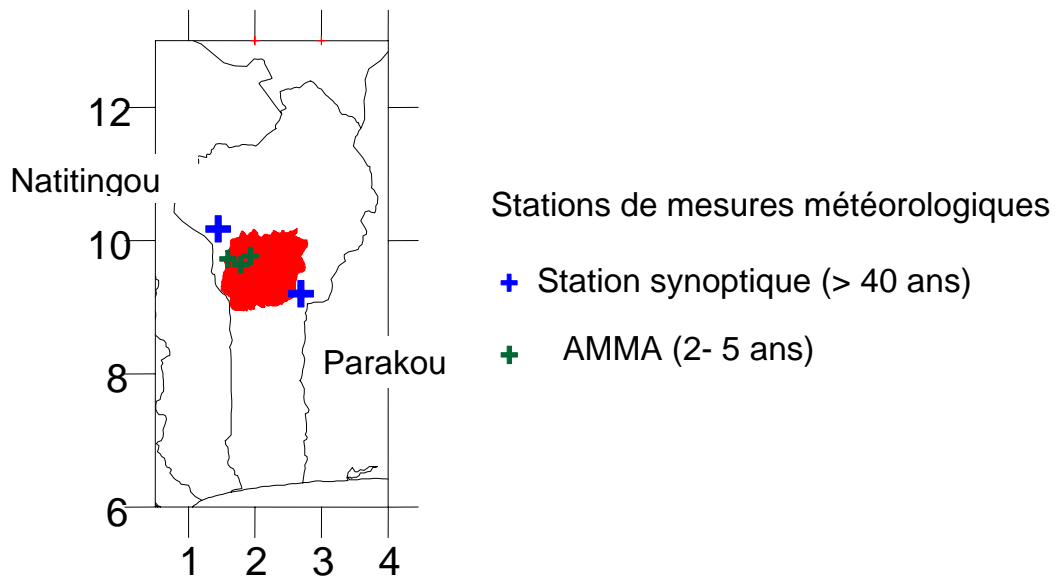
D'un point de vue couverture végétale, l'Ouémé Supérieur est caractérisée par de la savane boisée ou arborée avec deux zones de forêts classées, ainsi que des forêts-galeries le long des principales rivières. Ce couvert végétal est en pleine modification, du fait des activités anthropiques essentiellement agro-pastorales sur cette zone (IMPETUS, 2005) dont les principales cultures sont les tubercules (igname, manioc), le coton et les céréales (maïs, shorgho).

Le bassin supérieur de l'Ouémé est situé en grande partie dans le Département de la DONGA où la population est estimée à 350000 habitants en 2002 avec un taux d'accroissement annuel de 3,48% (moyenne nationale de 3,25%). Les projections de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE/BENIN 2006) prévoient un doublement de cette population d'ici 2025. Ce qui implique une pression de plus en plus croissante sur les ressources naturelles dont l'eau constitue l'élément primordial (ZANNOU, 2006).

Au total, six stations de mesure se situent sur notre zone d'étude, deux stations synoptiques à la limite nord-ouest (Natitingou) et sud-est (Parakou) et cinq stations de recherche entièrement plongées dans le haut bassin de l'Ouémé à savoir Djougou, Bira, Nalohou, Béléfoungou. Les stations synoptiques disposent de 42 ans de données mais les stations expérimentales n'ont été implantées que depuis 2002 ou 2006.

Chaque station synoptique présente une couverture végétale constituée de gazon, les stations expérimentales sont situées sur des couverts végétaux différents (herbacées ou forêt).

Bassin-versant de la Haute vallée de l'Ouémé AMMA - Bénin



2. 2. Approche méthodologique

Cette partie de l'étude présente les données météorologiques utilisées pour l'étude de la variabilité des paramètres météorologiques et leurs influences sur l'évapotranspiration de référence (FAO 56) dans le haut bassin de l'Ouémé. Il expose brièvement les méthodes choisies pour avoir des résultats acceptables.

2. 2. 1. Données et stations météorologiques retenues

Les types de données et les différentes stations retenues dans cette étude ainsi que les techniques de comblement des données manquantes sont présentes dans cette partie.

2. 2. 1. 1. Nature et sources des données

Les données utilisées sont extraites des :

- statistiques climatologiques : température, humidité, insolation, vitesse du vent ETP de la région d'étude, récoltées à l'ASECNA ;
- données météorologiques du programme AMMA ;
- informations qualitatives avec les personnes ressources permettent de comprendre le mécanisme de mesures et de traitement de ces différents paramètres.

2. 2. 1. 2. Stations météorologiques retenues et reconstitution des données manquantes

Un réseau final de six stations (Tableau : n°1) répondant à une meilleure répartition spatiale et offrant des séries d'observations pour les analyses de l'influence de certaines variables météorologiques sur l'évapotranspiration de référence a été retenu. La plupart de ces stations appartiennent au réseau d'observation de la direction de la météorologie nationale (DMN) et elles sont renforcées par celles de AMMA. Ces stations ne sont pas de la même génération. En conséquence, les stations n'ont pas une série de longueur identique. Pour garder une homogénéité des séries, nous avons choisi de travailler sur la période de 1965 à 2006. Ce choix se justifie par le fait qu'il est nécessaire de travailler sur une longue série pour obtenir des analyses fréquentielles fiables. Toutefois, on note des lacunes qui constituent un handicap pour une analyse approfondie. Par ailleurs, il se pose le problème de la qualité, de la fiabilité des observations et de la répartition spatiale des stations dans la région d'étude.

Ainsi, les séries des données climatologiques sont extraites de la base des données de l'ASECNA-Cotonou. Les séries qui présentent moins de 5% de lacune ont été comblées. Plusieurs techniques ont été utilisées pour remplacer les données manquantes telles que la régression linéaire simple ou en remplaçant les lacunes par la moyenne de la série ou par la moyenne des valeurs encadrant la lacune pour un nombre de manques inférieur à cinq et non consécutif.

Tableau n°1 : Données des stations météorologiques du haut bassin de l’Ouémé utilisées pour cette étude

N°	Nom de station	Type	Lat	Long	Alt	Mesures	Nbre d’obs/j	Année d’ouverture
1-	Natitingou	Synop	10°19N	1°23E	460m	△△△	8	1921
2-	Parakou	Synop	9°21N	2°36E	392m	△△△	8	1921
3-	Bira	recherche	9°49N	1°43	405m	△△△△	48	2005
4-	Naholou	recherche	9°44N	1°36	430m	△△△△	48	2005
5-	Béléfougou	recherche	9°47N	1°43	400m	△△△△	48	2005
6-	Djougou	recherche	9°42N	1°40E	438m	△△△△	96	2002

Source : Base de données Service Météo du Bénin et IRD, 2007

△△△ : vent, température, humidité, précipitation, durée d’insolation, bac à évaporation, pression

△△△△ : vent, température, humidité, précipitation, rayonnement incident, rayonnement net, pression

synop = synoptique

Notons que l’absence de données et le manque de chronologie dans certaines séries avant 1965 nous ont obligés à considérer 1965 comme début de série à Parakou et Natitingou dans le cas de notre étude.

2. 2. 2. Matériels de mesure et outils de collecte des données

Les données ont été collectées à partir des stations météorologiques de Natitingou, Parakou, Bira, Nalohou, Béléfougou.

A Natitingou et Parakou comme dans les autres stations synoptiques du Bénin, des appareils ont été installés dans un parc météorologique pour des mesures horaires et journalières des paramètres climatologiques et météorologiques. Au nombre de ces appareils, nous avons l’anémomètre et la girouette qui sont placés à 7,74 mètres à Natitingou, et à 10 mètres à Parakou au-dessus du sol pour capter la vitesse et la direction du vent ; l’abri météorologique à deux mètres pour mesurer les données de

température et d'humidité de l'air ambiant ; l'héliographe Campbell pour capter et mesurer la durée de l'insolation au cours d'une journée, un pluviomètre pour recueillir et mesurer les hauteurs d'eau de pluies tombées. L'ensemble des mesures et leur précision sont présentées en annexe I.

Dans le cadre du projet AMMA, des appareils ont été installés dans les stations de Djougou, Bira, Nalohou et Béléfoungou où des capteurs automatiques enregistrent la vitesse et la direction du vent à 2 m, l'humidité relative, la pression atmosphérique, la température de l'air, la hauteur de la pluie, les rayonnements net et incident toutes les demi-heures ou quart d'heure (Djougou).

En effet, il est à signaler que les stations synoptiques du Bénin utilisent les mesures de la durée d'insolation pour la détermination de l'évapotranspiration et celles de AMMA (Djougou, Bira, Nalohou et Béléfoungou) enregistrent les données de rayonnements net et incident ; cette différence dans le calcul de l'évapotranspiration produit une influence sur les résultats. Nous avons donc calculé la durée d'insolation à partir du rayonnement incident afin que les mesures de toutes les stations soient comparables. La durée d'insolation est égale au nombre d'heures où le rayonnement incident excède 120 w.m^{-2}

Dans certaines mesures, il faut noter que la collecte des données s'est faite par le biais des fichiers, des tableaux climatologiques mensuels (TCM). Ces données ont ensuite été contrôlées à partir des carnets d'observations, des archives des bulletins agrométéorologiques décennaires où des données mesurées, parfois calculées et consignées au niveau des divisions du service de la météorologie de l'agence pour la sécurité de la navigation aérienne (ASCENA) du Bénin.

2. 2. 3. Traitement des données

Dans le but de mieux comprendre les mécanismes statistiques générateurs des différentes séries d'observation, le traitement des données s'est fait par le biais des logiciels EXCELL et KRHONOSTAT.

Excel nous a permis d'établir, de mieux gérer notre base de données et de réaliser toutes les courbes qui figurent dans la présente étude.

Krhonostat est un logiciel qui rassemble des outils statistiques utiles à l'analyse de séries chronologiques. Il a été élaboré par l'IRD 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 (Krhonostat pour Windows 95- © 1997_1998 ORSTOM).

Krhonostat regroupe de nombreux tests spécifiques d'un changement de comportement de la variable dans la série temporelle (hydro Science de Montpellier : www.hydrosciences.org). Ces tests sont groupés en deux catégories et nous avons :

La première catégorie de tests permet de vérifier le caractère aléatoire des séries. Il s'agit :

- du test de corrélation de rang qui permet de tester l'homogénéité d'une série temporelle avec pour hypothèse alternative, celle d'une tendance ;
- de l'autocorrélogramme.

Ils portent sur la constance de la moyenne de la série tout au long de sa période d'observation.

La deuxième catégorie de tests s'applique dans l'hypothèse où la série est déclarée non aléatoire. Ainsi nous avons :

- la statistique de Buishand (Buishand, 1982, 1984) est dérivée d'une formulation originale donnée par Gardner (1969) pour établir un test bilatéral de rupture en moyenne à un instant inconnu. Le test de Buishand est paramétrique. Il suppose une normalité de la série, une non autocorrélation et une constance de la variance de part et d'autre du point de rupture éventuelle. Ce test est performant pour détecter une rupture en milieu de série, mais il ne fournit pas d'estimation du point de rupture (GAUTIER, F. et al 1998);

- le test de Pettitt : il examine l'existence d'une rupture à un instant inconnu de la série. Ce test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne et, si l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série est rejetée, il propose une estimation de la date de rupture.

- La méthode bayésienne de Lee & Heghinian (Lee & Heghinian, 1977; Bruneau & Rassam, 1983) est une approche paramétrique qui requiert une distribution normale des variables étudiées. Elle fait l'hypothèse d'une rupture en moyenne à un instant inconnu. La distribution *a priori* de l'instant de la rupture est uniforme, et compte tenu de cette information et des données, la méthode produit la distribution de probabilité *a posteriori* de l'instant de la rupture.

- Le test de Hubert est adapté à la recherche de multiples changements de moyenne dans la série. Son principe est de "découper" la série en plusieurs segments de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s) par application du test de Scheffé (Kendall & Stuart, 1943).

Appliqués à chaque site de mesure et variable par variable, ces tests donnent des résultats généralement concordants du moins au niveau de la reconnaissance d'une hétérogénéité dans la série, même si les estimations des ruptures en moyenne données par plusieurs tests diffèrent parfois de quelques années.

CHAPITRE III- CARACTERISATION CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

3.1. Variables météorologiques

L'analyse des différentes variables climatologiques et météorologiques concernera dans un premier temps les deux stations synoptiques (Natitingou et Parakou) qui disposent des plus longues séries et limitent le cadre d'étude, et dans un second temps, nous allons leur comparer les autres stations implantées depuis 2002.

Les nuages de points représentent les relevés journaliers de chaque variable sur la période d'étude (42 ans) étalés sur les jours de l'année.

3.1.1. Cycle saisonnier de la pluie

On peut distinguer trois zones climatiques au Bénin (ADJANOHOOUN et al. 1989) :

- La zone littorale et sublittoral dans le Sud (de la côte jusqu'au 7^e parallèle Nord) avec un climat tropical humide ou sub-équatorial. La pluviométrie varie de 900 à 1300 mm/an.
- *La zone de transition guinéo-soudanienne au centre* (entre la 7^e et la 9^e parallèle Nord). Le climat devient tropical sub-humide ou sub-soudanien avec une pluviométrie moyenne de 1200 mm/an
- *La zone soudanienne semi-aride au nord* de la 9^e parallèle Nord. Le climat est tropical sec ou soudanien, caractérisée par les moyennes annuelles des pluies variant de 900 à 1100 mm. Les pluviométries décroissent vers le Nord-Est. La chaîne de l'Atacora joue ici un important rôle.

Notre domaine d'étude à savoir : le haut bassin de l'Ouémé se trouve situé dans la zone *soudanienne semi-aride*

Le régime pluviométrique est contrôlé principalement par la circulation de deux masses d'air et par leur mouvement saisonnier : l'harmattan sec (alizé continental

venant du nord-est) qui nous donne la sécheresse et la mousson humide (alizé maritime austral) qui nous donne la pluie. Les études récentes du cycle saisonnier (Le Barbé *et al.*, 2002; Lebel *et al.*, 2003; Sultan & Janicot, 2003) montrent la non-linéarité du déplacement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) sur le continent entre deux positions de quasi-équilibre à 5°N et 10°N, et l'existence d'un "saut de mousson" entre ces deux latitudes. Deux régimes pluviométriques, directement associés aux mouvements méridiens de la ZCIT, sont dès lors distingués, à savoir une première saison dite océanique, essentiellement due à l'apport d'humidité à partir du Golfe de Guinée, et une seconde dite continentale après le saut de mousson, mettant en jeu une dynamique très différente.

Ainsi, ces deux masses d'air caractérisent le régime pluviométrique à Parakou et Natitingou (voir figure 1). Cette figure ci-dessous caractérise l'évolution de la pluviométrie journalière moyenne sur 46 ans (1960-2005) avec moyenne glissante sur 20 jours à Parakou et Natitingou.

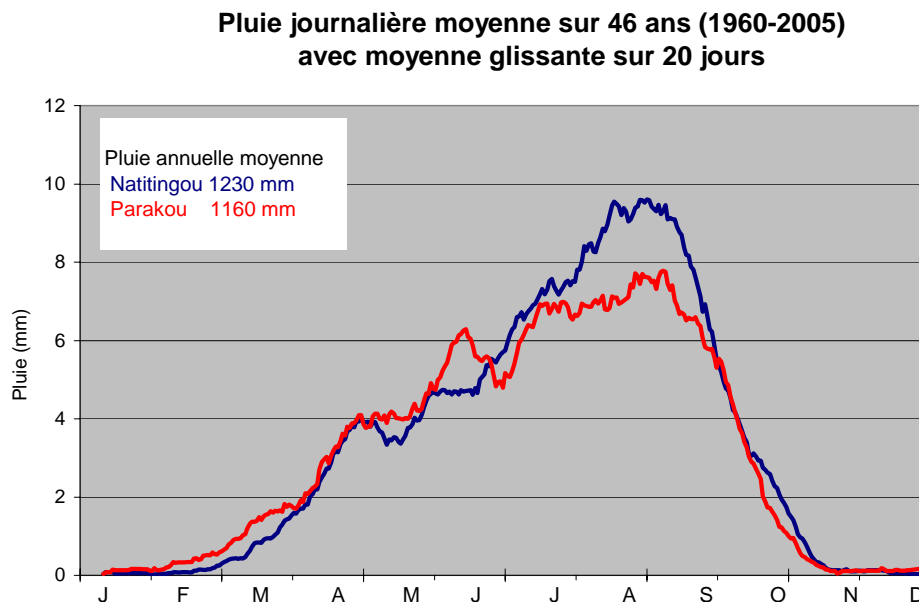


Figure 1 : évolution de la pluviométrie journalière moyenne sur les stations de Parakou et Natitingou de 1960 à 2005.

La courbe révèle un régime quasi-unimodal, avec une grande saison pluvieuse qui dure 7 mois d'avril à octobre (95% de la pluie annuelle) et une sèche de novembre à mars. Il est à noter que pendant la longue saison pluvieuse, on observe au mois de juin et plus précisément au début de la troisième décade de juin une légère rupture caractérisée par une forte baisse de la pluviométrie et une augmentation rapide des indices pluviométriques : c'est le " saut " de mousson.

Les premières pluies significatives de la saison humide commencent plus tôt à Parakou et la moyenne annuelle est de l'ordre de 1160mm. La pluviométrie est plus élevée à Natitingou, situé en limite du massif de l'Atacora, et la pluie moyenne annuelle se situe aux environs de 1230mm.

3. 1. 2. L'insolation

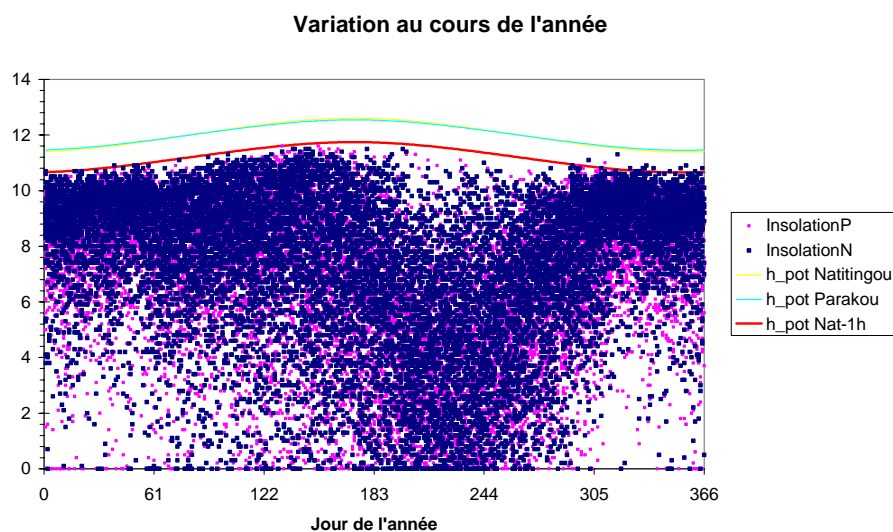


Figure 2 : évolution temporelle de l'insolation sur les stations de Parakou et Natitingou

Sur toute l'année, la durée de l'insolation mesurée par l'héliographe Campbell Stokes est comprise entre 0heure et 11,5heures. La figure de l'évolution temporelle de l'insolation sur les deux stations citées plus haut, présente deux grandes phases à savoir :

-une première phase qui englobe les trois premiers mois de l'année soient : janvier, février et mars (du 1^{er} au 90^{ème} jour) en plus les trois derniers mois à savoir : octobre, novembre et décembre (du 274^e au 366^e jour).

-une deuxième phase où les valeurs de l'insolation chutent pour atteindre des valeurs très faibles en l'occurrence les deuxième et troisième trimestres de l'année. Cette période correspond à la saison pluvieuse.

Entre juillet et août, voir début septembre, les valeurs nulles abondent et un vide se crée au sommet de la courbe. C'est la période où la saison pluvieuse atteint son pic et la nébulosité est bien développée, constituant ainsi un écran à la traversée des rayons solaires.

Notons qu'aucune valeur n'atteint la durée d'insolation potentielle, ni à Parakou, ni à Natitingou. La courbe enveloppe des valeurs mesurées est plus courte de 0.8 heure. Cela s'explique par le fait que les rayons solaires ne sont pas captés dès le levé du soleil ni à son couché. Ainsi le papier commence à brûler à $120W.m^{-2}$ donc on loupe le matin et le soir soit 0.8 heure

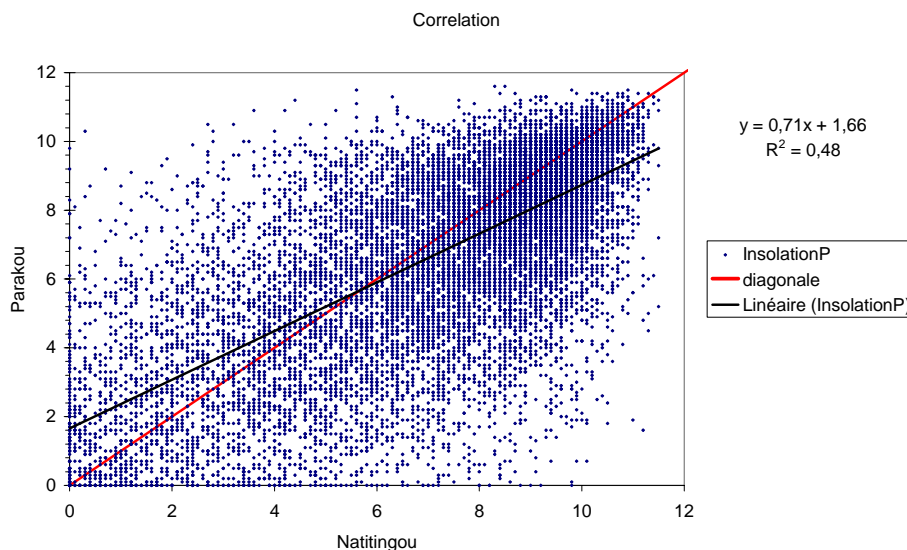


Figure 3: corrélation de l'insolation mesurée à Parakou et Natitingou (stations synoptiques de l'ASECNA)

La corrélation entre les durées d'insolation journalière de Parakou et Natitingou est moyenne (Le coefficient de détermination est $R^2=0,48$ soit 48% de variance expliquée) on note un étalement des nuages de points. Les deux stations ont le même cycle saisonnier mais à l'intérieur de celui-ci leur éloignement (170 km) explique la différence d'enneuagement observé un jour donné.

3. 1. 3. Température

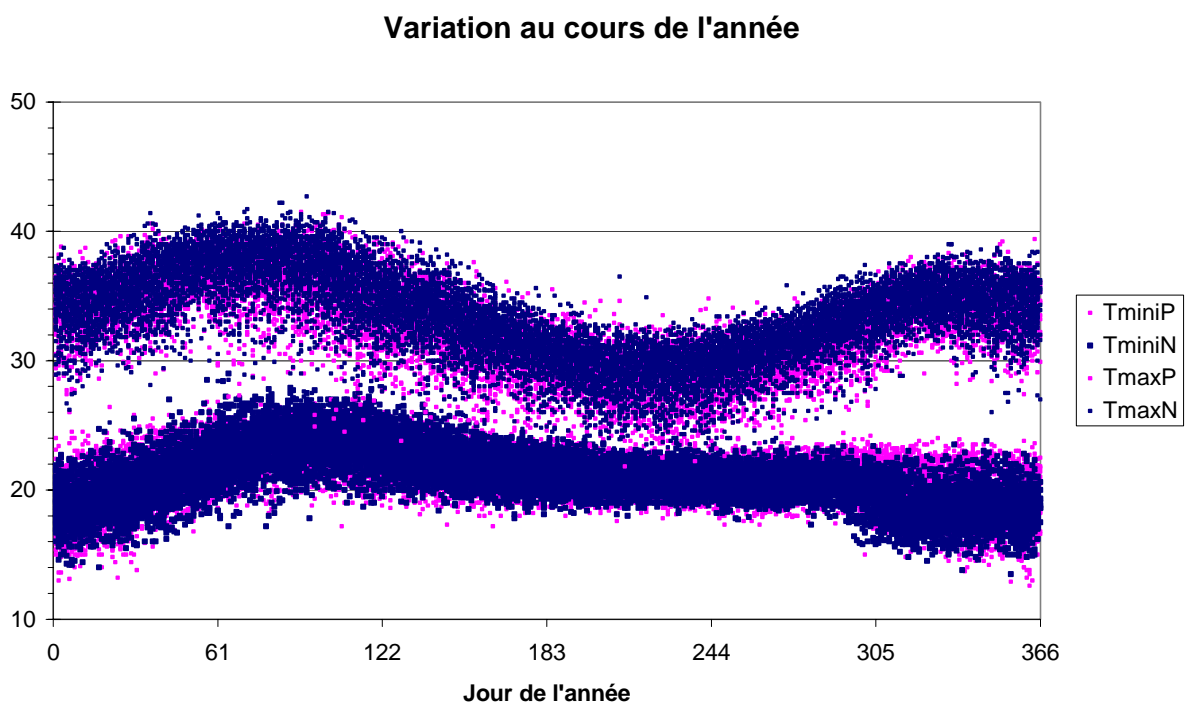


Figure 4: Evolution saisonnière de la température mini à Parakou et Natitingou.

Les températures minimums, à Parakou comme à Natitingou sont restées toujours supérieures à $12,5^{\circ}\text{C}$ et inférieures à 30°C sur la période d'étude. Les moyennes journalières sont sensiblement égales sur les deux stations : elles se situent à $21,2^{\circ}\text{C}$ à Parakou et $21,0^{\circ}\text{C}$ à Natitingou.

Quant aux températures maximums journalières, elles varient de 21 à 43°C sur les stations de Parakou et Natitingou. Leurs moyennes journalières sont de $32,8^{\circ}\text{C}$ à

Parakou et 33.4°C à Natitingou, entre les deux stations, l'écart des températures maximum est légèrement supérieure de 0.6°C à Natitingou sur les 42 années de données.

La superposition des courbes des températures maximums et minimums révèle un écart thermique faible en saison pluvieuse et bien prononcé en saison sèche.

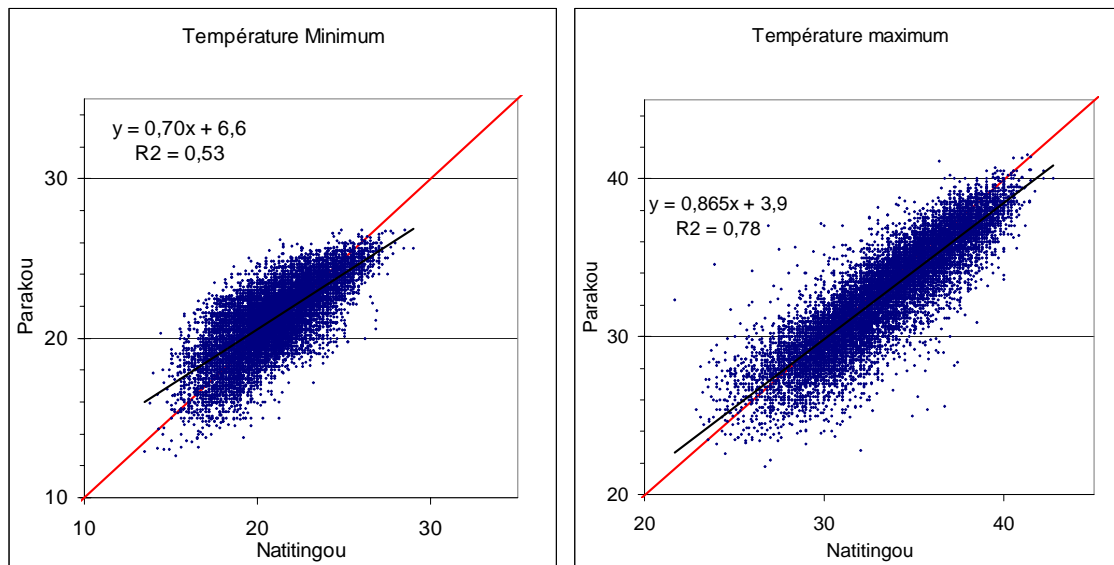


Figure 5 : Corrélation des températures minimum et maximum relevées à Natitingou et Parakou.

Les températures minimums journalières sur la station de Parakou sont moyennement corrélées avec celles de Natitingou. La droite de régression s'écarte un peu de la diagonale et $R^2=0,53$ pour les températures minimums.

Les températures maximums journalières sont quant à elles relativement bien corrélées avec un coefficient de détermination $R^2=0.78$.

3. 1. 4. Humidité relative de l'air

- Minimum

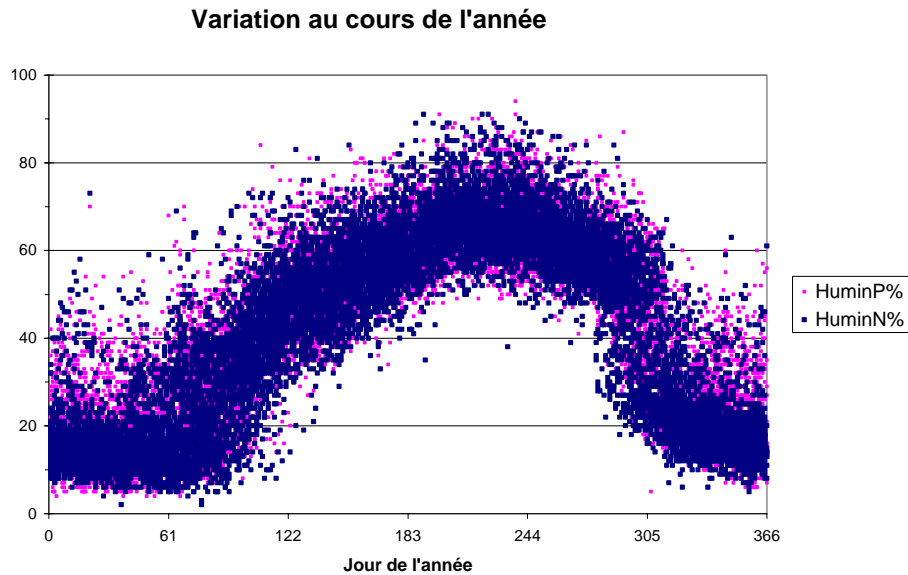


Figure 6 : Evolution saisonnière de l'humidité mini à Parakou et Natitingou

Ce nuage de points caractérisant l'évolution saisonnière de l'humidité mini à Parakou et Natitingou, révèle le mouvement unimodal de la saison pluvieuse dans le septentrion, région du pays où se situent les deux stations synoptiques (Parakou et Natitingou).

Les deux extrémités englobant les trois premiers mois de l'année ainsi que les deux derniers mois de l'années à savoir : janvier, février, mars ; et novembre, décembre correspondent à la saison sèche dans les localités de Parakou et Natitingou. L'humidité minimum est très faible avec des valeurs pour la plus part inférieures à 40%.

En revanche, d'avril à octobre, période qui correspond à la saison pluvieuse, les valeurs de l'humidité mini augmentent et certaines avoisinent 90% quand les pluies atteignent leurs maximums.

- Maximum

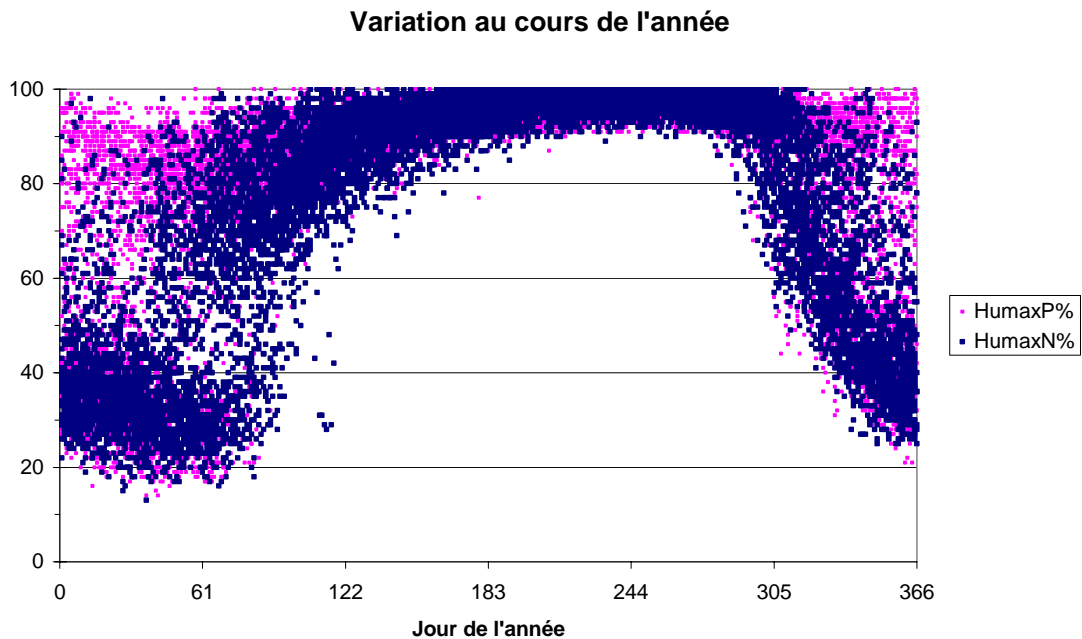


Figure 7 : Evolution saisonnière de l'humidité maximum à Parakou et Natitingou

A la différence du nuage de points caractérisant l'évolution saisonnière de l'humidité minimum à Parakou et Natitingou, le nuage de points de la figure 7 varie dans une fourchette de 15 à 100%.

Pendant la saison pluvieuse, les valeurs du maximum de l'humidité sont rarement inférieures à 95% et tendent le plus souvent vers 100%. Aucune valeur n'excède 100%.

Pendant la saison sèche, on constate que l'humidité à Natitingou est régulièrement inférieure à 50% tandis que à Parakou elle est bien souvent supérieure à 60%.

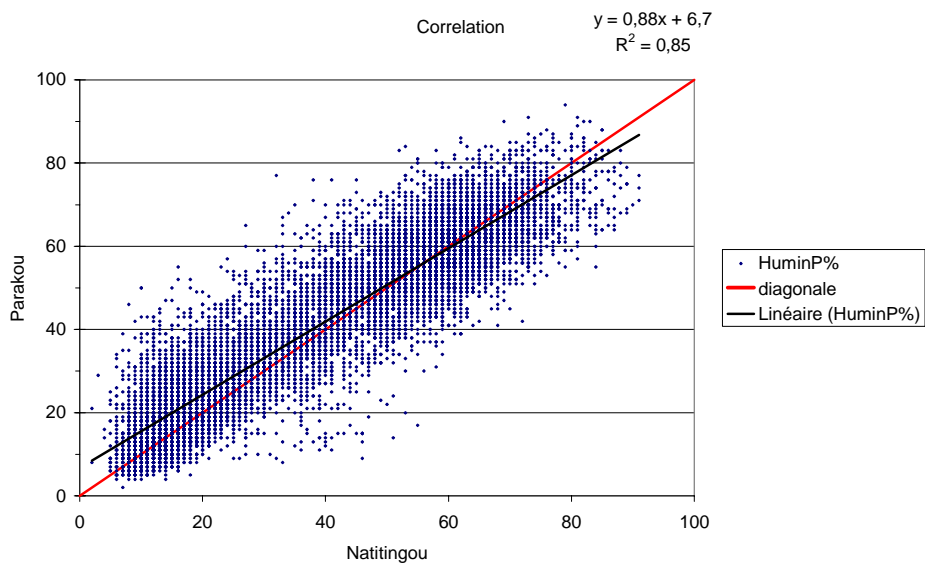


Figure 8 : Corrélation de l'humidité mini entre Parakou et Natitingou

Le minimum de l'humidité journalière à Parakou est bien corrélé avec le minimum de l'humidité à Natitingou. La droite de régression se rapproche de la diagonale et le coefficient de détermination $R^2=0,85$ soit 85% de variance expliquée.

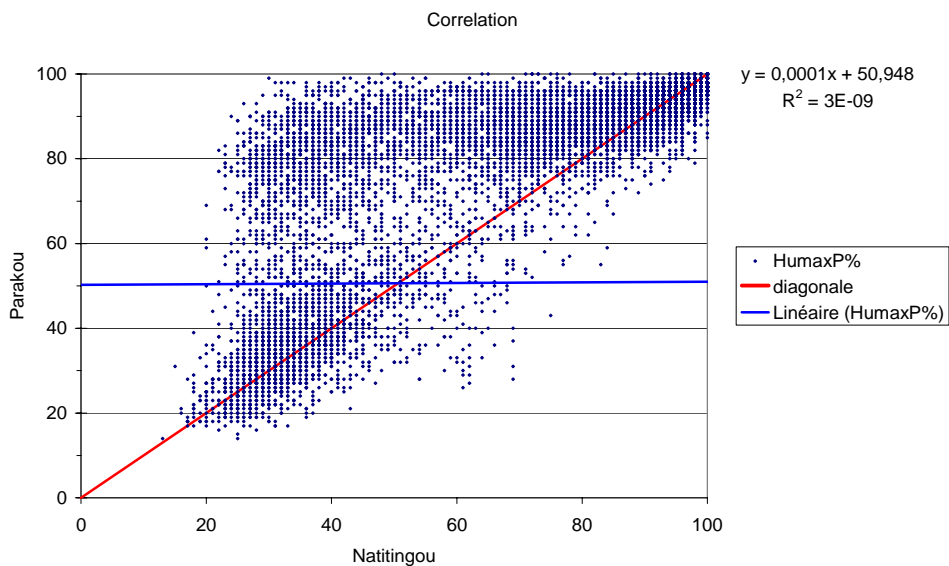


Figure 9 : Corrélation de l'humidité maxi entre Parakou et Natitingou

La corrélation de l'humidité maxi entre Parakou et Natitingou est très faible voir négligeable. La droite de régression est parallèle à l'axe des abscisses avec

une pente nulle. Aucune variance n'est expliquée, la valeur du R^2 est négligeable ($R^2=3E-09$).

3. 1. 5. Tension de vapeur

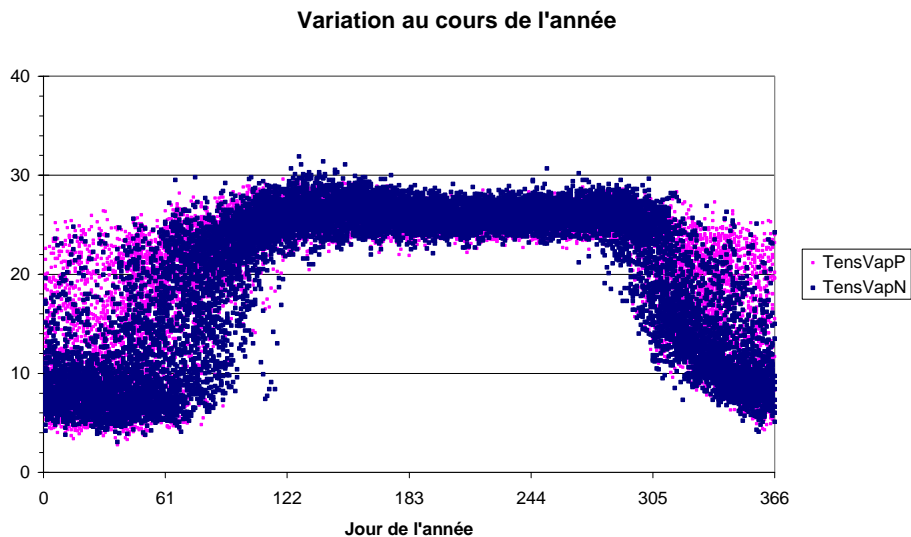


Figure 10 : Evolution saisonnière de la tension de vapeur de 1965 à 2006 entre Parakou et Natitingou

L'analyse de la figure ci-dessus révèle deux principales phases dans l'évolution de la tension de vapeur au cours d'une année à Natitingou comme à Parakou.

La première phase se situe dans une période qui correspond bien à la saison sèche c'est-à-dire de novembre à mars où la tension de vapeur connaît une baisse progressive allant de 30hPa à 5hPa voir moins de 5hPa, soient 2,78hPa et 3,04hPa.

Quant à la deuxième phase, elle correspond à la même période que celle de la saison pluvieuse c'est-à-dire avril à octobre. La tension de vapeur est pratiquement constante et se situe dans la fourchette de 20 à 30hPa.

Notons qu'en saison sèche, les valeurs maximales de la tension de vapeur se retrouvent à Parakou.

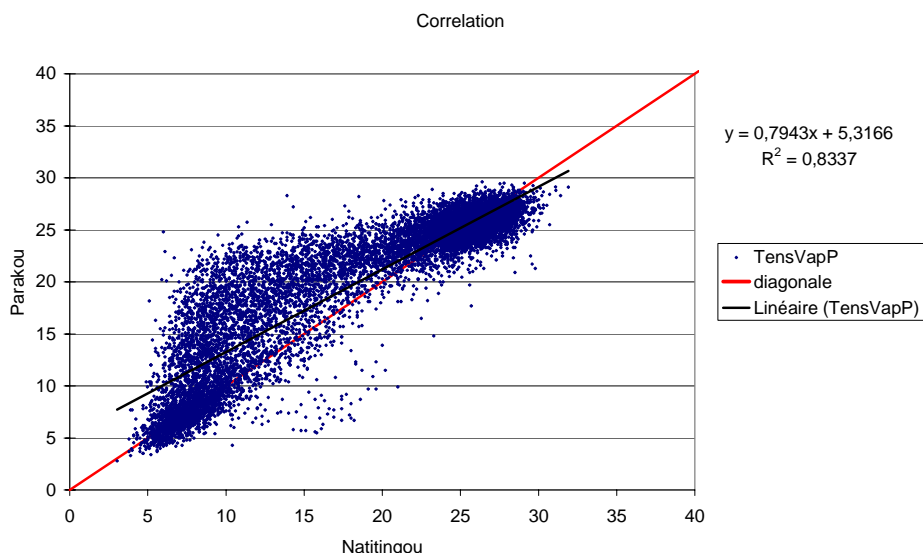


Figure 11: Corrélation de la tension de vapeur entre Parakou et Natitingou

Le nuage de points sur la figure 10 révèle une très bonne corrélation de la tension de vapeur entre Natitingou et Parakou. 83% de la variance est expliquée. La droite de régression s'écarte un peu de la diagonale. Cet écart à la diagonale pour les valeurs entre 10 et 20 hPa correspond à la saison sèche où les valeurs de tension de vapeur à Parakou sont plus élevées qu'à Natitingou.

3. 1. 6. Vitesse du vent

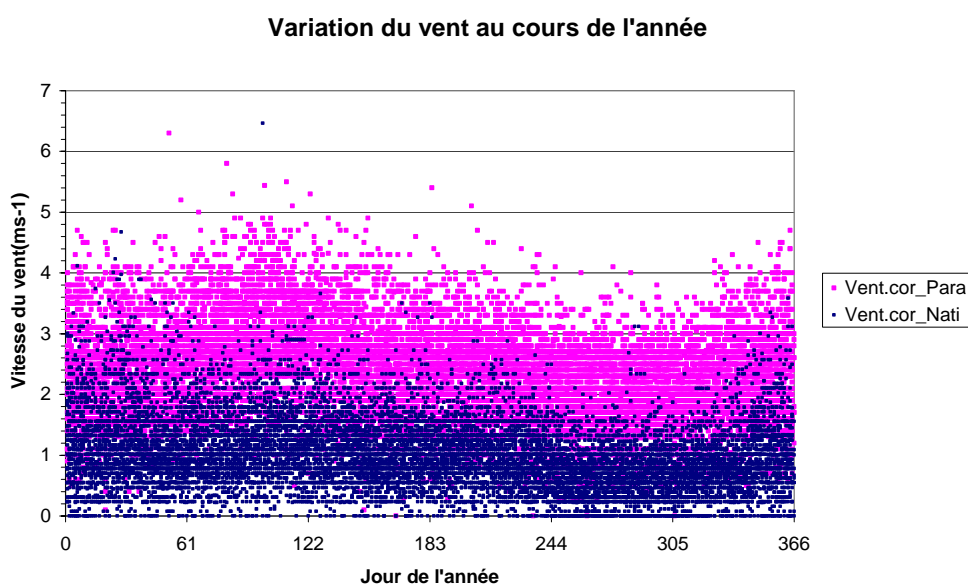


Figure 12 : Evolution saisonnière de la vitesse du vent

Durant la période d'étude (1965 – 2006), le vent moyen journalier dépasse rarement 6ms^{-1} avec un maximum de 8.3ms^{-1} relevé une seule fois à Natitingou. La vitesse du vent est peu variable au cours de l'année, notons toutefois que de septembre à novembre on observe une légère diminution de la vitesse du vent sur les deux stations.

Entre les localités de Natitingou et Parakou, la vitesse du vent varie nettement, et sur toute la période d'étude, les valeurs de la vitesse moyenne du vent à Parakou ($2,4\text{ms}^{-1}$) sont en général supérieures à celle de Natitingou ($1,0\text{ms}^{-1}$). Il faut toutefois prendre ces mesures avec prudence car une enquête sur place nous a amené à constater que l'environnement des anémomètres était variable entre les deux stations, Natitingou étant nettement plus enclavé que Parakou. Des arbres environnants ayant trop pris d'ampleur ont d'ailleurs été coupés à Natitingou vers 1980 (date non précisée) ce qui influence cette variable pour un même site au cours du temps.

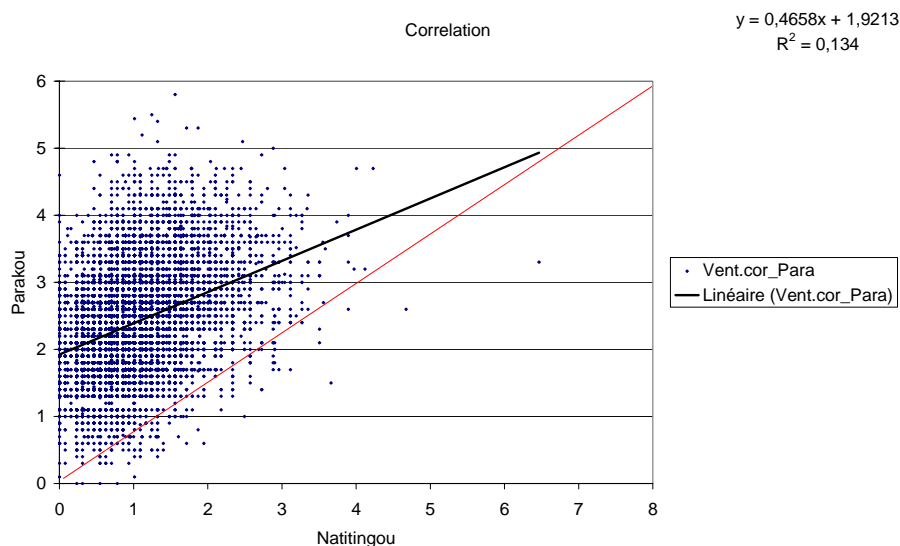


Figure 13: Corrélation de la vitesse du vent entre Parakou et Natitingou

Entre Parakou et Natitingou, la corrélation de la vitesse du vent est mauvaise, la courbe des tendances s'écarte complètement de la diagonale. $R^2=0,13$ ce qui signifie que 13% seulement de la variance de Parakou est expliquée par le vent de Natitingou.

3.2 Evapotranspiration de référence

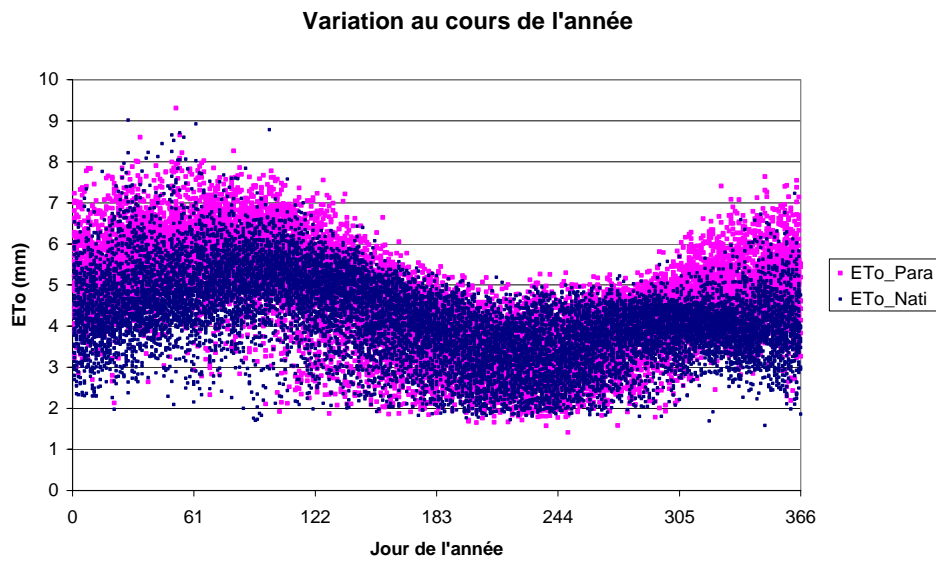


Figure 14 : Evolution saisonnière de l'ETo à Parakou et Natitingou

Le cycle saisonnier est le même à Natitingou et à Parakou. En saison sèche, l'air est sec et la couverture nuageuse réduite, l'évapotranspiration de référence est forte, entre 2 et 8 mm.j⁻¹ (moyenne 5 mm.j⁻¹). Au cours de la saison pluvieuse les données d'évapotranspiration diminuent considérablement pour atteindre leur niveau le plus bas (3 mm.j⁻¹ en moyenne) au moment où l'ennuage et les hauteurs de pluie atteignent leur maximum en saison pluvieuse.

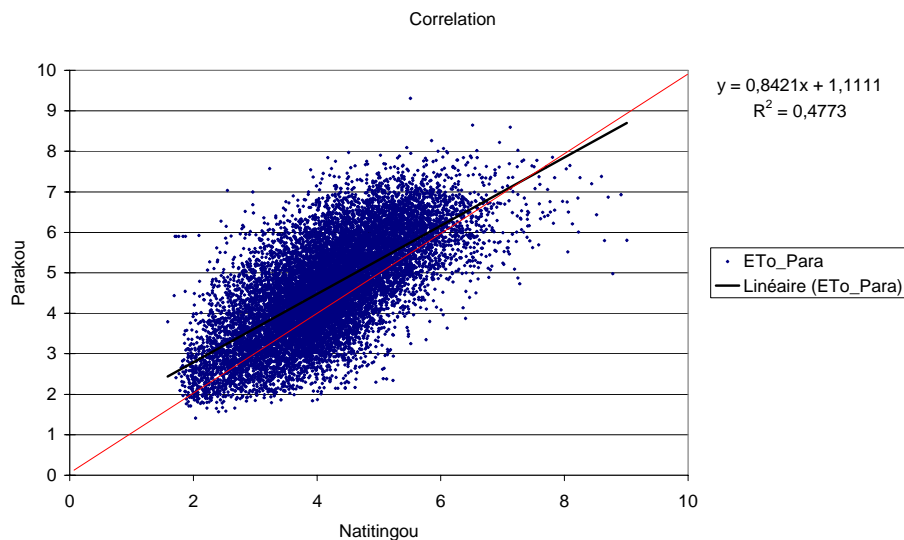


Figure15 : corrélation de l'évapotranspiration de référence entre Parakou et Natitingou

La corrélation de l'ETo entre Parakou et Natitingou est faible ($R^2=0,47$). Ce résultat s'explique par le fait que les deux stations ont une évolution saisonnière comparable (alternance de saison sèche et de saison des pluies) mais qu'à l'intérieur de ces saisons, l'évolution journalière est variable pour ces deux stations distantes de 170 km. Cette variation spatiale de la valeur journalière est due à celle des variables météorologiques qui entrent dans le calcul de l'ETo, notamment l'insolation, l'humidité max et le vent qui sont les plus variables sur le plan spatial comme on a pu le constater ci-dessus.

La courbe de tendance s'écarte de la diagonale avec une ETo supérieure à Parakou pour les valeurs fortes mais inférieure pour les valeurs très élevées ($ETo > 6\text{mm}$).

CHAPITRE IV- ANALYSE DE L'EVOLUTION ANNUELLE, INTERANNUELLE, ET SAISONNIERE DE L'ET_o

Après avoir décrit le comportement moyen des différentes variables intervenant dans le calcul de l'ET_o, nous allons maintenant étudier, pour chacune de ces variables, si on peut détecter une tendance ou une rupture significative au cours des 42 années disponibles, ou si on observe une évolution du cycle saisonnier pendant cette période. Nous étudierons de la même façon l'évolution éventuelle de ET_o à Parakou et Natitingou.

Pour mieux étudier la variabilité des paramètres météorologiques observés, nous avons choisi dans les différentes séries, deux périodes d'années, une première qui recouvre les cinq premières années de la série, c'est-à-dire de 1965 à 1969 et souvent représentée par la couleur bleu sur les figures et une seconde tranche allant de 2002 à 2006 souvent représentée par la couleur rouge dans le cas des variabilités saisonnières. La première période regroupe les 5 années situées avant la rupture pluviométrique de 1970 signalée par tous les auteurs (Nicholson, 1981 ; Hubert et al., 1989 ; Le Barbé et al, 2002) en Afrique de l'Ouest et également observée au nord Bénin (Le Lay et Galle 2005). La seconde période plus récente a une durée équivalente de 5 ans.

Sur les figures de l'évolution saisonnière des différentes variables, les deux colonnes de l'extrémité caractérisent la saison sèche tandis que celles du milieu caractérisent la saison pluvieuse.

4. 1. La pluie

Le résultat des tests (Hubert et Buishand) montre une rupture dans les séries de pluies entre les années 1969 et 1970 à Natitingou (figure 16). A Parakou, la rupture n'est pas détectée. Néanmoins la tendance est à la baisse sur les deux stations et l'équation de la courbe des tendances présente des données de pente négatives sur les deux stations.

Quant nous considérons une moyenne de 1965 à 1969 comparée à celle de 2002 à 2006, c'est-à-dire les données en début de série et celles vers la fin, les hauteurs de pluie ont considérablement baissé après 1970 notamment à Natitingou (-57%). A Parakou les pluies ont connu une baisse de 49%.

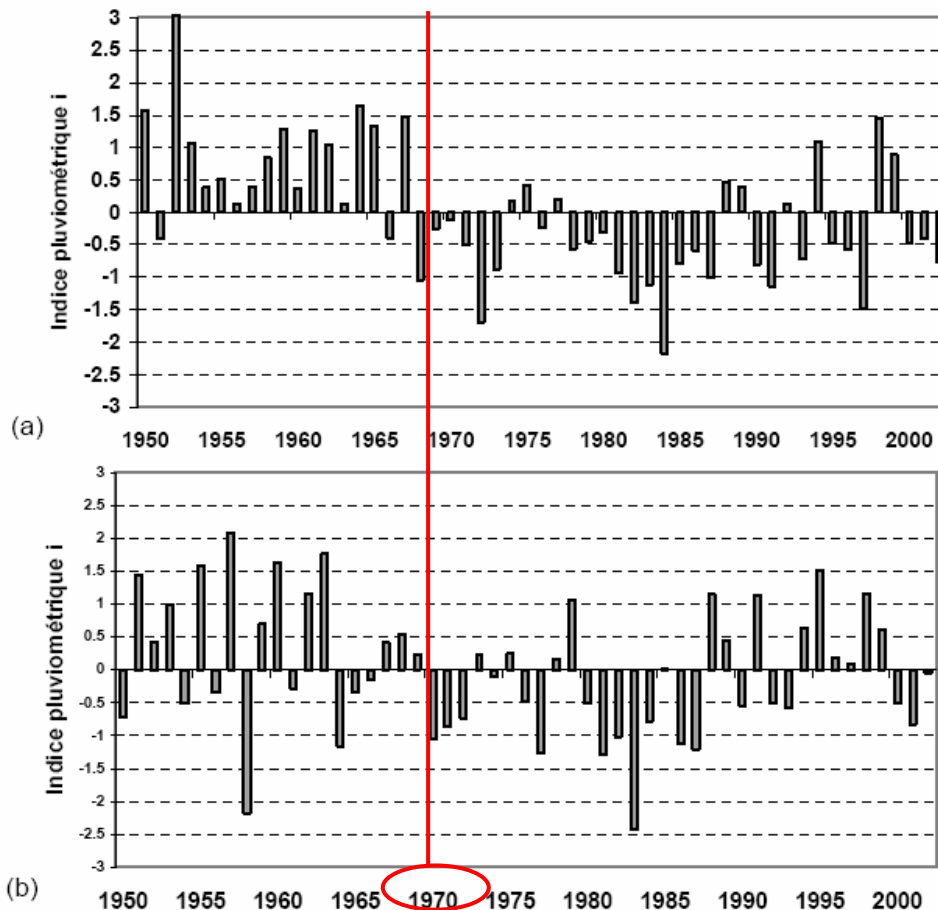


Figure 16 : Graphe des anomalies de pluie (a) Degrés carré à Niamey, (b) Ouémé supérieur. Source : Le LAY et GALLE (2005)

Ainsi la courbe des hauteurs de pluie des années 1965-1969 est entièrement au dessus de celles des années récentes à Natitingou. Ce résultat est en accord avec le rapport du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) (Février 2007) qui dit ceci : «... Il est très probable que les précipitations augmenteraient aux hautes latitudes et probablement diminueraient dans les régions subtropicales. Le modèle de ce changement est similaire à ce qui a été observé durant le 20^e siècle.» Par contre à Parakou la tendance à la baisse dans les années récentes ne se pose pas avec la même acuité.

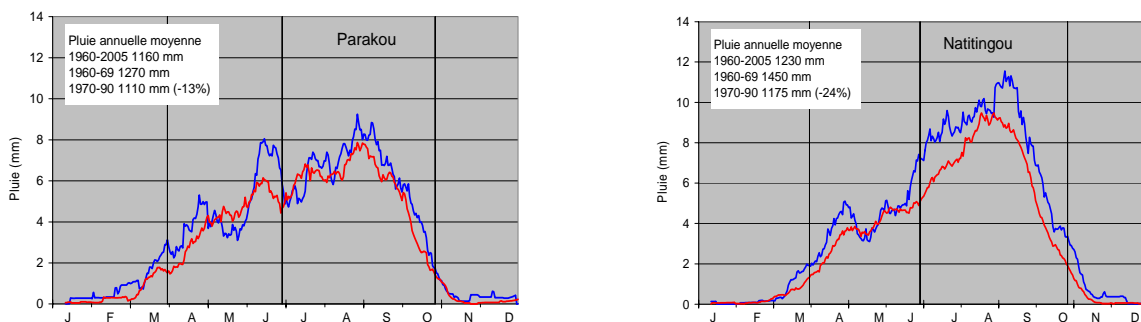


Figure 17 : Cycle saisonnier de la pluie à Parakou et Natitingou

A Parakou comme à Natitingou, nous notons sur les deux courbes la présence de deux saisons dont une sèche de Novembre à Mars et une pluvieuse d’Avril à Octobre.

La courbe en couleur rouge étant en dessous de la courbe bleu caractérise la baisse des hauteurs de pluie au cours des années récentes sur notre domaine d’étude. Cette baisse a eu lieu à partir des années 1969, 1970 où Natitingou a connu entre 1970 et 1990 une baisse de 24% par rapport aux années précédentes et Parakou un taux de baisse de 13%.

4. 2. La température de l’air

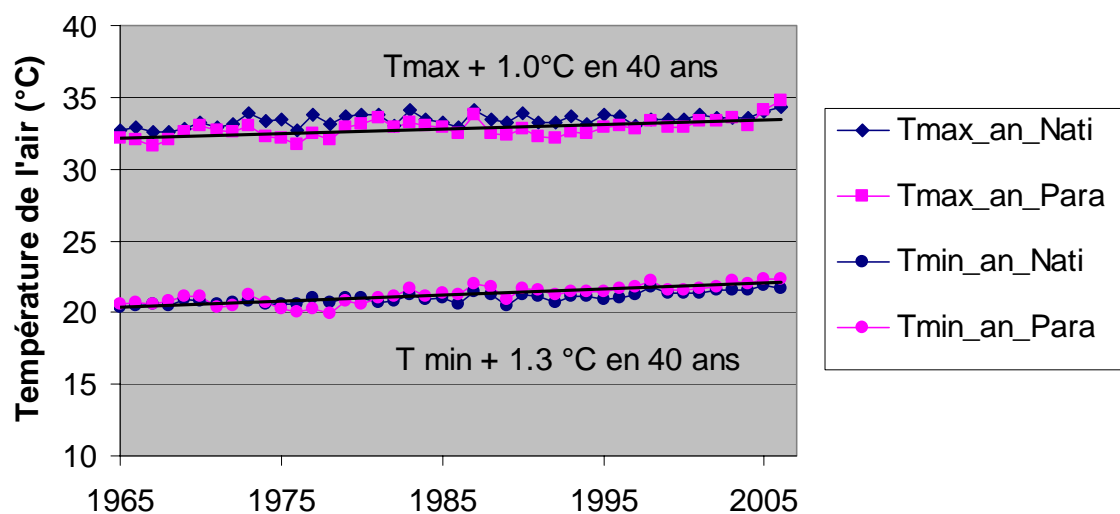


Figure 18 : Variabilité interannuelle de la température de l’air (1965-2006)

- Température minimum

Les différents tests appliqués nous permettent de déduire que les données suivent une loi normale à Parakou comme à Natitingou, l'autocorrélation est parfaite, une information renseigne sur la suivante. On a une tendance linéaire avec 66% de variance expliquée à Natitingou et une pente égale à 0,0258 mm.an-1, à Parakou, la pente est de 0.04 mm.an-1 ($r^2= 65\%$).

En moyenne sur une période de 42 ans, la température minimum a augmenté de 1,4°C à Parakou et 1,0° à Natitingou.

- Température maximum

Les données de température maximum ne suivent pas une loi normale. Il est noté une tendance linéaire croissante sur les deux stations. La courbe des tendances au niveau des deux séries étudiées révèle une augmentation de température moyenne maximum annuelle de l'ordre de 1,7° C à Parakou et 1,1° C à Natitingou en 42 ans.

On peut noter que ce dernier résultat est supérieur à la tendance globale estimée à 0.74°C en 100 ans (1906-2005), avec une hausse de cette tendance sur la dernière décennie (1906 – 2005) (GIEC, Février 2007).

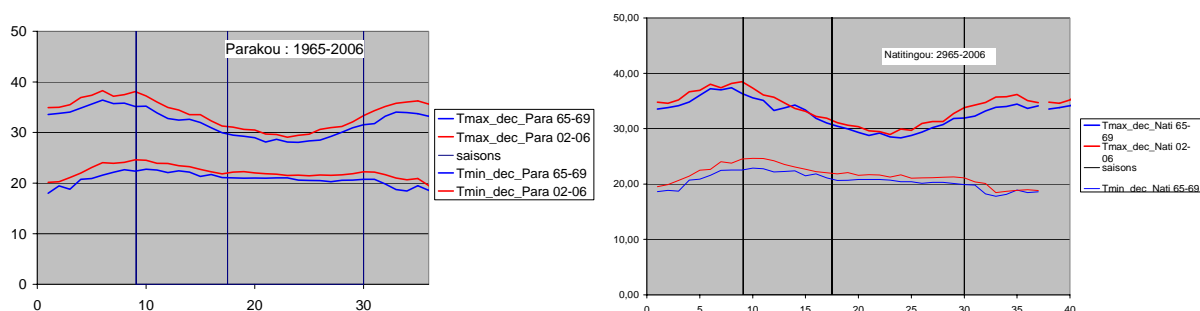


Figure 19 : Evolution saisonnière de la température de l'air (1965-2006)

A Parakou comme à Natitingou, la croissance de la température de l'air mini et maxi au cours des dernières années est également répartie sur toutes les saisons. D'où une réelle augmentation des données de température sur toute la période d'étude.

4. 3. L'Humidité relative de l'air

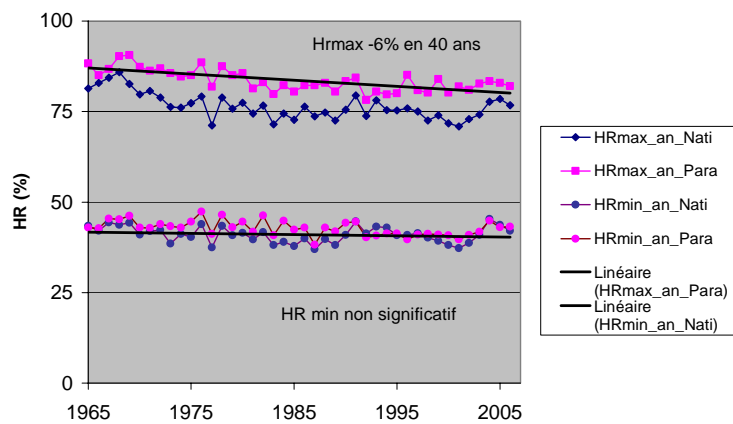


Figure 20 : Evolution interannuelle de l'humidité de l'air entre 1965 et 2006

Les différents tests appliqués nous permettent de déduire que les données de l'humidité mini de Parakou et Natitingou suivent une loi normale avec une tendance à la baisse non significative. Quant aux humidités maxi, on note une tendance linéaire décroissante sur les deux stations : -6,0% à Parakou et -7,4 à Natitingou.

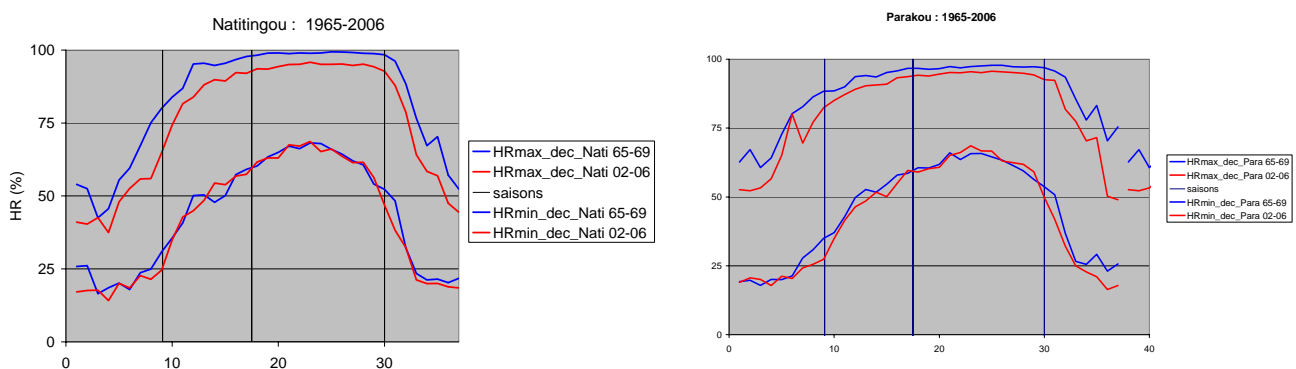


Figure 21 : Evolution saisonnière de l'humidité de l'air (1965-2006)

Entre les deux périodes d'étude (1965-1969 et 2002-2006), on note à Parakou comme à Natitingou, une diminution constante de l'humidité maximum en saison pluvieuse et une plus large diminution en saison sèche, notamment à Parakou en saison

sèche. Entre les deux périodes choisies l'humidité mini n'a connu aucune modification significative.

4. 4. Insolation

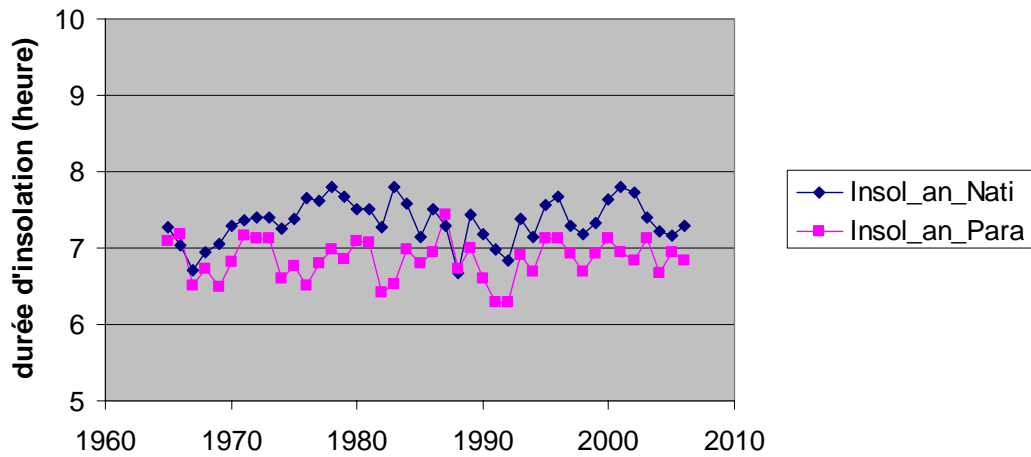


Figure 22: Evolution interannuelle de l'insolation entre 1965 et 2006

La durée d'insolation à Natitingou (moyenne 7,0h par jour) est restée supérieure à celle de Parakou (6,8 h.j-1) sur toute la période d'étude. L'analyse des courbes de l'insolation sur le plan interannuel ne présente pas de tendance significative. Toutefois les courbes restent bruitées. Le coefficient de variation est $R^2=2,6\%$ à Natitingou et $R^2=0,1\%$ à Parakou.

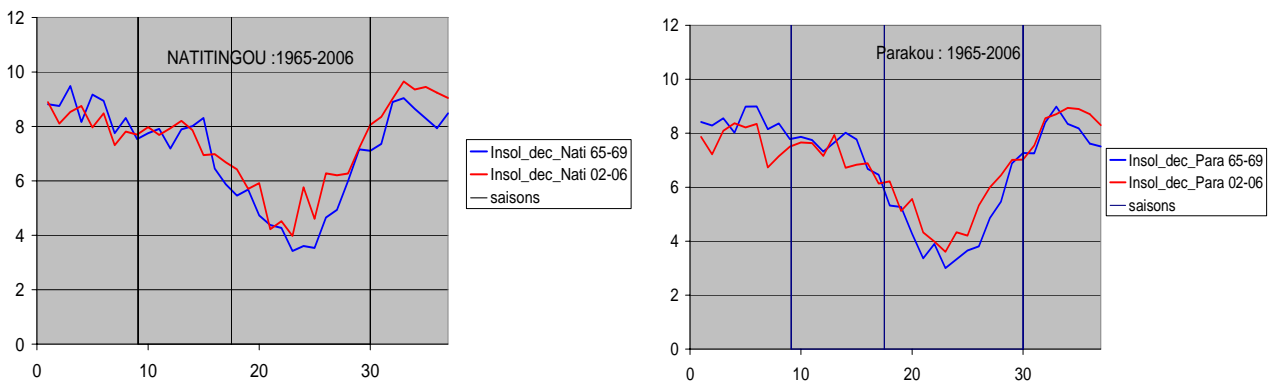


Figure 23 : Evolution saisonnière de l'insolation (1965-2006)

La moyenne annuelle de la durée d'insolation n'a pas changé pendant la période 1965-2002, mais sa répartition au cours de l'année a changé. L'analyse de la variabilité saisonnière permet de détecter une augmentation de la durée d'insolation en

saison pluvieuse et une diminution de la durée d'insolation en saison sèche entre les deux périodes bleue (1965-1969) et rouge (2002-2006), à Natitingou comme à Parakou.

4. 5. Vitesse du vent

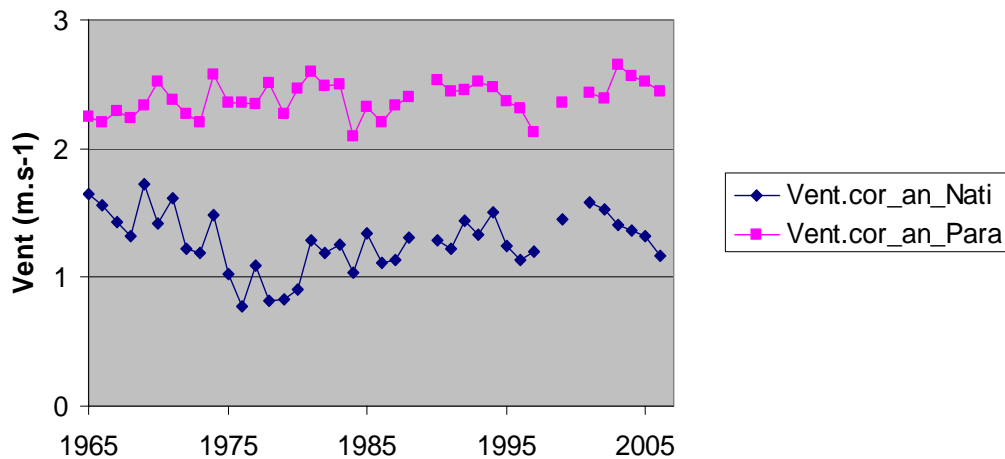


Figure 24 : Evolution interannuelle du vent entre 1965 et 2006

Le vent annuel moyen à Parakou ($2,3\text{m.s}^{-1}$) est toujours supérieur à celui de Natitingou ($1,5\text{m.s}^{-1}$). Le résultat des tests appliqués nous permet de noter une tendance linéaire à Parakou mais pas à Natitingou. Le coefficient de détermination est de 12% à Parakou avec une légère augmentation de $0,1\text{ ms}^{-1}$ (+5%) sur la période d'étude (1965- 2006).

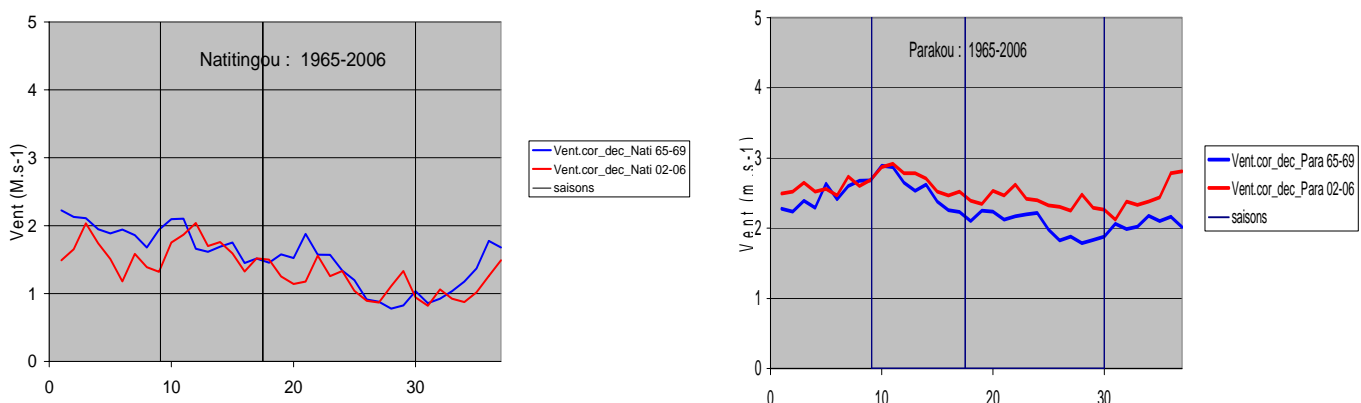


Figure 25 : Evolution saisonnière du vent entre 1965 et 2006

Une différence entre les stations apparaît au niveau de l'analyse de la variabilité saisonnière. A Parakou, il est enregistré une augmentation permanente de la vitesse du vent sur toutes les saisons, mais plus marquée de juin à décembre, c'est-à-dire en deuxième partie de saison des pluies et pendant la saison sèche. Tandis qu'à Natitingou le vent a diminué en saison sèche au cours des années récentes par rapport aux années 1965-1969.

4. 6. Tension de vapeur

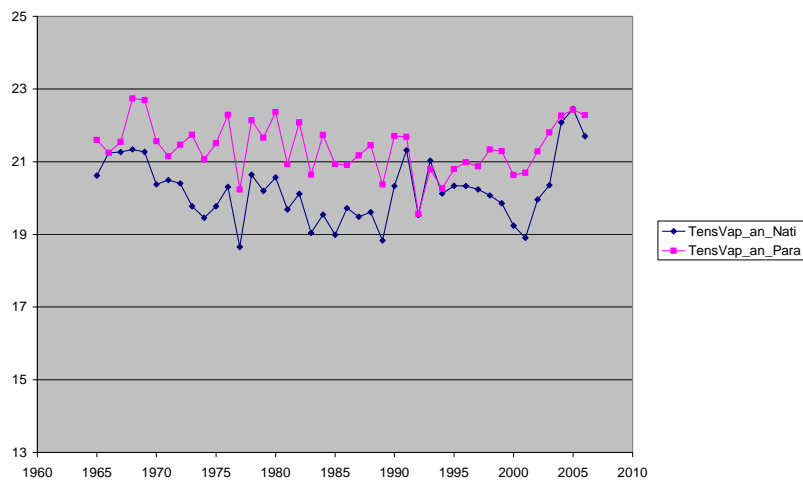


Figure 26 : Evolution interannuelle de la tension de vapeur entre 1965 et 2006

La tension de vapeur à Parakou est constante sur la période d'étude et toujours supérieures à celles de Natitingou. Aucune tendance significative n'est enregistrée.

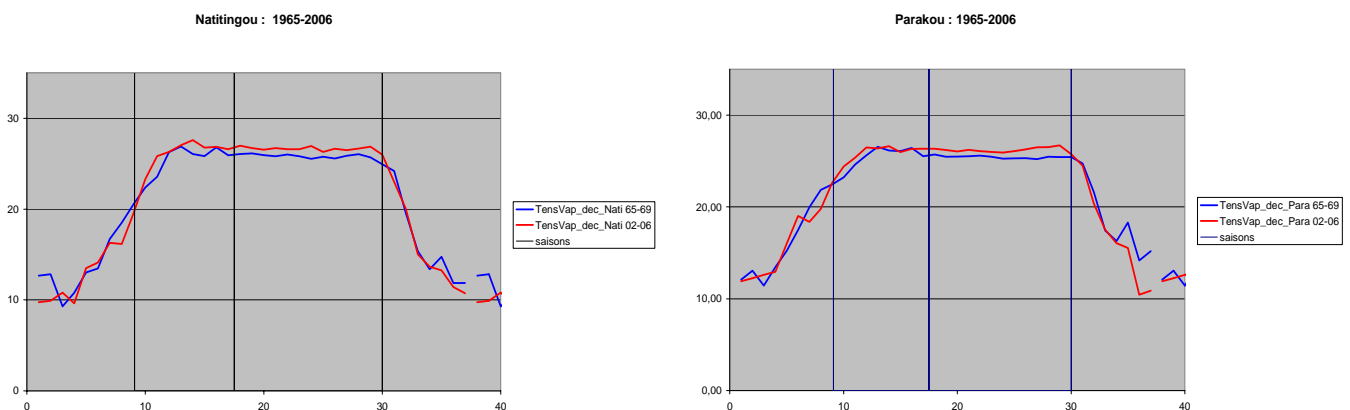


Figure 27 : Evolution saisonnière de la tension de vapeur entre 1965 et 2006

Entre les deux périodes mises en exergues, on note ici une légère augmentation de la tension de vapeur au cours de la saison pluvieuse et une diminution en saison sèche, à Parakou, comme à Natitingou.

4. 7. Pression atmosphérique

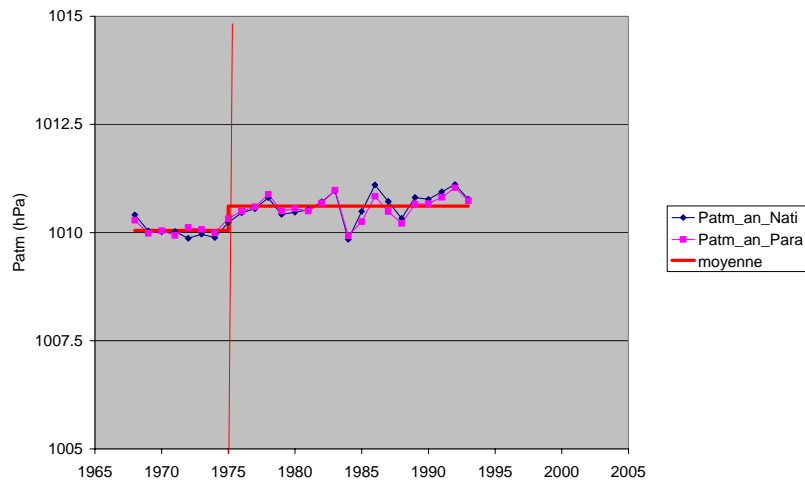


Figure 28: Evolution interannuelle de la pression atmosphérique entre 1968 et 1993

La pression atmosphérique suit une évolution parfaitement identique à Parakou et à Natitingou. Les valeurs moyennes annuelles sont identiques. Elles suivent une loi normale. Il est noté une seule rupture en 1975 (tracée sur le graphe).

Il est noté une augmentation de la pression atmosphérique de 1hPa environ sur la période d'étude.

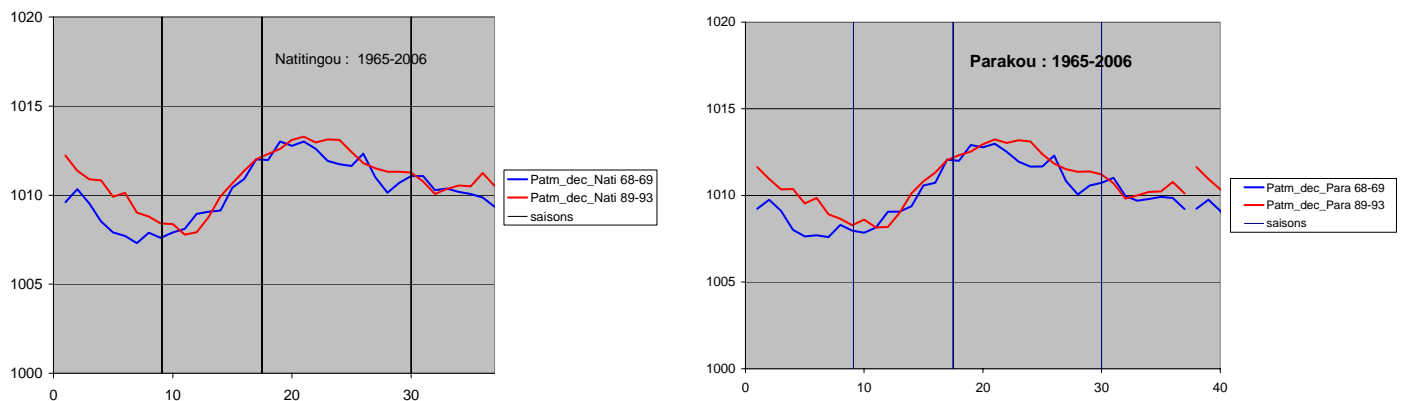


Figure 29: Evolution saisonnière de la pression atmosphérique entre 1968 et 1993

L'augmentation de la pression moyenne annuelle notée ci-dessous est entièrement due à celle de la saison sèche où elle est très marquée. Il n'y a pas d'évolution de la pression atmosphérique en saison des pluies.

4. 8. Evolution interannuelle et saisonnière de l'ET₀

4. 8. 1. Evolution interannuelle de l' ET₀

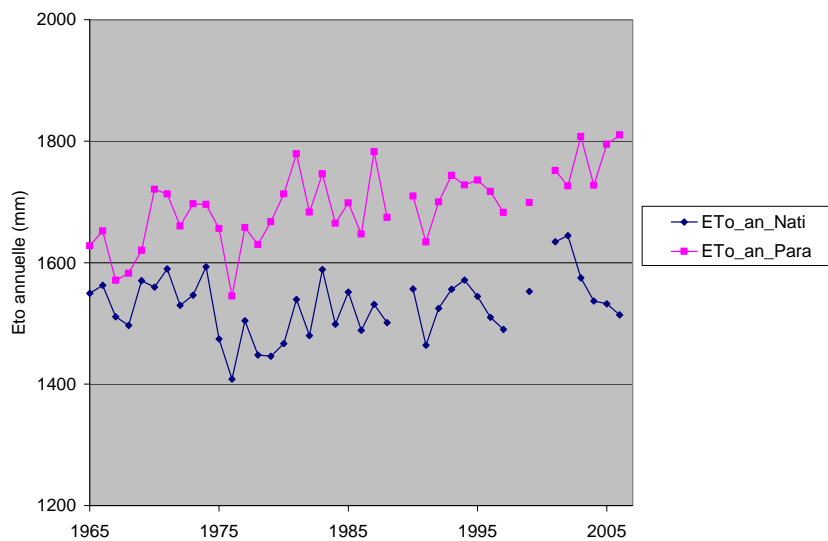


Figure 30 : Evolution interannuelle de l'ET₀ de Natitingou et Parakou entre 1965 et 2006

Les différents tests appliqués aux séries de Natitingou et Parakou confirment une tendance linéaire croissante à Parakou. La courbe des tendances est une droite dont l'équation est : $y = 3,296x - 4848,5$. Ce qui signifie une augmentation de l'ET₀ de 3,29 mm tous les ans. On note ainsi une augmentation de l'évapotranspiration de référence de +138mm de 1965 à 2006 (+46%).

En revanche, les données de Natitingou ne montrent pas de tendance significative au cours de la même période.

4. 8. 2. Evolution saisonnière de l'ET₀

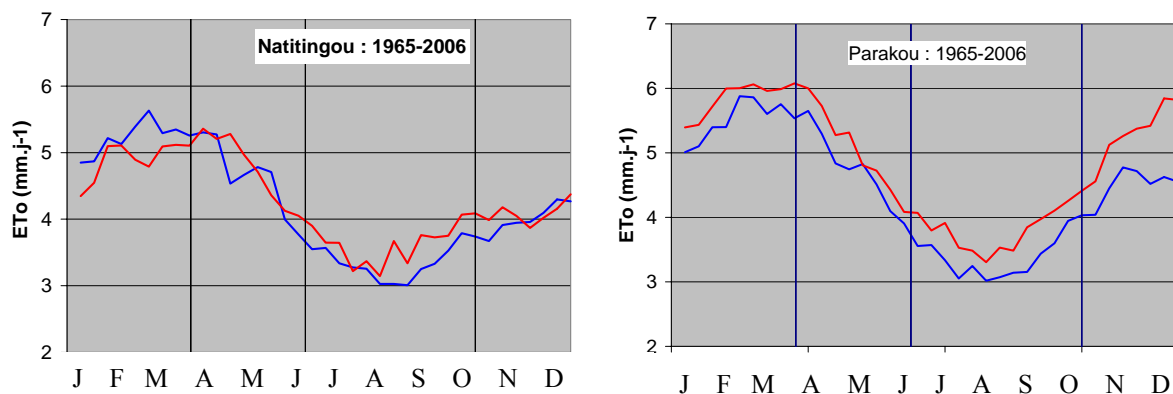


Figure 31: Evolution saisonnière de l'ET₀ à Parakou et Natitingou de 1965 à 2006

A Parakou la hausse de l'ET₀ se manifeste toute l'année avec une hausse plus forte en saison sèche. A Natitingou la hausse ne concerne que la saison des pluies, l'ET₀ diminue en saison sèche. Pour les deux stations étudiées, l'évolution de l'ET₀ est la même en saison des pluies mais différente et même opposée en saison sèche. On retiendra qu'on a un accroissement de la demande atmosphérique en saison des pluies, quand l'eau est disponible.

CHAPITRE V : SENSIBILITE DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE (ET₀) AUX PARAMETRES METEOROLOGIQUES

5.1. Analyse de sensibilité

L'influence des variables météorologiques sur l'ET₀ n'est pas la même suivant le climat par exemple le vent n'a d'effet notable sur l'ET₀ que si l'air est suffisamment sec. Nous avons donc fait une étude de sensibilité de l'ET₀ aux différentes variables météorologiques pour un climat soudanien du type de celui de Parakou avec une saison sèche et une saison humide. Pour cela nous avons appliqué la même augmentation de 5% à chaque variable. Cette augmentation est fixe au cours de l'année et correspond à 5% de la valeur moyenne annuelle de la variable (tableau 2).

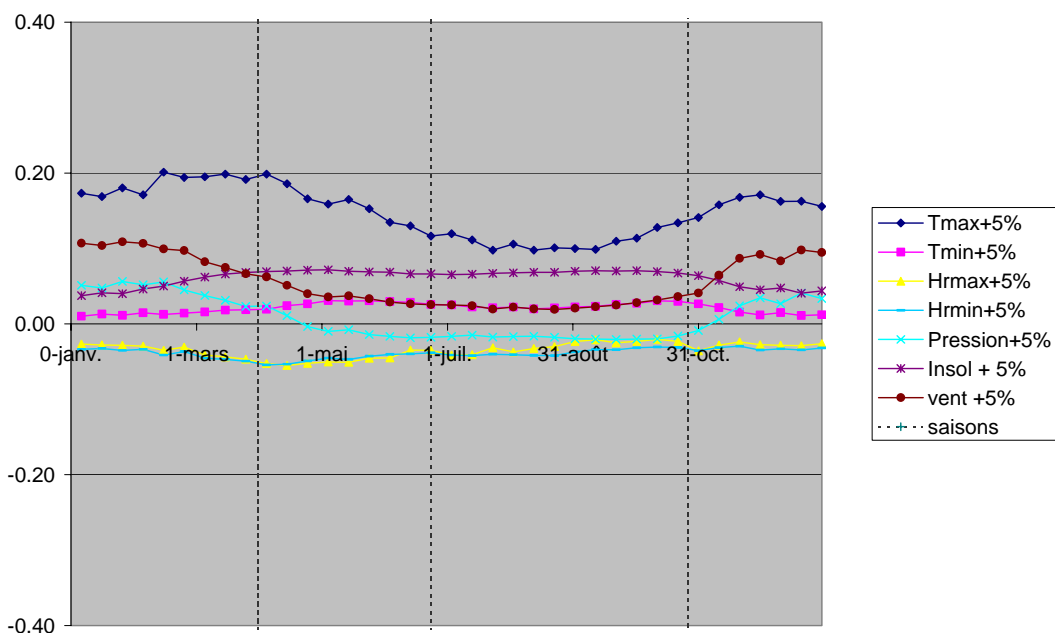


Figure 32 : Analyse de la sensibilité de l'ET₀ en climat soudanien à une variation de 5% des variables météorologiques

La figure 32 montre que la variable la plus sensible est la température maxi qui induit une augmentation de 0.2 mm de l'ET₀ en saison sèche et la moitié (0.1 mm) en saison des pluies. Tmin a une influence bien plus réduite. HR max et HR min ont une influence semblable, leurs deux courbes se chevauchent pratiquement. L'humidité relative de l'air et l'insolation ont un impact relativement constant toute l'année, alors

que le vent a une influence nettement plus marquée en saison sèche qu'en saison humide comme nous l'avons expliqué plus haut. La pression atmosphérique a un impact positif ou négatif suivant la saison.

Nous allons maintenant observer la sensibilité de l'ETo aux variations observées sur la période 1965-2006 et rappelées dans le tableau ci-dessous.

Tableau n°2 : gamme de variation des différentes variables sur la période d'étude

Variables Stations	Durée de l'isolation	Pression atmosphérique	Température mini	Température maxi	Vitesse du vent	Humidité mini	Humidité maxi
5%	0.3 h	50 hPa	1.0°C	1.4°C	0.1 m.s-1	2.2%	4.4%
Natitingou	Variable dans l'année -1.5h +2 h	+0.7 hPa	+1,0°C	+1,1°C	Variable dans l'année -0.8 à 0.5 m.s-1	-1%	-7.4%
Parakou	Variable dans l'année -1.5h +2.5h	+0,7 hPa	+1,4°C	+1,7°C	Variable dans l'année 0 à 0.8 m.s-1	-1%	-6,0%

Les températures min et max ainsi que l'humidité relative max sont dans une fourchette de variation de l'ordre de 5% mais la durée d'insolation et le vent ont subi des variations bien plus importantes dans la période considérée (1965-2006). La pression atmosphérique enfin a très peu varié (1 pour mille) et la variation de l'humidité min est non significative.

Le vent a subi une forte variation, combiné à sa sensibilité importante, il a une influence majeure sur la variation de l'ETo sur la période considérée comme on peut le constater sur les graphes ci-dessous. La durée d'insolation est la deuxième variable la

plus importante suivie par la température max. En revanche la variation de la pression atmosphérique n'a aucun impact.

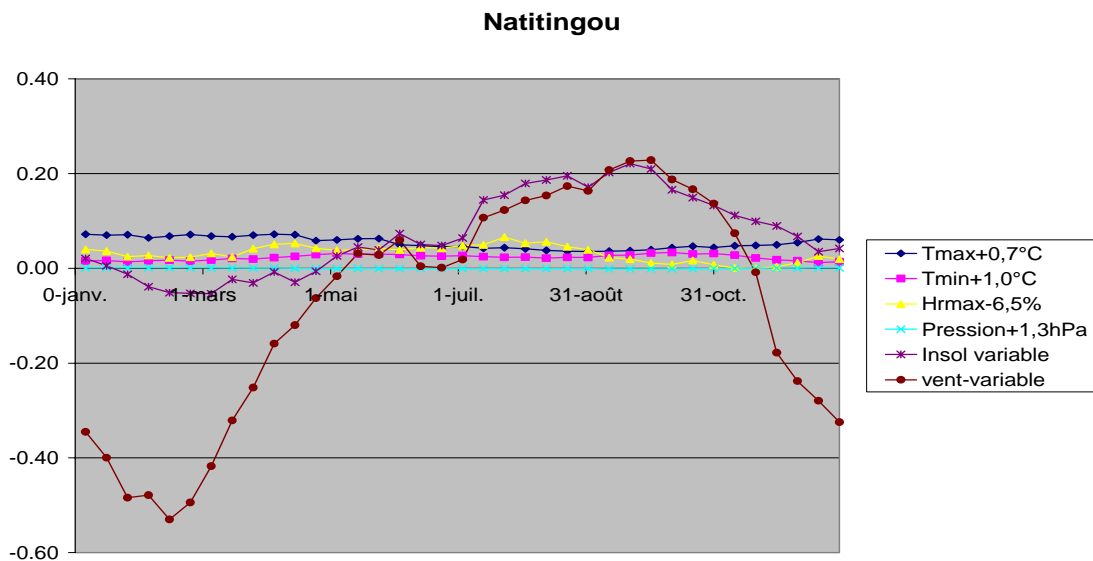


Figure 33 : Analyse de la sensibilité de l'ETo en climat soudanien aux variations effectives des variables météorologiques à Natitingou

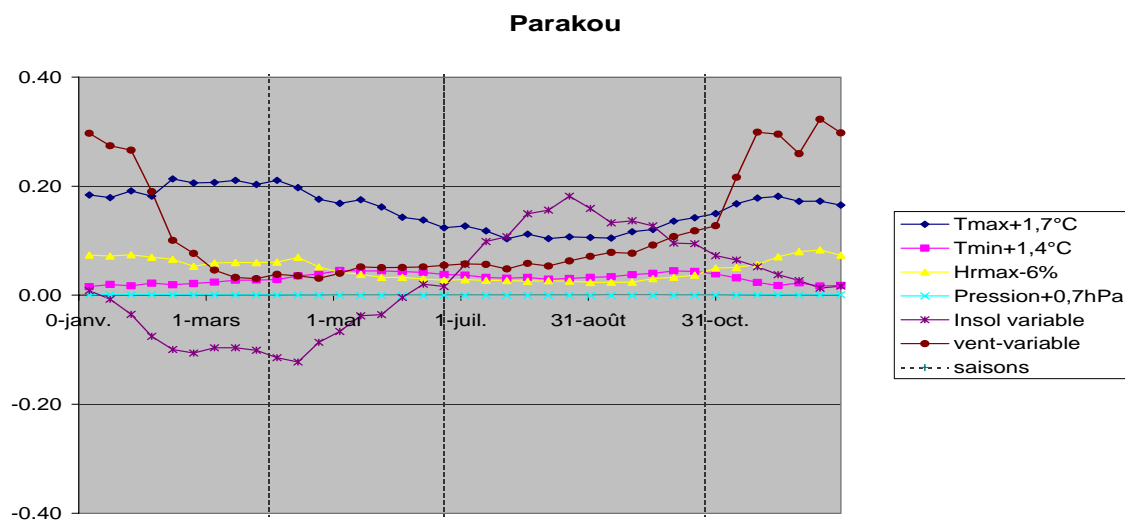


Figure 34 : Analyse de la sensibilité de l'ETo en climat soudanien aux variations effectives des variables météorologiques à Parakou

Nous allons maintenant chercher à montrer par simulation si on peut expliquer la variabilité observée du cycle annuel de l'ETo entre 1965 et 2006 par la somme de celle des variables météorologiques qui la compose. Pour cela nous allons additionner la variabilité liée à chaque variable, et la comparer à la variabilité observée.

5. 1. 1. Cas de Natitingou

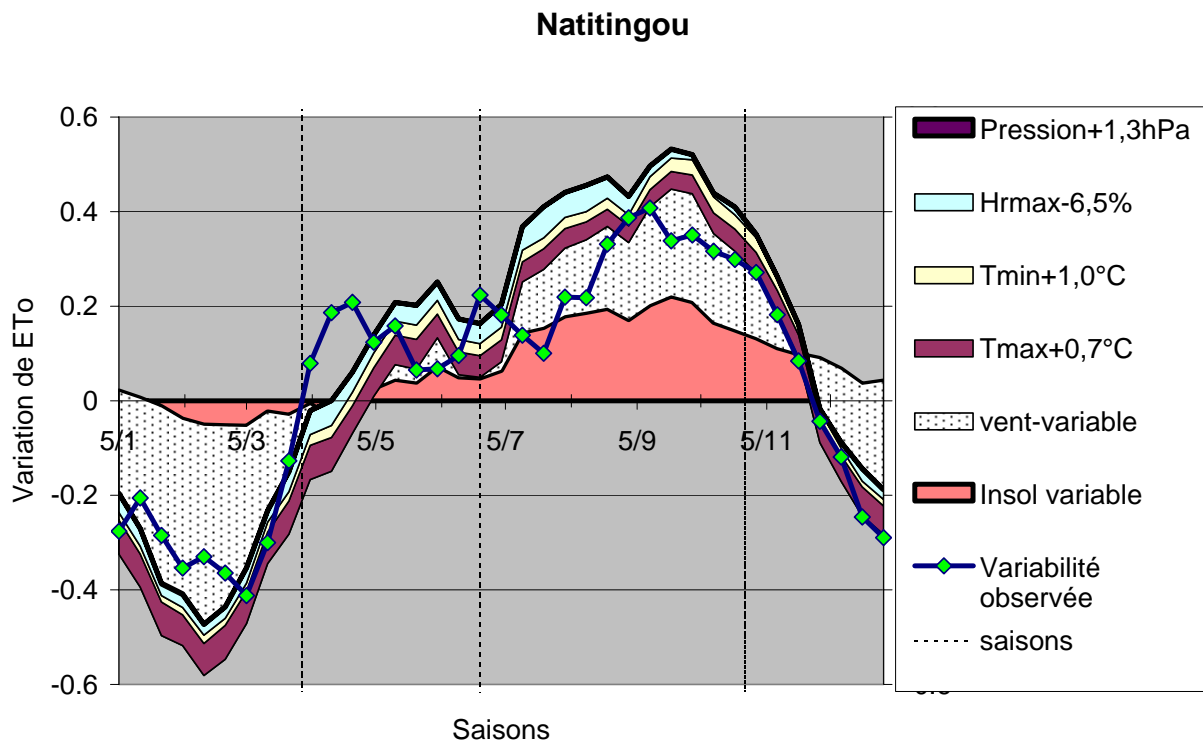


Figure 35 : Variabilité de l'Eto avec chaque variable météorologique et variabilité observée (points verts) à Natitingou pour la période 1965-2006.

Sur ce graphe on a fait varier chaque variable météorologique selon les valeurs du tableau 2. En saison des pluies, l'augmentation de la durée d'insolation (aire orange) et de la vitesse du vent (aire pointillé) jouent un rôle majeur sur l'accroissement de l'ETo. La diminution de Hmax associée à l'augmentation de Tmax et Tmin sont du second ordre sur ETo toujours en saison des pluies.

En saison sèche, la diminution du vent est le facteur principal de réduction de l'ETo. En effet, dans un air sec, la variation du vent joue un grand rôle sur le pouvoir évaporant de l'air.

On note que la variation de pression est du second ordre sur ETo et n'est pas visible à l'échelle du graphe.

Dans la réalité, l'ensemble des paramètres joue de façon concomitante et non indépendante. Notre analyse ne prend pas en compte ce fait. Pour contrôler la validité de notre simulation, on a comparé la somme des effets (aires) à la variation de l'ETo observée (courbe noire, points verts). On constate que les ordres de grandeurs sont très satisfaisants. Notre analyse nous permet d'estimer le poids de chaque variable dans la variabilité de l'ETo observée à Natitingou.

5. 1. 2. Cas de Parakou

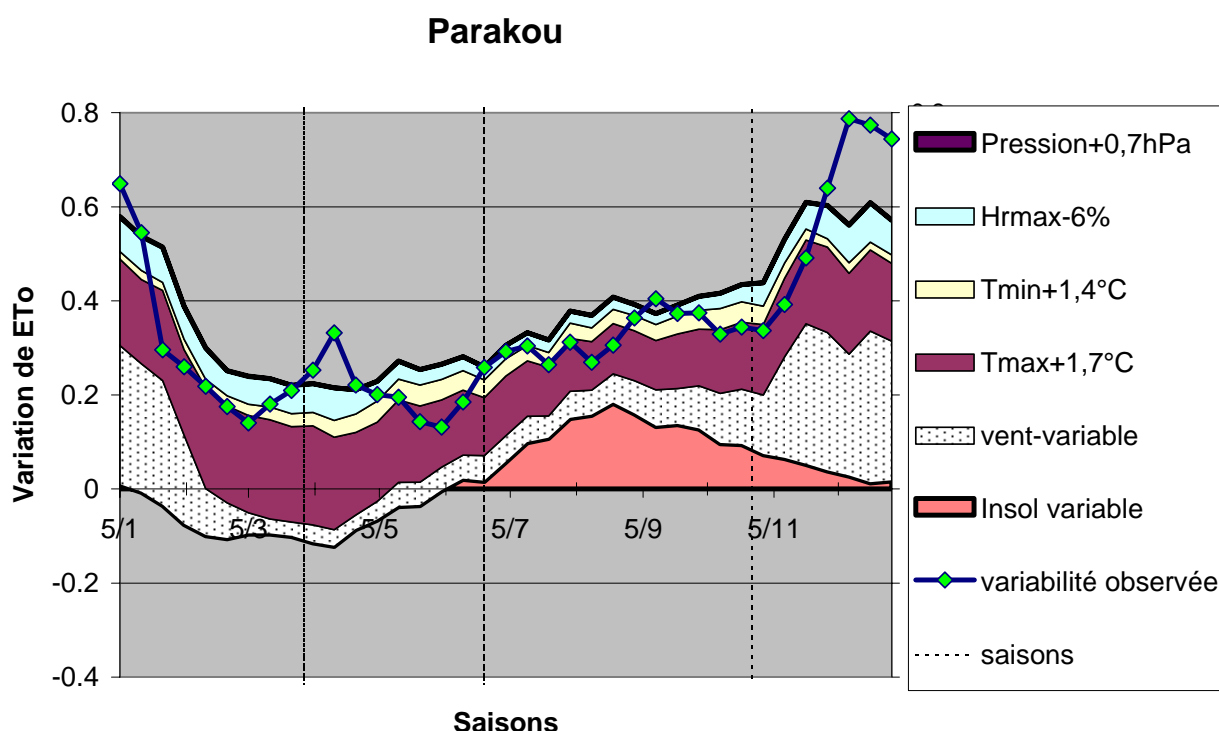


Figure 36 : Variabilité de l'Eto avec chaque variable météorologique et variabilité observée (points verts) à Parakou pour la période 1965-2006.

En saison des pluies, la hausse de l'évapotranspiration de référence est expliquée principalement par l'augmentation de la durée d'insolation, mais également par l'augmentation de la température max et celle du vent. En saison sèche, c'est l'influence du vent qui est largement dominante, suivie par celle de la température max et enfin par la baisse de la durée d'insolation. La somme des variations individuelles des paramètres météorologiques explique ici aussi de façon très satisfaisante la variation observée de l'ETo.

- **Conclusion sur les deux sites**

Sur les deux sites on constate que la variabilité de la pression joue un faible rôle. En saison sèche ce sont les variations du vent qui expliquent la variation de l'ETo observée entre les années 1965-1969 et 2002-2006. En saison des pluies, c'est l'augmentation de la durée d'insolation qui a l'effet le plus notable, renforcé par la hausse de température et le vent.

La diminution de l'ennuage liée à la diminution du nombre de systèmes convectifs observée depuis les années 1970 a entraîné une hausse de la durée d'insolation qui se traduit par une hausse significative de l'ETo. La variation de la vitesse du vent a un effet principalement en saison sèche, lorsque l'air est sec et est loin de la tension de vapeur saturante.

L'importance de la variable vent pour l'ETo nous amène à souligner l'importance de la précision de sa mesure et du soin à apporter à l'entretien régulier des alentours de la station.

5. 2. Analyse et comparaison de l'Eto entre Parakou, Natitingou et Djougou

Tout d'abord nous allons étudier l'influence des variables météorologiques choisies sur le calcul de l'ETo. En effet à Djougou on dispose de la mesure du rayonnement net contrairement aux stations synoptiques (annexe 1). Nous pourrions ensuite comparer l'ETo calculée aux stations synoptiques à celle de Djougou pour la période d'observation commune aux trois stations 2002-2006.

5. 2. 1. Comparaison des données de ETo calculé avec l'insolation et ETo calculé avec le rayonnement net : cas de Djougou (année 2006)

Notons au passage qu'à défaut du rayonnement net, on peut se servir des données de mesure de l'insolation pour déterminer l'ETo. C'est le cas au niveau des

stations synoptiques du Bénin où les mesures d'insolations sont le plus souvent utilisées pour la détermination de l'ETo.

La courbe ci-dessous nous présente le résultat des deux cas de calcul de l'ETo avec le rayonnement net et avec la durée d'insolation à Djougou en 2006.

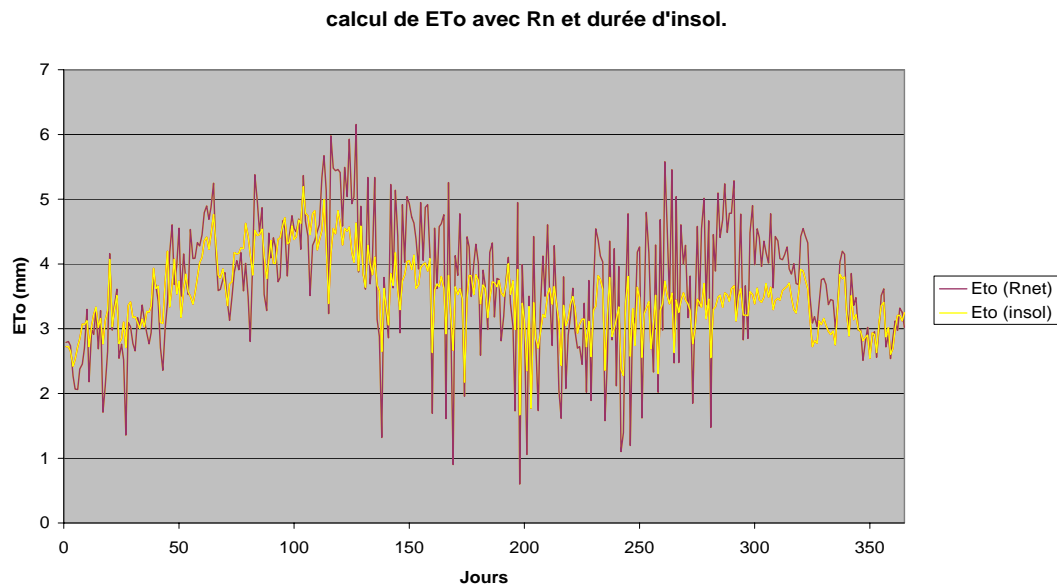


Figure 37 : Courbes comparatives de la variabilité de l'ETo en fonction du rayonnement net et de l'insolation

Ainsi en comparant les courbes tracées à partir de ces deux mesures (rayonnement net et insolation), toutes les autres variables restant égales, on constate que l'ETo présente la même valeur moyenne dans les deux cas. Mais, avec le rayonnement net, l'ETo présente une plus grande fluctuation avec des valeurs plus élevées en saison des pluies, on se retrouve ici dans une fourchette de 1 à 6mm pour l'ETo tandis qu'avec l'insolation la fourchette moyenne est de 2 à 5mm. De ce fait, nous pourrions préciser que par rapport à l'insolation, le rayonnement net accroît l'ETo.

5. 2. 2. Comparaison du rayonnement net calculé et mesuré : cas de Djougou (2006)

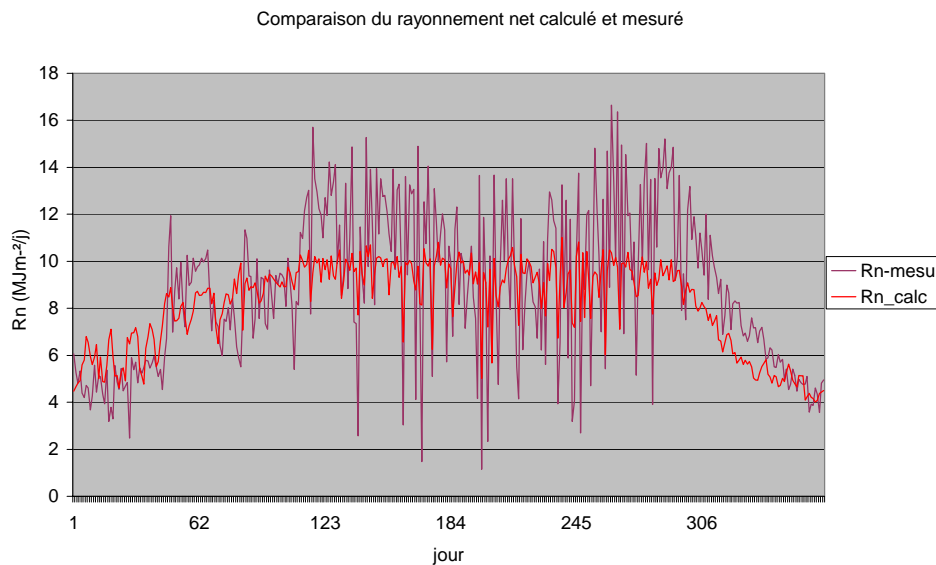


Figure 38 : Courbes comparatives des rayonnements nets calculé et mesuré

L'analyse de la présente courbe révèle une sous-estimation des valeurs du rayonnement net lorsque ce dernier est estimé à partir de la durée d'insolation par rapport aux mesures directes du rayonnement net. Ces différences de Rnet expliquent celles de ETo notées plus haut.

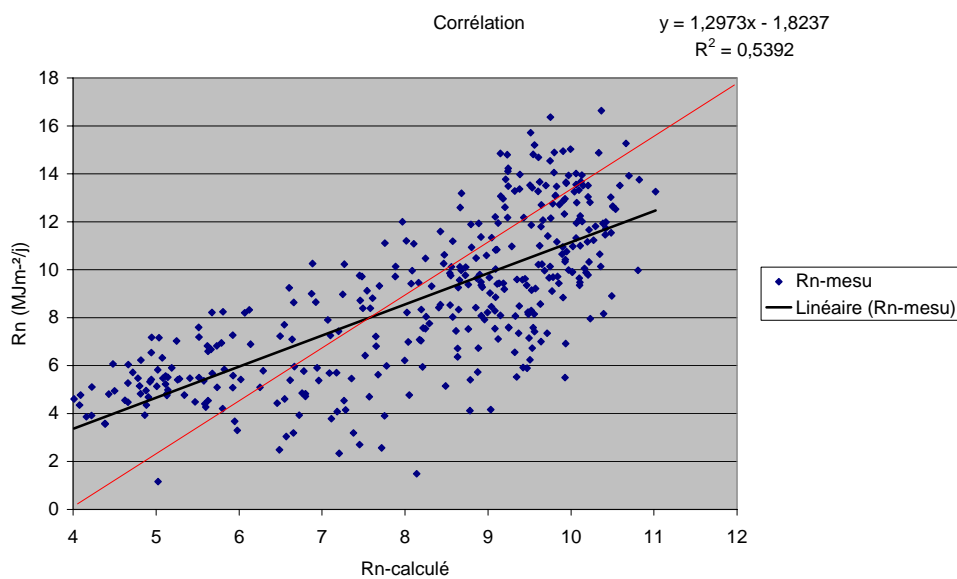


Figure 39 : Corrélation entre le rayonnement net calculé et le rayonnement net mesuré

Le rayonnement net calculé et mesuré ont une corrélation moyenne ($R^2=0,54$), d'où 52% de la variance du rayonnement net mesuré est expliquée par le rayonnement net calculé. Une modification des valeurs des paramètres a_s et b_s (équation 10) doit être étudiée avec un nombre de mesures plus élevées pour chercher à améliorer cette corrélation.

5. 3. Comparaison de l'ETo sur 3 sites

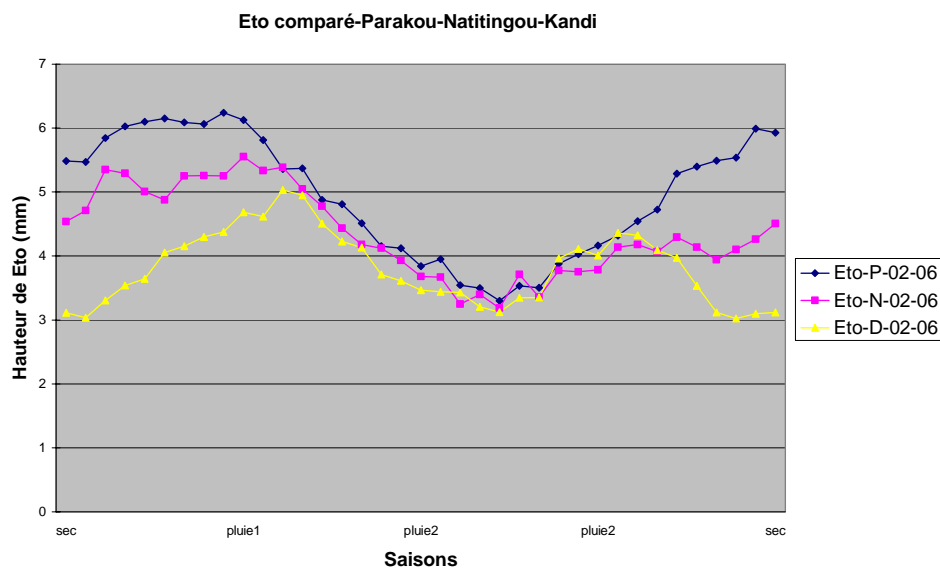


Figure 40 : Eto comparée : Parakou (bleu), Natitingou (rose) et Djougou (jaune)

L'évapotranspiration de référence à Parakou, Natitingou et Djougou présente pratiquement les mêmes caractéristiques pendant la saison pluvieuse, tandis qu'en saison sèche, les valeurs de l'ETo à Parakou font le double de celles de Djougou. Et à Natitingou, ces valeurs font une fois et demi celles de Djougou.

L'ETo atteint son maximum au début et à la fin de la saison pluvieuse à Djougou tandis qu'à Parakou et Natitingou, le pic est atteint en pleine saison sèche.

Au cours de la saison sèche, la différence de l'ETo entre Natitingou et Parakou peut s'expliquer par la précédente analyse sur la vitesse du vent. En effet le vent

moyen à Djougou est plus faible que celui de Natitingou et celui de Parakou est le plus fort.

Il est important de rappeler que l'ETR est pratiquement nulle en saison sèche car le sol est sec et ne peut donner d'eau ni directement à l'atmosphère ni aux plantes : c'est la teneur en eau du sol qui est limitante. Durant la saison des pluies en revanche c'est la demande atmosphérique et donc l'ETo qui est limitante pour l'ETR. On peut en conclure que l'ETR est assez proche sur les trois stations tout au long de l'année.

CONCLUSION GENERALE

Le haut bassin de l'Ouémé connaît une évolution de ses variables météorologiques sur l'ensemble des séries étudiées sur la période de 1965 à 2006.

La pluviométrie a connu une rupture remarquable à partir de 1970. A partir de cette même date on constate une augmentation de l'insolation durant la saison des pluies et plutôt une baisse en saison sèche. L'augmentation de l'insolation en saison des pluies est liée à la diminution du nombre de systèmes précipitants observée dans cette région. La diminution de l'insolation en saison sèche doit être liée à une augmentation des aérosols dans l'air.

Les autres variables météorologiques n'ont pas de rupture mais une évolution régulière : le vent a connu une constante augmentation à Parakou sur toutes les saisons, et une baisse à Natitingou en saison sèche. L'augmentation des températures maxi et mini de l'air a dépassé le degré en 42 ans. Les données d'humidité de l'air ont baissé, en l'occurrence l'humidité maxi de l'air.

Cette évolution des variables météorologiques provoque une certaine influence sur l'évapotranspiration de référence. A Parakou, l'ET_o reste très sensible à la variation du vent, de l'insolation et de la température maxi tandis qu'à Natitingou, l'insolation et le vent le sont davantage.

Ainsi donc, le vent, la température et l'insolation sont des variables qui jouent un rôle majeur sur le bassin de l'Ouémé supérieur.

Soulignons que la vitesse du vent demeure une donnée capitale pour la présente étude et de façon générale pour les études en hydrologie. Mais sa mesure cause encore de nombreux problèmes. De même que les bases de données dans nos pays en voie de développement.

Par ailleurs, ces mêmes variables peuvent ne pas présenter les mêmes effets sur tout le Bénin car l'ensemble du territoire ne présentent pas les mêmes caractéristiques physiques et climatiques, (les saisons ne sont pas les mêmes et les variables ne présentent pas les mêmes caractéristiques en tout lieu).

De façon générale, les tendances sont à la hausse ; et si aucun phénomène ne venait modifier de façon positive l'état des choses, le retour d'eau vers l'atmosphère va augmenter dans le futur si l'évolution des variables reste la même. Ainsi nous risquons d'assister à une baisse des ressources en eau sur le haut bassin de l'Ouémé. Face à cette situation, tout doit être mis en œuvre pour atteindre une gestion optimale de l'eau disponible sur le haut bassin de l'Ouémé.

Il est donc nécessaire de se pencher sur l'évolution climatique des prochaines décennies. Pour ce faire il sera nécessaire et important d'avoir recours à des modèles qui permettront de dire de façon probable quel sera le climat de demain.

Référence bibliographique

- 1- ALLEN, R. G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. (1998) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.
- 2- AMOUSSOU, E. (2005) Variabilité hydroclimatique et dynamique des états de surface dans le bassin versant du Couffo, Mémoire de DEA, Université d'Abomey Calavi 105 p.
- 3- ANDRE, N., CLAUSS, F., MINOT, D., PIATON, H., CAGNEAUX, E., (1989) Etude régionale de l'évapotranspiration potentielle. Série agroclimatologie, 81p
- 4- BOIS, Ph., OBLED, Ch. (2003) Introduction aux traitements des données. L'édition du millénaire. 262p.
- 5- BOKO M. (1988) Climat et communautés rurales du Bénin rythmes climatiques et rythmes de développement, thèse d'Etat ès-lettres 2volumes, Dijon 607 p
- 6- BOKONON-GANTA E. B. (1987) les climats de la région du Golf du Bénin, Afrique Occidentale. Thèse de doctorat du 3^e cycle. Paris IV, Sorbonne. 248p + Annexes.
- 7- BOUHLASSA, S., PARE, S. (2006) Evapotranspiration de référence dans la région aride de Tafilabet au sud-est du Maroc. Ajeam-Ragee Vol.11, 1-16.
- 8- DJIKOU, S. (2006) Calcul de l'ETP PENMAN-MONTEITH à différents pas de temps sur quatre sites du Haut Bassin de l'Ouémé. Rapport de stage, 34p.
- 9- DROOGERS, P., ALLEN, R.G. (2002) Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrig. And Drain Syst. **16**, 33-45.
- 10-FITZMAURICE, L., BESWICK, A. (2005) Sensitivity of the FAO56 crop reference evapotranspiration to different input data. Technical Report, 18.
- 11-GARCIA, M., RAES, D., ALLEN, R., HERBAS, C. (2004) Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). Agricultural and forest Meteorology. **125**, 67-82.
- 12-GONG, L., XU, C-Y., CHEN, D., HALLDIN, S., CHEN, Y. D. (2006) Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key

- climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *J. Hydrol.* **329**, 620-629.
- 13-GOYAL, R.K. (2004) Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agriculture Water Management.* **69**, 1-11.
- 14-HOUNDENOU C. HERNANDEZ K. (1998) Modification de la saison pluvieuse dans l'Atacora 1961- 1990. Un exemple de sécheresse, volume 9, N°1, PP 23 à 34.
- 15-HUBERT, P., BADER, J-C., BENDJOUDI, H. (2007) Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal. *J. Hydrol.* **52**, 68-73.
- 16-HUBERT P., CARBONNEL J-P., CHAUCHE A., 1989. Segmentation de séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J Hydrol.*, 110 : 349-367.
- 17-IMPETUS, 2005, Atlas digital du Bénin.
- 18-INSAE, 2006, Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2002, Rapport Général, Ministère du Plan et du Développement, Bénin.
- 19-IRD (2003) Deux régimes pluviométriques en Afrique de l'ouest- notre - planète. Info- 1.
- 20- Le BARBE, L. & LEBEL, T. (1997) Rainfall climatology of the Hapex-Sahel region during the years 1950–1990. *J. Hydrol.* **188/189**, 43–73.
- 21-LE BARBE, L., ALE, G., MILLET, B., TEXIER, H., BOREL, Y., GUALDE, R. (1993) Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Edition ORSTOM, 540p.
- 22- Le BARBE, L., LEBEL, T. & TAPSOBA, D. (2002) Rainfall variability in West Africa during the years 1950–90. *J. Climate* **15**(2), 187–202.
- 23-LE LAY, M. (2006) Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin. Mémoire de thèse 251p.
- 24-Le LAY, M., GALLE, S. (2005) Variabilité interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. *J. Hydrol.* **50**, 509-524.

- 25-LEBEL, T., DIEDHIOU, A. & LAURENT, H. (2003) Seasonal cycle and interannual variability of the sahelian rainfall at hydrological scales. *J. Geophys. Res.* **108**(D8), 8389 doi:10.1029.
- 26-Ministère de l'équipement, du logement, des transports et de l'espace (1996) Recueil de fiches instrumentales, service des équipements et des techniques instrumentales de la météorologie
- 27-MONTENY, B.A., HUMBERT, J., LHOMME J.P., KALMS, J.M. (1981) Le rayonnement net et l'estimation de l'évapotranspiration en Côte d'Ivoire. *Agric. Météorol.* **23**, 45-59.
- 28-MORON, V. (1994) Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère. CRC, université de Bourgogne, 219 p + annexes.
- 29-NICHOLSON, S. E. (1981) Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in west Africa. *Mon. Wea. Rev.*, 109: 2191 - 2208
- 30-SMITH, M. (2000) The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. *Agricultural and forest Meteorology.* **103**, 99-108.
- 31-Sultan, B., & Janicot, S. (2003). The West African monsoon dynamic. Part 2: The 'preonset' and 'onset' of the summer monsoon. *J. Climate* **16**, 3407–3427.
- 32-TONG, L., KANG, S., ZHANG, L. (2007) Temporal and spatial variations of evapotranspiration for spring wheat in the Shiyang river basin in northwest China. *Agricultural Water management* **87**, 241-250.
- 33-TOSSA, A. A. Y. (2005) Changements climatiques et dynamique hydrologique au Bénin. Mémoire DEA, Université d'Abomey Calavi 91 p.
- 34-VARADO, N. (2004) Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin-versant de la Donga, au Bénin. Mémoire de thèse, 320 p.

- 35-VISSIN, E. W. (2001) Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger, Mémoire de DEA, Université de Bourgogne 59 p.
- 36-XU, C-y., GONG, L., JIANG,T., CHEN,D., SINGH,V.P. (2006) Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *J. Hydrol.* **327**, 81-93.
- 37-YABI I. (2002) Particularités de la variabilité pluviométrique entre 7° et 8° de latitude nord au Bénin. Mémoire de maîtrise, DGAT/FLASH/UAC, 29 p.
- 38-ZANNOU A. B. (2006) Détermination des termes du bilan hydrologique sur le bassin de l'Ouémé supérieur (ORE AMMA-CATCH) : Approche annuelle et mensuelle avec calcul d'incertitudes associées. Université de Montpellier II, 112 P.

ANNEXE I

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
1	Stations météorologiques du haut bassin de l'Ouémé	18
2	gamme de variation des différentes variables sur la période d'étude	48

TABLE DES ILLUSTRATIONS

	Titres	Pages
Figure 1 :	Evolution de la pluviométrie journalière moyenne sur les stations de Parakou et Natitingou de 1960 à 2005	23
Figure 2 :	Evolution temporelle de l'insolation sur les stations de Parakou et Natitingou	24
Figure 3 :	Corrélation de l'insolation mesurée à Parakou et Natitingou (stations synoptiques de l'ASECNA)	25
Figure 4 :	Evolution saisonnière de la température mini entre Parakou et Natitingou	26
Figure 5 :	Corrélation des températures minimum et maximum relevées à Natitingou et Parakou.	27
Figure 6 :	Evolution saisonnière de l'humidité mini à Parakou et Natitingou	28
Figure 7 :	Evolution saisonnière de l'humidité maximum à Parakou et Natitingou	29
Figure 8 :	Corrélation de l'humidité minimum entre Parakou et Natitingou	30
Figure 9	Corrélation de l'humidité maximum entre Parakou et Natitingou	30
Figure 10 :	Evolution saisonnière de la tension de vapeur de 1965 à 2006	31
Figure 11 :	Corrélation de la tension de vapeur entre Parakou et Natitingou	32
Figure 12 :	Evolution saisonnière de la vitesse du vent	32

Figure 13 :	Corrélation de la vitesse du vent entre Natitingou et Parakou	33
Figure 14 :	Evolution saisonnière de l'ET ₀ à Parakou et Natitingou de 1965 à 2006	34
Figure 15 :	Corrélation de l'évapotranspiration de référence entre Parakou et Natitingou	34
Figure 16 :	Grappe des anomalies de pluie (a) Degrés carré à Niamey, (b) Ouémé supérieur	37
Figure 17 :	Cycle saisonnier de la Pluie à Parakou et Natitingou	38
Figure 18 :	Variabilité interannuelle de la température de l'air (1965-2006)	38
Figure 19 :	Evolution saisonnière de la température de l'air (1965-2006)	39
Figure 20 :	Evolution interannuelle de l'humidité de l'air entre 1965 et 2006	40
Figure 21 :	Evolution saisonnière de l'humidité de l'air (1965-2006)	40
Figure 22 :	Evolution interannuelle de l'insolation entre 1965 et 2006	41
Figure 23 :	Evolution saisonnière de l'insolation (1965-2006)	41
Figure 24 :	Evolution interannuelle du vent entre 1965 et 2006	42
Figure 25 :	Evolution saisonnière du vent entre 1965 et 2006	42
Figure 26 :	Evolution interannuelle de la tension de vapeur entre 1965 et 2006	43
Figure 27 :	Evolution saisonnière de la tension de vapeur entre 1965 et 2006	43
Figure 28 :	Evolution interannuelle de la pression atmosphérique entre 1968 et 1993	44
Figure 29 :	Evolution saisonnière de la pression atmosphérique entre 1968 et 1993	44
Figure 30 :	Evolution interannuelle de l'Eto de Parakou et Natitingou entre 1965-2006	45
Figure 31 :	Evolution saisonnière de l'Eto de Parakou et Natitingou entre 1965-2006	46

Figure 32 :	Analyse de la sensibilité de l'Eto en climat soudanien à une variation de 5% des variables météorologiques	47
Figure 33 :	Analyse de la sensibilité de l'Eto en climat soudanien aux variations effectives des variables météorologiques à Natitingou	49
Figure 34 :	Analyse de la sensibilité de l'Eto en climat soudanien aux variations effectives des variables météorologiques à Parakou	49
Figure 35 :	Variabilité de l'ETo avec chaque variable météorologique et variabilité observée à Natitingou pour la période de 1965 à 2006	50
Figure 36 :	Variabilité de l'ETo avec chaque variable météorologique et variabilité observée à Parakou pour la période de 1965 à 2006	51
Figure 37 :	Courbes comparatives de la variabilité de l'ETo en fonction du rayonnement net et de l'insolation	53
Figure 38 :	Courbes comparatives des rayonnements nets calculés et mesurés	54
Figure 39 :	Corrélation entre le rayonnement net calculé et le rayonnement net mesuré	54
Figure 40 :	ETo comparé : Parakou, Natitingou et Djougou	55

ANNEXE II

Equipements des stations étudiées

Tableau n°1 : STATION DE PARAKOU ET NATITINGOU

variables		Appareils marque et type	Gamme de mesure	Précision
Vent 5.5 m	Vitesse (v)	Télévent Chauvin- Arnoux	0 à 60 m.s-1	± 2%
	Direction (d)		0 à 360°	± 1,5°
Pression (P)		Précis mécanique A échelle compensée	790 hPa à 1070 hPa	± 0,25 hPa
Température (t)		ordinaire, Thermomètres mini, et maxi	-11° C à + 71° C -26° C à + 61° C -11° C à + 76° C	± 0,1°C ± 0,1°C ± 0,1°C
Humidité relative (Hr)		Hygrographe Jules RICHARD	20 à 100%	± 5%
Insolation		Héliographe type Campbell	6h à 18h	2 à 4/10 heures
Pluviométrie		Pluviomètre type Association	Seau de 11 litres	0,05 mm

Source : Recueil de fiches instrumentales/ service des équipements et des techniques instrumentales de la météorologie

Tableau n°2 : STATION DE DJOUGOU

variables		Appareils marque et type	Gamme de mesure	Précision
Vent 2.3 m	Vitesse (v)	R.M. Young (05103) Wind monitor	1 à 60 m.s-1 60 à 100m.s-1	± 0,3 m.s-1 ± 1m.s-1
	Direction (d)		0 à 360° mécaniques,	± 3°
Pression (P)		Druck RPT410F Barometric	600 à 1100 hPa (-10°C à 50°C)	± 0,5 hPa
Temperature (t)		Vaisala HMP45C Temperature and RH Probe	-39,2°C à 60°C	± 0,2°C à 20°C ± 0,3°C à 40°C
Humidité relative (Hr)			0,8 à 100%	± 2% 0 à 90% ± 3% 90 à 100%
Rayonnement net (Rn)		Kipp & Zonen NR- Lite Net radiometer	-200 à 1500 W.m-2 0,2 à 100µm	± 0.7 W m ⁻²
Radiation incidente (Rad)		Kipp & Zonen SP – Lite silicon pyranometer	0 à 1500 W.m-2 0,4 à 1,1µm.	3% soit par ex : 1000 ± 30 W m ⁻²
Pluviomètre (CATCH network)		Précis Mécanique 30305 tipping bucket raingauge 400cm ² , 1.2 m high	Rainfall height Rainfall intensity 0-250 mm h-1 250-500 mm h-1	0.5 mm 1% 3%

Tableau 3 : STATION DE BELEFOUNGOU

variables		Appareils marque et type	Gamme de mesure	Précision
Vent 5.5 m	Vitesse (v)	Vaisala WXT510 Ultrasonic wind sensor	0 à 35 m.s-1 36 à 60 m.s-1	Max ($\pm 3\%$; 0.3ms-1) $\pm 5\%$
	Direction (d)		0 à 360°	$\pm 2^\circ$
Pression (P)		Vaisala WXT510	600 hPa à 1100 hPa (-52°C à 60°C)	$\pm 0,5$ hPa ;0°C à 30°C ± 1 hPa ;-52°C à 60°C
Temperature (t)		Vaisala WXT510	-52°C à 60°C	$\pm 0,3^\circ\text{C}$ à 20°c $\pm 0,4^\circ\text{C}$ à 40°c
Humidité relative (Hr)			0 à 100%	$\pm 3\%$; 0 à 90% $\pm 5\%$; 90 à 100%
Rayonnement net (Rn)		Kipp & Zonen NR- Lite Net radiometer	-200 à 1500 W.m- 2 0,2 à 100µm	± 0.7 W m ⁻²
Radiation incidente (Rad)		Skye Instruments SP1110 pyranometer Sensor	0.35µm à 1.10µm -30°C à 70°C	$\pm 5\%$, typically < $\pm 3\%$ soit par ex 1000 ± 30 W m ⁻²
Pluviométrie 1		Vaisala WXT510 Rain drop impactor 60 cm ² area, 5.5 m high	Rainfall height Rainfall duration Rainfall intensity 0-200 mm h-1 Hail	5% 10 s (resolution) 0.1 mm h- 1(resolution) 0.1 hit cm-2
Pluviométrie 2		RIMCO 7499 tipping bucket raingauge 324 cm ² , 5.5 m high	Rainfall height Rainfall intensity 0-250 mm h-1 250-500 mm h-1	0.5 mm 1% 3%

Vaisala WXT510 : Multiparameter weather transmitter

Tableau n° 4 : STATION DE BIRA ET NALOHOU

variables		Appareils marque et type	Gamme de mesure	Précision
Vent 2 m	Vitesse (v)	Vaisala WXT510 Ultrasonic wind sensor	0 à 35 m.s-1 36 à 60 m.s-1	Max ($\pm 3\%$; 0.3ms-1) $\pm 5\%$
	Direction (d)		0 à 360°	$\pm 2^\circ$
Pression (P)		Vaisala WXT510	600 hPa à 1100 hPa (-52°C à 60°C)	$\pm 0,5$ hPa ;0°C à 30°C ± 1 hPa ;-52°C à 60°C
Temperature (t)		Vaisala WXT510	-52°C à 60°C	$\pm 0,3^\circ\text{C}$ à 20°C $\pm 0,4^\circ\text{C}$ à 40°C
Humidité relative (Hr)			0 à 100%	$\pm 3\%$; 0 à 90% $\pm 5\%$; 90 à 100%
Solar radiation (SWin, SWout)		Kipp & Zonen CNR1 2 CM3 pyranometers	0 – 1500 W m ⁻² 0.305 à 2.800 μm	Equal sensitivity for the four sensors ± 0.6 W m ⁻² (expected accuracy for daily sums: $\pm 10\%$) ± 2 K
Far Infra Red radiation (LWin, LWout)			Kipp & Zonen CNR1 2 CG3 pyrgeometers PT-100 pyrg. temperature	
Pluviométrie 1		Vaisala WXT510 Rain drop impactor 60 cm ² area, 2 m high	Rainfall height Rainfall duration Rainfall intensity 0-200 mm h-1 Hail	5% 10 s (resolution) 0.1 mm h-1 (resolution) 0.1 hit cm-2
Pluviométrie 2		RIMCO 7499 Tipping bucket raingauge 324 cm ² , 30 cm high	Rainfall height Rainfall intensity 0-250 mm h-1 250-500 mm h-1	0.5 mm 1% 3%

Vaisala WXT510 : Multiparameter weather transmitter

TABLE DES MATIERES	PAGES
SOMMAIRE	iii
AVANT-PROPOS	v
RESUME	vi
ACRONYMES ET SIGLES	vii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
 <i>CHAPITRE I- PROBLEMATIQUE ET JUSTIFICATION DU SUJET, OBJECTIF, HYPOTHESE ET REVUE DE LA LITTERATURE.....</i>	 3
1.1. Problématique et justification du sujet.....	3
1.2. Objectifs.....	4
<i>Objectif général.....</i>	4
<i>Objectifs spécifiques.....</i>	4
1. 3. Hypothèses	5
1. 4. Définition des concepts.....	5
1. 5. Revue et analyse critique de la littérature.....	7
 <i>CHAPITRE II- PRESENTATION DU CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE ET APPROCHE METHODOLOGIQUE.....</i>	 14
2. 1. Cadre géographique de l'étude.....	14
2. 2. Approche méthodologique.....	16
2. 2. 1. Données et stations météorologiques retenues.....	16
2. 2. 1. 1. Nature et sources des données.....	17
2. 2. 1. 2. Stations météorologiques retenues et reconstitution des données manquantes.....	17
2. 2. 2. Matériels de mesure et outils de collecte des données.....	18
2. 2. 3. Traitement des données.....	19
 <i>CHAPITRE III- CARACTERISATION CLIMATOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....</i>	 22
3. 1. Variables météorologiques.....	22
3. 1. 1. Cycle saisonnier de la Pluie.....	22
3. 1. 2. Insolation.....	24

3. 1. 3. Température.....	26
3. 1. 4. Humidité relative de l'air.....	28
3. 1. 5. Tension de vapeur.....	31
3. 1. 6. Vitesse du vent.....	32
3. 2. Evapotranspiration de référence	34
CHAPITRE IV- ANALYSE DE L'EVOLUTION ANNUELLE,	
INTERANNUELLE, ET SAISONNIERE DE L'ET₀	36
4. 1. La pluie.....	36
4. 2. La température de l'air.....	38
4. 3. l'Humidité relative de l'air.....	40
4. 4. Insolation.....	41
4. 5. Vitesse du vent.....	42
4. 6. Tension de vapeur.....	43
4. 7. Pression atmosphérique.....	44
4. 8. Evolution interannuelle et saisonnière de l'ET ₀	45
4. 8. 1. Evolution interannuelle de l' ET ₀	45
4. 8. 2. Evolution saisonnière de l'ET ₀	46
CHAPITRE V : SENSIBILITE DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE	
REFERENCE (ET₀) AUX PARAMETRES METEOROLOGIQUES.....	47
5. 1. Analyse de la sensibilité.....	47
5. 1. 1. Cas de Natitingou	50
5. 1. 2. Cas de Parakou.....	51
5. 2. Analyse et comparaison de l'Eto entre Parakou, Natitingou et Djougou	52
5. 2. 1. Comparaison des données de ETo calculé avec l'insolation et ETo calculé avec le rayonnement net : cas de Djougou (année 2006)	53
5. 2. 2. Comparaison du rayonnement net calculé et du rayonnement net mesuré : cas de Djougou (2006)	54
5. 3. Comparaison de l'ET ₀ sur trois sites	55
CONCLUSION GENERALE.....	57
Référence bibliographique.....	59
Annexes.....	63

