
SOMMAIRE

REMERCIEMENTS -----	I
SOMMAIRE -----	II
LISTE DES ABREVIATIONS -----	III
LISTE DES FIGURES-----	V
LISTE DES TABLEAUX-----	VI
LISTE DES ANNEXES-----	VII
GLOSSAIRE-----	VIII
INTRODUCTION GENERALE-----	1
PARTIE 1 CONTEXTE DE L'ETUDE	
Chapitre I Généralité sur la pomme de terre -----	2
Chapitre II Généralité sur les zones d'étude -----	12
PARTIE 2 METHODOLOGIE ET APPLICATION	
Chapitre III Méthodologie -----	21
Chapitre IV Traitement de donnée et logiciel utilisée -----	30
PARTIE 3 RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
Chapitre V Résultat obtenue -----	42
Chapitre VI Impacte de la distribution des épisodes pluvieux sur la production de la pomme de terre -----	60
CONCLUSION GENERALE-----	73
BIBLIOGRAPHIQUE -----	I
ANNEXES-----	IV

LISTE DES ABREVIATIONS

BE	: Besoin en eau
BI	: Besoin en Irrigation
CWR	: Crop Water Requirement
D	: Drainage
DGM	: Direction Générale de la Météorologie
DRAE	: Direction Régionale d’Agriculture et d’Elevage
EPn	: Episode pluvieux à n jours
ETc	: Evapotranspiration maximale
ETO	: Evapotranspiration de référence
ETR	: Evapotranspiration reel
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations
FKT	: Fokotany
Kc	: Coefficient cultural
KcEND	: Coefficient cultural final
KcIN	: Coefficient cultural initial
KcMID	: Coefficient cultural au cours du mi- saison
Ks	: Coefficient de stress hydrique
P	: Fraction d’épuisement maximum
Peff	: Précipitation efficace
PF	: Point de Flétrissement
Ptot	: Précipitation totale
RAM	: Réserve utile facilement disponible
RAW	: Reserve Available Water

RFU	: Réserve utile facilement disponible
RHmax	: Humidité relative maximale
Ri	: Réserve en eau du sol au jour i
Ri-1	: Réserve en eau du sol au jour i-1
RN	: Route Nationale
Rn	: Rayonnement net
RO	: Ruissellement
RU	: Réserve utile
SMD	: Déficit de la réserve utile d'eau dans le sol
T	: Température
TAM	: Eau disponible totale
TAW	: Total Available Water
Tmax	: Température maximale
Tmin	: Température minimale
USDA	: United States Department of Agriculture
u₂	: Vitesse du vent à 2m d'altitude
Z	: Profondeur des racines
θ_{FC}	: Eau contenue au maximum dans le champ
θ_{WP}	: Eau contenue au point de flétrissement

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation de la région Vakinakaratra	13
Figure 2: Diagrammes ombrothermiques.....	16
Figure 3: Schéma de calcul des besoins en eau des cultures ou de l'évapotranspiration maximale, ETc selon la méthode de la FAO- 56 (Allen et al. 1998)	25
Figure 4: Schéma de calcul d'évapotranspiration de référence selon la méthode de la FAO- 56 (Allen et al. 1998).....	26
Figure 5: Courbe représentative du coefficient cultural simple (Allen et al. 1998).....	29
Figure 6: Fonctionnement de Langage R	32
Figure 7: Schéma de fonctionnement du logiciel et formules utilisées	39
Figure 8: Evolution de la pluviométrie durant la saison de pluie 1961- 2010	42
Figure 9: Nombre de jours pluvieux dans la région Vakinakaratra de 1961 à 2010.....	43
Figure 10: Durée de la saison des pluies de 1961 à 2010 de la région Vakinakaratra	45
Figure 11: Distribution des épisodes pluvieux de longueur n jours (EPn) d'Antsirabe.....	46
Figure 12: Diagramme des épisodes pluvieux mois 5 jours	47
Figure 13: Diagramme des épisodes pluvieux 6 à 9jours	48
Figure 14: Diagramme des épisodes pluvieux 10 à 16 jours	49
Figure 15: Diagramme des épisodes pluvieux supérieur à 16jours.....	50
Figure 16: Rapport de quantité de pluie et la fréquence entre chaque catégorie des épisodes pluvieux	51
Figure 17: Histogramme d'évapotranspiration de référence mensuel calculé à partir du modèle CROPWAT dans la région Vakinakaratra	52
Figure 18: Histogramme d'ETo calculée par ce modèle et ETo observée dans la région Vakinakaratra	53
Figure 19: Rayonnement global pendant le cycle cultural	54
Figure 20: Données efficaces fournies par le logiciel CROPWAT 8.0 dans le district Antsirabe-I de la région du Vakinakaratra	55
Figure 21: pluie efficace de la région Vakinakaratra, station Antsirabe.....	56
Figure 22: Besoin moyen en eau des cultures	57
Figure 23: besoin en de la pomme de terre Vakinakaratra.....	58
Figure 24: Diagramme de besoin d'irrigation de district de Vakinakaratra	59
Figure 25: Le bilan hydrique de Vakinakaratra	60

Figure 26 : Le rapport entre la précipitation moyenne dans la région Vakinakaratra et le besoin en eau de la pomme de terre	61
Figure 27: Variation de la production de la pomme de terre dans la région Vakinakaratra ...	63
Figure 28: Distribution des épisodes pluvieux de longueur n jours (EPn) d'Antsirabe durant la période culturelle 2009/2010.....	64
Figure 29: Rapport de la précipitation et le besoin en eau et le nombre de jours de pluie après le semis durant la période culturelle 2009/2010.....	65
Figure 30: Distribution des épisodes pluvieux de longueur n jours (EPn) d'Antsirabe durant la période culturelle 2014/2015.....	66
Figure 31: Rapport de la précipitation et le besoin en eau et le nombre de jours de pluie après le semis durant la période culturelle 2014/2015	67
Figure 32: Calendrier d'irrigation des cultures à partir du modèle CROPWAT	70
Figure 33: Bilan hydrique journalier du blé à partir du modèle CROPWAT	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Calendrier cultural de la pomme de terre Vakinakaratra -----	9
Tableau 2: répartition de la superficie par district -----	12
Tableau 3: Stations d'observation météorologiques de la région Vakinakaratra -----	14
Tableau 4: Données de la pluviométrie de la région Vakinakaratra (1961-2010) -----	44

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1: Autre méthode pour estimer l'évapotranspiration -----	IV
ANNEXE 2: Le code source du programme calculant les nombres des epn et ses quantités respectives sur R -----	VI
ANNEXE 3:Exemple de résultat obtenu sur le logiciel R -----	VIII
ANNEXE 4: Interface des outils utilisés -----	IX

GLOSSAIRE

- ❖ **Dormance** : Elle est un état de vie latente profonde des semences et des bourgeons pour laquelle le retour à la vie active est impossible même si les conditions extérieures sont favorables à cette vie active.
- ❖ **Pénéplaine** : Surface topographique relativement plane, parcourue de cours d'eau à faible pente.
- ❖ **Percolation** : Elle désigne l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol en direction de la nappe phréatique, sous la seule influence de la gravité. Ce processus suit l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines.
- ❖ **Soudure** : « la période de soudure » ou à Madagascar le « Kere », est la période précédant les premières récoltes et où le grain de la récolte précédente peut venir à manquer. Il y a alors souvent pénurie et flambée brutale des prix parfois accentuée par la spéculation.
- ❖ **Ruisseaulement** : Il est la partie de la pluie qui ayant échappé à l'évaporation et à l'infiltration ruisselle en surface par gravité suivant la pente du bassin versant et le réseau pour arriver à l'exutoire.

INTRODUCTION GENERALE

À Madagascar, la culture de pommes de terre date des années 1900. Initialement reconnue comme spécifique aux Hautes Terres, notamment autour de la chaîne de l'Ankaratra, la culture de pomme de terre est actuellement pratiquée dans tout Madagascar, grâce à l'évolution des technologies et aux échanges commerciaux interrégionaux.

La pomme de terre occupe une place stratégique dans la politique de sécurité alimentaire. Elle tient la quatrième place derrière le riz, le manioc et la patate douce. Elle contribue au niveau urbain à la diversification alimentaire et au niveau rural, elle est un complément du riz. Pour les producteurs, la pomme de terre est devenue de plus en plus une culture de rente.

L'eau constitue une ressource indispensable pour la culture, sans laquelle aucune production n'est possible. L'eau apportée par la pluie est la principale source de l'eau pour l'agriculture. L'insuffisance ou l'abondance de cette pluie sont l'une des causes de mauvaise production. C'est la raison pour laquelle nous faisons ce présent mémoire qui consiste à faire l'étude des épisodes pluvieux dans la région du Vakinakaratra et son application à la culture de la pomme de terre.

Les principaux objectifs de cet essai sont le calcul des épisodes pluvieux pendant la période culturale que l'on choisit et l'évaluation de leur impact sur les cultures des pommes de terre dans la région Vakinakaratra à travers l'analyse du besoin en eau de cette culture. Cela permettra d'identifier les épisodes pluvieux les plus fréquents et celles qui sont les plus préjudiciables pour ces cultures en relation avec les phases phénologiques durant lesquelles elles interviennent.

Cet ouvrage comporte trois grandes parties, dans laquelle : La première partie traite les généralités sur la pomme de terre et la zone d'études, en suite la deuxième partie qui représente la méthodologie et matériel utilisé en décrivant tous les étapes nécessaires, et enfin la dernière partie qui est réservée à l'interprétation de résultat obtenu.

PARTIE 1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Chapitre I Généralité sur la pomme de terre

I. 1 Origine de la pomme de terre

La pomme de terre est une plante annuelle d'origine sud-américaine. Elle a été découverte au Pérou pour la première fois en 1533 par l'espagnol. Elle fut ramenée en Europe par les navigateurs espagnols en 1534, où elle est cultivée par les moines de Séville en 1573, sous le nom de Papa.

Depuis lors, la pomme de terre va conquérir l'Europe, d'abord l'Espagne où elle prendra le nom de patata, puis l'Italie où elle est désignée taratoufli, l'Irlande (potato). C'est en 1716 que l'ingénieur français Antoine Augustin Parmentier employa le terme « Pomme de terre » pour ainsi désigner les tubercules.

En Afrique, la pomme de terre a été introduite à la fin du 19e siècle par le colonisateur européen. Aujourd'hui, on la rencontre très fréquemment en zones arides où elle alimente le marché des produits agricoles. À Madagascar. Elle est cultivée presque dans toutes les régions.

I. 2 Description botanique

La pomme de terre est cultivée comme une herbacée annuelle. La tige, pouvant atteindre 1m de longueur. Les tiges sont de deux sortes : tiges aériennes, elles portent des feuilles, des fleurs et des fruits. Tiges souterraines ou rhizomes dont l'extrémité se renfle pour former des tubercules. et porte des feuilles vertes, grandes, très découpées et disposées en spirale sur les tiges et de fleure dont la couleur varie du blanc au violet. Les fruits sont des baies sphériques vertes qui jaunissent ou noircissent à maturité.

I. 3 Variétés de la culture

Il est possible de réduire les risques de maladie de cette culture par le choix variétal. Il n'existe pas de variété tolérante contre toutes les maladies et il faut se référer aux conditions locales pour le choix variétal.

Pour la culture biologique, on devrait se restreindre aux variétés ayant une faible sensibilité aux maladies. Il faut choisir des variétés peu sensibles au mildiou, avec un faible besoin en azote et un développement rapide du feuillage.

Par contre, l'élément déterminant du choix de la variété reste la mise en valeur de la récolte et la commercialisation. Donc, les variétés plus pratiquées dans la région du Vakinakaratra sont les suivants : Pôta, Kinga, Atzimba, Lava, Meva, Mailaka, Miova, Spunta.

I. 4 Importance de la culture

L'agriculture représente le secteur clef de l'économie dans la région Vakinakaratra. En effet, plus de 80% de la population active travaille dans l'agriculture. La superficie agricole utile s'étend sur environ trois cent quarante-quatre mille onze d'hectares et le 97% s'occupe pour les cultures vivrières dont plus de 16% sont généralement réservés à la pomme de terre.

La pomme de terre a quatre grands types d'utilisations : premièrement l'alimentation humaine sous forme de frites, purées, compotes, salades, etc. ensuite, l'alimentation animale comme les tubercules de trop petite taille, l'extraction industrielle de la féculle et d'autres sous-produits, et enfin, la production de plants.

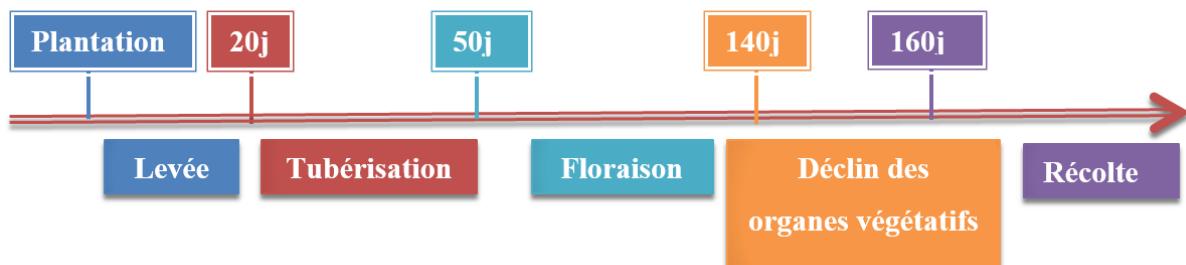
I. 5 Reproduction

La pomme de terre peut être reproduite par graine (reproduction sexuée) ou par multiplication végétative. La reproduction par graine est très peu pratiquée dans le milieu agricole [4].

Les tubercules de pomme de terre qui lui confèrent sa valeur alimentaire et économique sont le plus couramment utilisés comme semence.

Le cycle de développement de la pomme de terre est très court, qui a duré environ trois à quatre mois. Il peut être divisé en plusieurs phases conditionnées par des facteurs génétiques et environnementaux.

La Figure 1 illustre plusieurs étapes importantes dans le cycle de développement de la pomme de terre.



I. 6 Phase végétative

Ces phases sont énumérées de façon détaillée ci-dessous :

I.6.1 Phase de germination :

Entre la récolte et la formation des germes, il s'écoule une durée variable avec les variétés. Il s'agit d'une "dormance". On compte 2 à 4 mois en moyenne.

Cette phase dépend étroitement de la température optimum : 20 à 25°C, et de la lumière qui doit exister afin d'obtenir des germes courts et trapus.

I.6.2 Phase de levée :

Les germes se transforment en tiges aériennes. En même temps apparaissent les racines. Les tiges aériennes s'allongent et portent les feuilles. Cette levée se fait 2 à 3 semaines après la mise en terre des semences.

I.6.3 Phase de tubérisation :

C'est l'apparition des tiges souterraines et formation des tubercules qui commencent à grossir. Cette phase débute 50 jours environ après l'entrée en germination du tubercule mère.

I.6.4 Phase de floraison et de fructification :

Dès que les tiges aériennes ont atteint leur hauteur définitive, les fleurs apparaissent et se transforment en fruits.

I.6.5 Phase de déclin des organes végétatifs :

La floraison terminée, tige et feuille commencent à jaunir et à se dessécher. Leurs substances de réserve migrent dans les tubercules qui terminent leur phase de grossissement.

I.6.6 Phase de repos végétatif :

Les tubercules ne grossissent plus et leur teneur en féculle est maximum. La phase de repos végétatif commence alors et durera jusqu'à la prochaine germination.

La durée complète du cycle végétatif varie de 90 à 150 jours en moyenne.

I. 7 Exigences écologiques

I.7.1 Besoins en sols

Les pommes de terre exigent du sol léger, bien meuble, avec un PH compris entre 6 à 6,5 et riche en matière organique bien décomposée.

Les sols lourds réduisent le taux de germination, la grosseur des tubercules et rendent les récoltes très difficiles, éviter les sols humides, mal drainés qui sont à l'origine de nombreuses maladies.

I.7.2 Besoin en chaleur

Les températures de 5 à 30°C favorisent la croissance et le développement des pommes de terre.

La température de tubérisation varie entre 10 et 27°C, et les sols à température élevée provoquent la pourriture des semences et réduisent le taux de germination. La température optimum pour le cycle végétatif est de 15 à 25°C.

I.7.3 Besoin en eau

La pomme de terre demande de l'eau à toutes les époques de sa végétation, surtout durant la phase de tubérisation. Il lui faut des pluies régulières, bien réparties, sans période de sécheresse.

Le régime des pluies influence beaucoup sur le rendement et la qualité. Ses besoins en eau sont de l'ordre de 500 à 600 mm.

I.7.4 Besoin en altitude

À Madagascar, elle ne pousse bien qu'entre 800 et 1500 m d'altitude.

I.8 Maladies et Ravageurs

- **Mildiou :**

Les jeunes pousses se recouvrent d'un duvet blanc jusqu'à disparition des tubercules mère. Sur les bouquets terminaux, les feuilles apicales brunissent puis dessèchent.

L'intérieur des tubercules présente des taches brunes à la récolte ou quelques semaines après.

- **Taupins ou ver fil de fer :**

Coléoptère brun noir d'environ 2 cm. La larve de couleur jaune paille de 0,5 à 2 cm de long perce et traverse les plantes qui se flétrissent.

Doryphore : Adulte de 10 à 11 mm ovale et bombé la larve de 1, à 8 mm jaune orangé, 2 rangs de points noirs, tête et patte noires. C'est elle qui dévore les feuilles et qui peut causer la perte d'une récolte.

I.9 Ennemis

- **Nématodes :** ils attaquent les tubercules et provoquent des galles, facilement reconnaissables. En faisant une coupe à l'intérieur de ces galles, on peut trouver des femelles remplies d'œufs.

- **Coccinelles :** Les larves rongent les feuilles.

- **Vers gris :** ils coupent les jeunes plants au collet.

- **Cochenilles :** ils piquent la base des tiges aériennes ou envahissent les bourgeons puis les tubercules dans les germoirs.

-
- **Teigne** : il creuse des galeries dans les tubercules emmagasines.
 - **Pucerons** : ils piquent les feuilles et provoquent des formations du limbe.

I. 10 Maladies et ennemis qui existent dans la région Vakinakaratra

Le Mildiou est la seule maladie qui provoque des dégâts sur la culture de la pomme de terre dans la région Vakinakaratra selon les enquêtes que nous avons menées au niveau de chaque district.

Condition climatique favorable au Mildiou :

La sporulation du champignon au départ des premiers foyers d'infestation permet d'initier l'épidémie. Cela se fait généralement en période chaud ou la température varie entre 15 à 24°C avec une humidité relative supérieure à 90% pendant plus de 8 heures. Souvent, par suite d'un assèchement passager de l'atmosphère, les spores des champignons sont dispersées et le vent aide leurs déplacements jusqu'à plusieurs centaines de mètres [10].

Si la spore est déposée sur une feuille mouillée, elle peut infecter un nouveau plant. Une pluie, une rosée ou un brouillard épais suivant une période favorable à la sporulation constituent les conditions idéales pour un début de l'épidémie.

La quantité de spores présentées et la température pendant le période favorable à la germination déterminent l'ampleur de la nouvelle infection. Plus la température est proche de 22°C, plus les chances d'infection sont grandes.

I. 11 Technique culturale

Elle se pratique sous toutes les latitudes, à des altitudes variées. C'est une culture très diversifiée d'une part selon les conditions socio-économiques : ce peut-être une activité non commerciale, culture vivrière dans les pays du Tiers-Monde, ou production pour l'autoconsommation dans les jardins particuliers, dont la production est souvent sous-estimée, ou bien une production destinée à la vente soit en plein champ, où elle peut constituer une véritable culture industrielle dans les pays développés, mais aussi maraîchage sur des exploitations de taille plus réduite, notamment pour les primeurs.

D'autre part, selon les conditions écoclimatiques, ce peut être une culture d'été, dans les pays tempérés et dans les régions d'altitude élevée des pays chauds, une culture d'hiver dans les plaines tropicales, ou bien une culture praticable en toute saison dans les régions intermédiaires, région méditerranéenne par exemple.

I. 12 Périodes plantations

La pomme de terre est actuellement cultivée sur trois saisons, dont deux saisons en culture pluviale et une en contre-saison sur rizière.

Il existe 3 types de cycle :

- Cycle dit de saison : août à janvier.
- Cycle intermédiaire : janvier à juillet.
- Cycle de contre-saison : juin à novembre.

Dans la région du Vakinakaratra, les grandes zones productrices de pommes de terre sont les suivantes :

- ✓ La zone de montagne (Faratsihо), avec une altitude supérieure à 1 400 m, est parmi les plus anciennes zones de production de la pomme de terre. La pomme de terre y est plantée en culture pluviale, permettant la succession de deux cycles de culture : Cycle de saison et intermédiaire.
- ✓ La zone de plaine (Antsirabe, Antanifotsy et Betafo).
- ✓ En plaine rizicole, la pomme de terre est plantée en culture de rente en contre-saison au riz. Plus la moitié des rizières ne peut être consacrée à la pomme de terre, parfois en complément à une autre culture de rente (tomate, petits pois).

I. 13 Calendrier cultural

D'après l'enquête que nous avons faite sur le lieu d'étude, on a une moyenne de calendrier cultural représentée sur le tableau 1 ci-dessous :

Spéculation s	Itinéraire technique	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN				
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pomme de terre 1 ere saison	Préparation du sol				—	—											
	Repiquage/Pla ntation					—	—	—									
	Entretien						—	—									
	Fécondation artificielle							—	—								
	Récolte							—	—								
Pomme de terre inter saison	Préparation du sol								—								
	Plantation								—	—							
	Entretien								—	—							
	Récolte									—	—						
Pomme de terre contre saison	Préparation du sol	—															
	Plantation	—	—	—													
	Entretien			—	—	—											
	Récolte						—	—									

Tableau 1: Calendrier cultural de la pomme de terre Vakinakaratra

Source : DRAE Antsirabe

I. 14 Préparation du sol

Le travail du sol se fait en automne dans les sols lourds et moyens à lourds, et au printemps dans les sols limoneux à sablonneux. Pour les sols légers, le travail peut être effectué en automne ou au printemps, avec une préférence pour ce dernier.

Pour la préparation du lit de plantation, le sol doit être ameubli sur 10-15 cm de profondeur en vue de l'obtention d'une structure fine.

La séparation du sol, permet de cultiver des pommes des terres dans des sols à structure grossière ou des sols pierreux. La technique est toutefois très agressive pour le sol.

Les méthodes de travail simplifié du sol ne sont pas encore applicables à la culture biologique, car le risque d'invasion par les mauvaises herbes est encore trop important :

I. 15 Récoltes

Les tubercules se récoltent à complète maturité, lorsque le feuillage commence à se faner, pour les pommes de terre « de conservation », mais avant maturité pour les pommes de terre de « primeur », qui de ce fait ne se conservent pas.

Après élimination des tubercules blessés, la récolte est conservée dans un local aéré, sec et à l'abri de la lumière.

La première opération est le défanage, c'est-à-dire la destruction des feuilles et tiges, qui se font lorsque les tubercules ont atteint la grosseur voulue, en principe deux à trois semaines avant la récolte. Il peut se faire par diverses méthodes, mécaniques ou chimiques.

Cette opération, indispensable en vue de la récolte mécanisée, présente aussi l'intérêt de limiter la contamination des tubercules par le mildiou ou certaines maladies virales transmises par les pucerons.

I. 16 Prix moyen de vent de la pomme de terre

Actuellement, le prix de vent de la pomme de terre se situe en 350 et 1 200Ar/kg dans le bassin de production Vakinakaratra et peut atteindre 1 600Ar/kg pour le consommateur dans les zones urbaines de grand consommateur.

Il est important de noter que les prix des ventes varient selon la qualité de production et les périodes de récolte. Trois qualités majeures sont recensées : les grosses, les moyennes et les petites pommes de terre.

Les débouchés sont généralement :

- Antananarivo (grands marchés de la ville, grandes surfaces)
- Tamatave
- Région du sud de Madagascar

-
- Les marchés de ville d'Antsirabe ou les consommateurs et collecteurs achètent directement le produit.
 - Les marchés locaux hebdomadaires de chaque commune.

Actuellement, le rendement de la production de pommes de terre est estimé de 10-15 t/ha en culture traditionnelle et de 20-30 t/ha en culture améliorée. Elle est assurée principalement par des petits producteurs cultivant entre 10 ares et 2 ha.

Chapitre II Généralité sur les zones d'étude

II. 1 Contexte géographique et découpage administratif

La Région de Vakinankaratra est constituée de sept districts, à savoir : Antsirabe-I, Antsirabe-II, Betafo, Antanifotsy, Faratsihо, Ambatolampy et Mandoto.

Région	Districts	Superficie Km ²	Nombre de Communes	Nombre de FKT
Vakinakaratra	✓ Antsirabe I ✓ Antsirabe II ✓ Antanifotsy ✓ Betafo ✓ Faratsihо ✓ Ambatolampy ✓ Mandoto	180 2769 3425 9107 2015 1709 4500	01 20 12 18 09 18 8	60 204 248 205 97 162 75
Totale	7 Districts	19098	86	998

Tableau 2:répartition de la superficie par district

Source : MEI/CREAM/Monographie 2009

La région de Vakinankaratra est bordée à l'Ouest par la région Menabe, au Nord par les régions d'Analamanga, d'Itasy et de Bongolava, à l'Est par la Région Alaotra-Mangoro et d'Antsinanana et au Sud par la région Amoron'i Mania.

Il est délimité entre 18°59' et 20°03' de latitude Sud et 46°17' et 47°19' de longitude Est et située dans la partie centrale de hautes terres de Madagascar.

La Région de Vakinankaratra s'étend sur une superficie de 19.098 Km². Il est constitué de sept districts. Le chef-lieu de la région est Antsirabe I, situant à 1500 m d'altitude dans une cuvette entourée de volcans. Il se trouve à 167 km au Sud de la capitale de Madagascar, en empruntant la RN7.



Figure 1: Carte de localisation de la région Vakinakaratra

Source : Initiation de la région du Vakinakaratra

II. 2 Climat du Vakinakaratra

L'année comporte trois saisons bien individualisées : La saison pluvieuse et moyennement chaude entre Novembre à Mars. La saison fraîche et relativement sèche de Mai à Septembre. Et, la saison fraîche et relativement froide allant Avril en Octobre et la période sèche s'étale de mai à septembre.

I.2.1 Le réseau de stations météorologiques

La Région de Vakinankaratra est dotée de 22 Stations météorologiques, dont trois seulement sont fonctionnelles, mais la plupart ne sont plus opérationnelles. Le tableau ci-dessous montre les Stations météorologiques à Vakinakaratra :

STATION	Longitude Est	Latitude Sud	Altitude (m)
<u>ANTANIFOTSY</u>			
ANTANIFOTSY (gare)	47° 19	19° 40	1500
AMBOHIMANDROSO AMBATOTSIPIHINA	47° 26	19° 30	1603
ILEMPONA (Gare)	47° 21	19° 51	1500
	47° 18	19°39	1611
<u>ANTSIRABE</u>			
ANTSIRABE I (aero)	47°04	19° 52	1540
AMBOHIMIARIVO	47° 08	19° 51	1640
<u>ANTSIRABE II VINANINKARENA</u>			
ANDRANOMANELATRA	47° 03	18° 59	1400
MANANDONA	47° 06	19° 47	1628
SOANINDRARINY	47° 03	20° 03	1350
AMBOHIBARY	47° 14	19° 54	1800
	47° 07	19° 37	1650
<u>BETAFO</u>			
BETAFO	46° 50	19° 50	1490
SOAVINA	46° 44	19° 47	1375
ANKAZOMIRIOTRA	46° 32	19° 39	-
MANDOTO	46° 17	19° 34	840
	46° 55	19° 24	1750

Tableau 3:Stations d'observation météorologiques de la région Vakinakaratra

I.2.2 Température

La Région Vakinankaratra est la région qui a une température la plus fraîche dans tout Madagascar. Son climat est de type « tropical d'altitude » dans les parties élevées de l'Est et du Centre (Antanifotsy, Antsirabe I et Antsirabe II, Faratsiho, Ambatolampy).

La Région de Vakinankaratra fait partie du régime climatique tropical d'altitude, supérieure à 900 mètres. Elle est caractérisée par une température moyenne annuelle inférieure ou égale à 20° C ;

Dans les parties élevées de l'Est et du Centre, les températures moyennes se situent autour de 13 °C, le district d'Antanifotsy ayant une moyenne de 13°7 avec des maxima de 25°8 et des minima de 1°C.

Par contre, dans le Moyen Ouest, le district de Betafo enregistre une moyenne annuelle de température de 21° avec des maxima de 30°8 et des minima de 10°2.

Les températures ne présentent pas trop de risque pour les diverses spéculations agricoles, sauf dans les hautes altitudes.

I.2.3 Diagrammes ombrothermiques

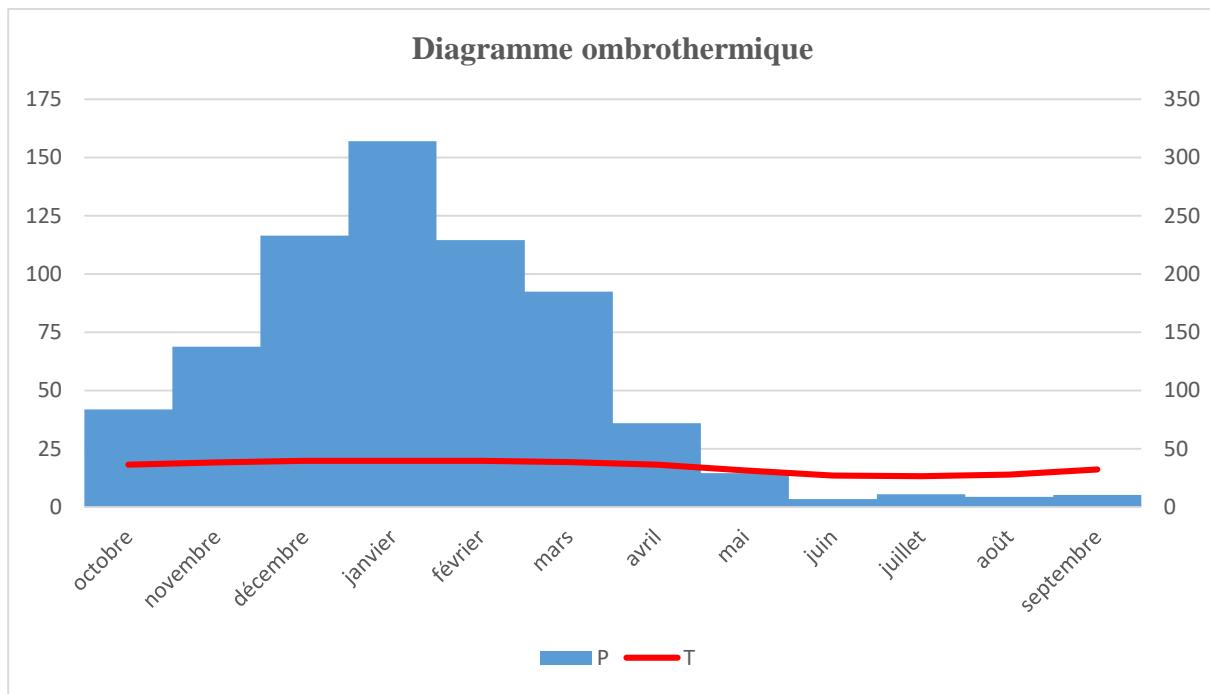


Figure 2: Diagrammes ombrothermiques

Source : Auteur

Ce diagramme est une représentation graphique des températures et quantité de précipitations moyennes mensuelles de Vakinakaratra selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures.

Ce diagramme permet de caractériser un climat d'un seul coup d'œil. D'après ce diagramme, on peut dire que le mois humide est entre octobre jusqu'à Avril et le mois sec est le mois de Mai jusqu'à Septembre. Lorsque la barre de précipitation est sous la courbe des températures, on dit « mois sec ». Et lorsqu'il dépasse la courbe des températures. On dit « mois humide ».

I.2.4 Pluviométrie

La pluviométrie de la région décroît d'Est en Ouest. La précipitation moyenne est de 1 505,9 mm en 109 jours avec un maximum de 1 952 mm en 122 jours à Faratsihô et un

minimum de 1 335,3 mm en 116 jours à Antanifotsy. Aucun mois n'est sec sauf le moyen Ouest.

En effet, du côté abondance de pluies, on peut distinguer :

- ✓ Une saison sèche au cours de laquelle l'irrigation est toujours nécessaire.
- ✓ Une saison humide où l'abondance de l'eau entraîne l'inondation durant la période cyclonique.

I.2.5 Humidité de l'air

En général, l'humidité apportée par l'Alizé est constamment élevée étant donné qu'elle varie de 69% à 82% dans une année.

I.2.6 Vent

Vu qu'Antsirabe se trouve dans la région centrale de Madagascar, il est évident que le vent dominant soit l'Alizé.

Le vent dans la région Vakinakaratra peut classifier comme le vent faible. Sa direction est de Nord-Est est quasi constante tout au long de l'année. Néanmoins, au mois de décembre, on constate la présence de deux vents dominants : venant du Nord-Est et du Nord. Avec une vitesse de 7 à 11 km/h.

I.2.7 Cyclone

La région est rarement touchée par des perturbations tropicales. L'abondance des pluies pendant le passage des cyclones sur les hautes terres risque pourtant de provoquer l'inondation des parties basses et l'érosion des bassins versants.

II. 3 Végétations et sols

I.3.1 Végétation

La région de Vakinankaratra est caractérisée par une faible superficie couverte de forêt primaire. La dégradation est telle qu'il ne reste plus que quelques lambeaux de forêt dans la région.

La superficie de la forêt existante est de 54 506 ha qui représentent une proportion de couvertures forestière d'un peu moins de 4 % par rapport à la superficie de la région.

Dans les bas-fonds, on rencontre des marais à joncs et parfois à Viha, quelques vestiges de forêts-galeries qui sont en voie de disparition, et on note l'existence de deux types de forêts à savoir :

- ✓ Forêts claires sclérophyllées de montagne.
- ✓ Forêts denses humides de moyenne altitude.

I.3.2 Sols

La Région de Vakinankaratra est marquée par la dominance de deux types de sols :

Les « sols ferrallitiques » couvrant une grande partie de la région. Ils sont d'évolutions très diverses, pouvant porter du maïs, du manioc, et peuvent se prêter à la culture de pommes de terre et à l'arboriculture.

Les « sols alluvionnaires », constituant les bas-fonds portent en plus du riz, des cultures de contre saison.

II. 4 Relief

La Région de Vakinankaratra s'étend sur une superficie de 17.496 Km². Elle fait partie des hautes terres. Son relief se distingue par une altitude plus élevée et elle est dominée par des sols volcaniques comprenant plusieurs bassins aménagés : Ambohiby et Faratsihy.

Cette région s'identifie aussi à trois ensembles naturels :

Le Centre est caractérisé par le massif volcanique de l'Ankara ra où se trouve la plus haute altitude de la Province d'Antananarivo qui culmine à 2 644 mètres, le Tsiafajavona

Au sud, la constitution de l'Ankaratra a provoqué dans la partie occidentale une série d'effondrements favorisant la formation de dépressions à fond alluviale et présentant de nombreux cratères et lacs. La zone méridionale, dominée par la chaîne de l'Ibity est constituée d'une succession de petites cuvettes au sol sableux.

Le Moyen Ouest de Vakinankaratra est constitué par la pénéplaine de : Mandoto-Ramaritina et où l'altitude s'abaisse à 1 000 m.

II. 5 Agriculture

I.5.1 Caractéristiques globales de la culture

Globalement, l'ensemble des districts est caractérisé par la prédominance des cultures vivrières, les spéculations comme la canne à sucre ou le café restent très limitées. On peut regrouper ces sept districts en deux types :

Un premier type caractérisé par la présence de cultures telles que le haricot, pomme de terre et patate. Ces cultures étant favorisées par un climat adéquat. Ce type de cultures concerne les districts de Betafo et de Faratsihо.

Un deuxième type où les cultures sèches et le riz sont représentés à part égaux, notamment pour les districts d'Antanifotsy et d'Antsirabe II.

En ce qui concerne les techniques agricoles utilisées, celles traditionnelles restent encore prédominantes. Elles sont les plus utilisées dans 5 districts sur 7. A Mandoto et Betafo, l'agriculture utilise des techniques semi-mécanisées. L'usage des techniques mécanisées est encore limité dans tous les 7 districts de la région.

I.5.2 Occupation du sol

Dans la région de Vakinankaratra, les cultures vivrières occupent plus de 90 % des superficies cultivées dans l'ensemble de la région.

Les principales cultures sont le riz, le manioc, le maïs, la patate douce, le haricot et la pomme de terre.

Bien que la riziculture occupe 30 % de la superficie totale vivrière. Dans cette région, la pomme de terre tient la quatrième place derrière le riz, le manioc et la patate douce, elle occupe plus de 17 % de la superficie totale cultivée dans certains districts comme Antsirabe II.

**PARTIE 2 METHODOLOGIE ET
APPLICATION**

Chapitre III Méthodologie

III. 1 Étude de la qualité de la saison pluvieuse

Les manifestations de cette dégradation du climat se caractérisent souvent par une mauvaise qualité de la saison pluvieuse qui sera analysée à travers trois paramètres : le nombre de jours pluvieux, la durée de la saison des pluies et la fréquence des épisodes pluvieux.

II.1.1 Détermination de la durée de la saison des pluies

II.1.1.1 Définition de la durée de la saison des pluies

On constate que la durée de la saison de pluie est la différence entre le début de saison et la fin de saison. Alors, pour déterminer cette durée, on doit calculer la date du début et fin de saison.

Cette date est importante dans la planification des opérations agricoles, particulièrement le semis pour le début de saison. Dans le cadre de cette étude, nous appliquons les méthodes de STERN *et al.* Le choix de ces critères peut varier d'un auteur à un autre en fonction du climat de chaque région.

II.1.1.2 Méthode de STERN

Cette méthode définit le début de la saison des pluies lorsque 20 mm de pluie sont recueillis en deux jours consécutifs sans période sèche supérieure à dix jours dans les trente jours qui suivent, et la fin lorsqu'il n'y a plus de pluie durant une période de quinze jours.

II.1.1.3 Autres méthodes

Selon Balme et al. (2005), il existe en fait plusieurs définitions du début de la saison des pluies selon les domaines d'intérêt. Ainsi, un météorologue considérera comme début des pluies les premières précipitations liées à la mise en place de la première convection organisée.

Pour l'hydrologue, ce même critère sera déterminé par la première pluie générant du ruissellement. Enfin, pour l'agronome, le début de la saison pluvieuse ne peut pas être suivi des épisodes secs trop longs pouvant porter préjudice aux cultures.

Selon Samba et al. Ils ont défini les saisons pluvieuses potentiellement utiles comme étant une succession significative de jours de pluie (qui offre une disponibilité en eau pour l'agriculture) aux mêmes conditions atmosphériques dont les effets (reprise du cycle végétatif des plantes) sont perceptibles au niveau de la végétation. Ils estiment que le début de saisons de pluie intervient quand 2 jours consécutifs cumulent 20mm non suivis d'une séquence de 7jours sans pluie durant 20 jours.

Selon Tchiadeau et al(1999). Il est généralement admis qu'une pluie de 20 mm mérite l'appellation de précipitations utiles ou pluies significatives. Pour sa part, Lahuec (1991) affirme que cette hauteur de précipitation suffit à faire démarrer une végétation herbacée en zone pastorale ou à assurer la levée du semis en zone agricole.

La fin de la saison pluvieuse, selon eux, intervient lorsque 2 jours consécutifs reçoivent un total pluviométrique de moins d'un millimètre et suivi d'une période d'au moins 6 jours sans pluie, ou quand leur total est inférieur à 10 mm.

Selon Erpicum *et al.* (1988). La saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade » (période de cinq jours) déterminée est supérieure à celle d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours. Selon le même calcul, la fin de la saison des pluies est fixée dès que la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade ».

II.1.2 Analyse des épisodes pluvieux

La détermination des épisodes pluvieux est des questions cruciales dans tous les pays qui dépendent de l'agriculture pluviale, car d'elles dépendent le calendrier agricole et en grande partie les quantités récoltées.

II.1.2.1 La distribution de leurs fréquences

Par épisode pluvieux on entend une séquence de jours de pluie successifs. Dans notre étude, le EP_n désigne les épisodes pluvieux avec n varie $[1 ; n]$ tel que n sont les nombres des jours successifs avec de pluie. Donc, s'il y a 3jours successifs de pluie, on les appelle EP_3 .

Les épisodes pluvieux de chaque mois de l'année ont été classifiés en (n) types selon leur durée que sont , EP_1 , EP_2 , $EP_3 \dots EP_n$. L'objectif de cette étude est compté les nombres des répétions des chaque classification durant les périodes de retour 49ans dans la région Vakinakaratra, et calculées leurs quantités et les nombres des jours de pluie pendant la saison de pluie.

Les catégories suivantes sont considérées dans cette analyse : épisodes pluvieux moins 5 jours, 6 à 9jours, 10 à 16 jours, et supérieur à 16jours. Les épisodes pluvieux sont étudiés selon le déroulement de l'été et suivant différentes périodes qui ont marqué l'histoire pluviométrique de la zone d'étude.

II.1.2.2 Modèle de Markov de type exponentiel

On désigne par modèle de Bernoulli un modèle de Markov avec des probabilités de transition égales, c'est-à-dire un modèle dans lequel l'état (sec ou pluvieux) d'un jour n'est pas conditionné par l'état du jour précédent. Il s'avère qu'un modèle de Bernoulli, plus parcimonieux qu'un modèle de Markov, décrit aussi bien une saison des pluies.

❖ Le nombre des épisodes pluvieux

Considérons une période de n jours. Pour chaque jour, on associe une variable aléatoire X_J de Bernoulli où :

$$X_J = \begin{cases} 1 & \text{si le } J - \text{ème jours est pluvieux} \\ 0 & \text{si le } J - \text{ème jours est sec} \end{cases}$$

Avec $J = 1, 2, 3, \dots, n$ où n le nombre des jours dans la période.

Pour cette période le nombre de jours pluvieux est :

$$N_n = \sum_{j=1}^n X_j$$

N_n peut être égale à **0** ou **1** ou **2** ou ... ou **n**

❖ **Quantité des épisodes pluvieux**

$$S_n = \sum_{i=1}^n E_i$$

Où E_i : la quantité journalière de la précipitation avec $E_0 = 0$

Dans cette étude la plupart des opérations comme l'analyse des épisodes pluvieux, moyen des quantités de pluie ainsi que les courbes et histogrammes sont faites sur **Excel**, le dénombrement de la fréquence des épisodes pluvieux ainsi que leurs quantités respectives est fait par une programmation en **langage R**.

III. 2 Détermination des besoins en eau des cultures

La détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant, aussi bien la plante elle-même que les données climatiques ou pédologiques de la région.

Il est la quantité d'eau nécessaire pour couvrir les pertes en eau par évapotranspiration d'une culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol (fertilité et humidité), et réalisant son potentiel de production sous les conditions considérées.

Ce besoin correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture (ET_c) qui dépend de la demande climatique ou de l'évapotranspiration de référence (ET_o) et du coefficient cultural (K_c) (*Figure ci-dessous*).

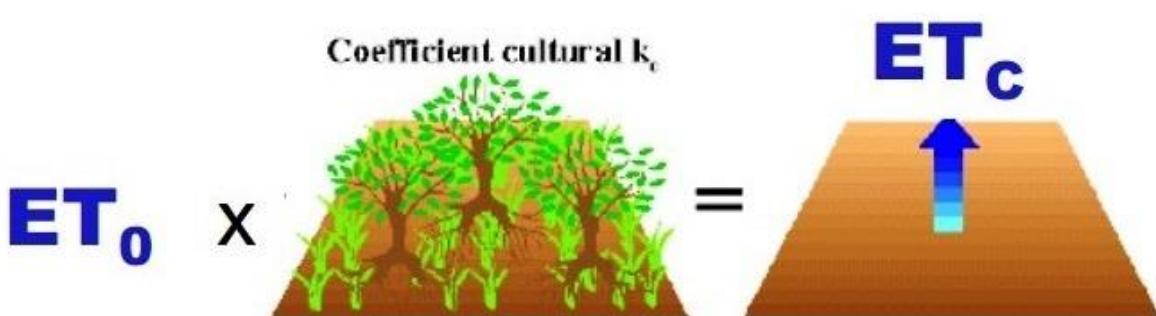


Figure 3: Schéma de calcul des besoins en eau des cultures ou de l'évapotranspiration maximale, ET_c selon la méthode de la FAO- 56 (Allen et al. 1998)

Source: FAO ET_c / MEAN GROWTH.

Il est donc important de quantifier la quantité d'eau utile par évapotranspiration. Les travaux réalisés sur la détermination des besoins en eau des cultures, s'orientent essentiellement, soit vers des approches expérimentales ou méthodes dites directes, soit vers des approches basées sur des modèles ou méthodes dites indirectes.

Pour les méthodes directes, nous pouvons citer : la méthode du bilan hydrique, la méthode lysimétrique et des méthodes microclimatiques basées sur le bilan d'énergie de la surface du couvert végétal. ; parmi les méthodes indirectes, l'approche climatique basée sur la méthode FAO-56 est généralement la plus utilisée. Elle est basée sur le modèle suivant :

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

II.2.1 L'évapotranspiration de référence (ET₀)

II.2.1.1 Définition d'ET₀

Après irrigation, une grande partie de l'eau qui pénètre dans le sol. Les plantes extraient l'eau du sol par leurs racines. La plus grande partie de cette eau ne reste pas dans la plante, mais est restituée dans l'atmosphère par les feuilles et les tiges. C'est le processus de la transpiration. Le sol sous l'effet de la chaleur évapore l'eau qu'il contient. C'est l'évaporation. L'ensemble de ces processus constitue le terme d'**évapotranspiration**

Le concept de l'évapotranspiration de référence ET₀ a été introduit pour étudier la demande évaporation de l'atmosphère indépendamment du type du couvert végétal et des pratiques de gestion.

Devant la difficulté à respecter les conditions standards pour le calcul d'ET₀, des méthodes empiriques ou semi-empiriques ont été développées pour estimer l'évapotranspiration de référence à partir de différentes variables climatiques.

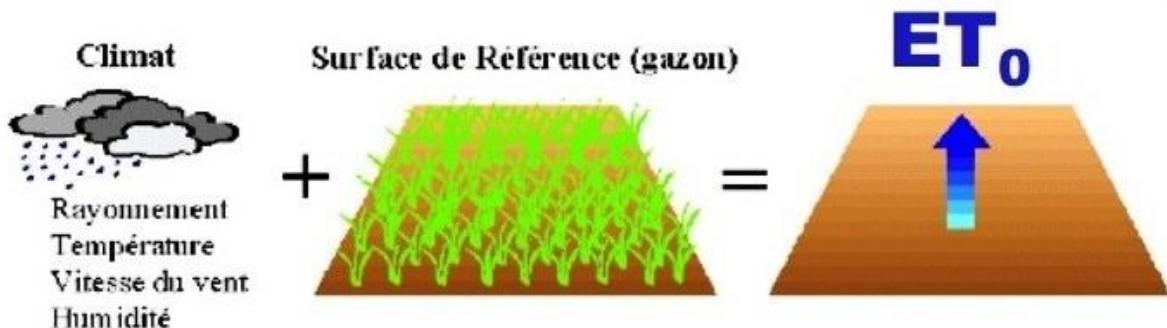


Figure 4: Schéma de calcul d'évapotranspiration de référence selon la méthode de la FAO- 56 (Allen et al. 1998)

Source: FAO ETc / MEAN GROWTH.

II.2.1.2 La méthode de Penman-Monteith (ET₀)

La formule FAO Penman-Monteith a été proposée par Allen et al en 1988, en simplifiant à l'équation originale de Penman-Monteith à partir d'un certain nombre de suppositions sur des paramètres qu'ils ont considérés constants.

La formule FAO Penman-Monteith pour l'évapotranspiration potentielle de référence est :

$$ETo = \frac{0,408\Delta((R_n-G)+\gamma \frac{900}{T+273}\mu_2(e_s-e_a))}{\Delta+\gamma(1+0,34\mu_2)}$$

Avec :

ETo : Evapotranspiration de référence (mm/j).

T : Température de l'air (°C)

μ_2 : Vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol (m/s).

Δ : Rapport entre la différence de pression de vapeur et la différence de température correspondant. (KPa/°C)

γ : Constante psychrométrique ($\gamma \sim 66$ Pa/°K)

Rn : Le rayonnement net à la surface du sol (MJ/m²/j)

G : Le flux de chaleur du sol. (MJ/m²/j)

e_s : Pression de vapeur (kPa).

e_a : Pression de vapeur saturante à la température T (kPa).

II.2.1.3 Autre méthode pour estimer L'évapotranspiration de référence

Devant la difficulté pour le calcul de ETo, différentes formules empiriques ont été développées pour l'estimer. Ces formules empiriques peuvent être classées en trois groupes :

- Les méthodes de température (Blaney and Criddle, 1950; Hargreaves and Samani, 1985), (Annexe1)
- Les méthodes de rayonnement (Makkink, 1957; Turc, 1961; Priestly and Taylor, 1972), (Annexe 1)
- Les méthodes combinées (Penman, 1948; Allen et al. 1998).

L'utilisation de formule empirique est basée sur plusieurs considérations comme le type du climat et la disponibilité des paramètres nécessaires. Les formules non adéquates peuvent surestimer ou sous-estimer les besoins en eau des cultures.

II.2.2 Coefficient cultural (Kc)

II.2.2.1 Définition de Kc

Le coefficient Kc est utilisé pour tenir compte des caractéristiques de la culture. Il varie en fonction de l'âge de la culture, de la saison et du stade phénologique.

Pour les autres types des cultures, le coefficient cultural rend compte des effets des différences couvertes par rapport à la surface en termes de hauteur, d'Albédo et de résistance.

La valeur du coefficient cultural dépend ainsi : le stade de développement de la culture, les types de culture et les sols, le climat. Il est le rapport entre l'évapotranspiration maximale (ETc) et celle de l'évapotranspiration de référence ET₀.

II.2.2.2 Méthode de détermination de Kc

Il existe deux approches pour développer la détermination de ce coefficient : une approche à coefficient cultural simple et une autre à coefficient cultural double.

Dans la première approche, le coefficient cultural simple Kc regroupe l'évaporation du sol et la transpiration de la plante.

Dans la deuxième approche, Kc est divisé en deux termes, l'une s'est Ke qui tient compte uniquement de l'évaporation du sol. Et l'autre c'est Kcb qui tient compte de la transpiration de la plante.

Pour choisir le coefficient cultural simple, l'effet de la transpiration de la plante et de l'évaporation du sol est confiné dans un seul coefficient.

L'approche du coefficient cultural double est beaucoup plus compliquée et nécessite plus de calcul comparativement à l'approche simple. Cette approche consiste à diviser le coefficient cultural Kc en deux coefficients : Un pour la transpiration Kcb appelée coefficient cultural de base, et l'autre pour l'évaporation du sol Ke appelé coefficient d'évaporation :

$$\mathbf{Kc = Kcb + Ke}$$

II.2.2.3 La variation de K_c au cours du cycle d'une culture

La figure suivante montre une courbe représentative de la variation d'un coefficient cultural simple.

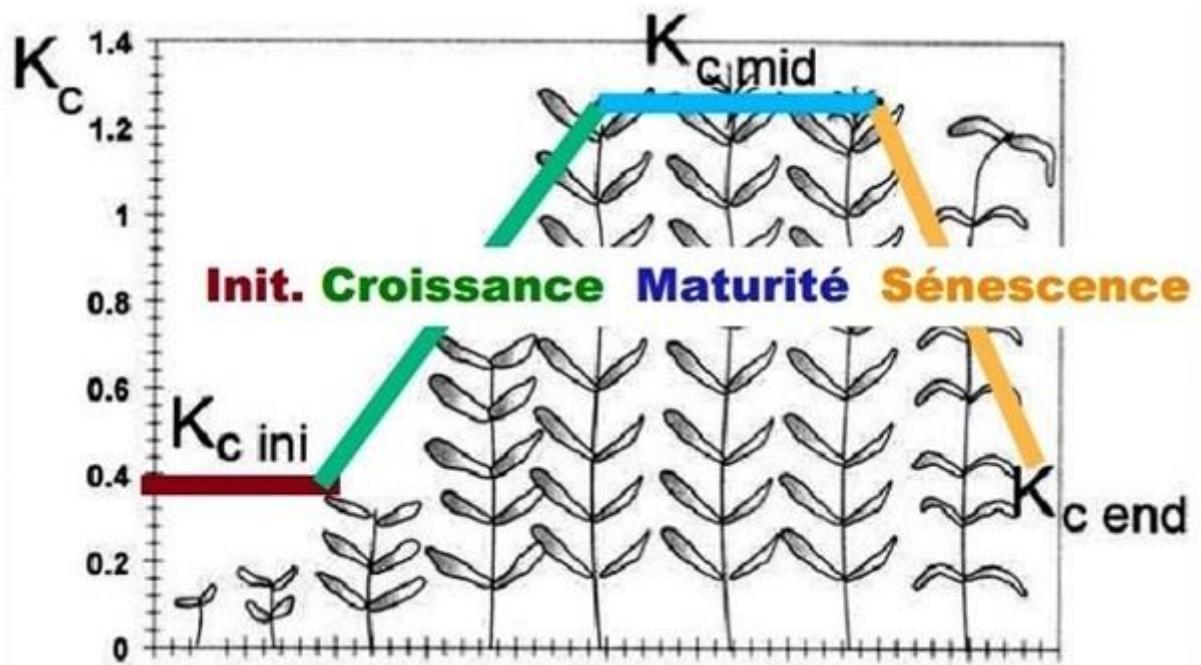


Figure 5: Courbe représentative du coefficient cultural simple (Allen et al. 1998)

Source : FAO ETc / MEAN GROWTH

Chapitre IV Traitement de données et logiciel utilisé

IV. 1 Données utilisées

II.1.1 Données météorologiques

II.1.1.1 Choix des stations représentatives

Nous choisissons le district Antsirabe-I dans la région Vakinakaratra pour notre champ d'études. Le relevé de précipitations s'étale sur la série de 49 ans.

II.1.1.2 Pluviométrie

Les données pluviométriques de base que nous utilisons proviennent de la Direction Générale de la Météorologie (DGM). Il s'agit en fait des précipitations journalières s'étalent sur la série de 49 ans mesurés en mm pour le district de région Vakinakaratra.

II.1.1.3 Évapotranspiration Potentielle (ETP)

Nous utiliserons l'ETP normale décadaire pour la station de district Antsirabe-I de la région Vakinakaratra, disponible dans la base de données du service météorologie agricole à la DGM. En effet, c'est pour cette station que nous avons des données de Température sur 30 ans.

II.1.2 Données agricoles

Les données de la production agricole issues au DRAE Antsirabe ont été utilisées dans ce présent travail.

IV. 2 Logiciel utilisé

II.2.1 Logiciel d'organisation de données MS Excel 2013

Nous y procémons :

- La préparation des données d'entrées pour le CROPWAT 8.0 et langage R
- L'organisation des données de sorties dans ceux modèles
- L'analyse des données météorologiques
- L'application de statistiques descriptives ainsi que les graphes

II.2.2 Langage R

II.2.2.1 Origines de Langage R

Le logiciel R est un logiciel de statistique créée par Ross Ihaka & Robert Gentleman. Il est à la fois un langage informatique et un environnement de travail.

Les commandes sont exécutées grâce à des instructions codées dans un langage relativement simple, les résultats sont affichés sous forme de texte et les graphiques sont visualisés directement dans une fenêtre qui leur est propre.

Ce logiciel sert à manipuler des données, à tracer des graphiques et à faire des analyses statistiques sur ces données.

II.2.2.2 Fonctionnement de Langage R

R est un langage interprété et non compilé, c'est-à-dire que les commandes tapées au clavier sont directement exécutées sans qu'il soit besoin de construire un programme complet comme cela est le cas pour la plupart des langages informatiques (C, Fortran, Pascal, . . .).

Ensuite, la syntaxe de R est très simple et intuitive. Par exemple, une régression linéaire pourra être faite avec la commande `lm(y ~ x)`. Avec R, une fonction, pour être exécutée, s'écrit toujours avec des parenthèses, même si elles ne contiennent rien (par exemple `ls()`).

Si l'utilisateur tape le nom de la fonction sans parenthèses, R affichera le contenu des instructions de cette fonction.

Quand R est utilisé, les variables, les données, les fonctions, les résultats, etc, sont stockées dans la mémoire de l'ordinateur sous forme d'objets qui ont chacun un nom. L'utilisateur va agir sur ces objets avec des opérateurs et des fonctions. Une fonction de R peut être schématisée comme suit :

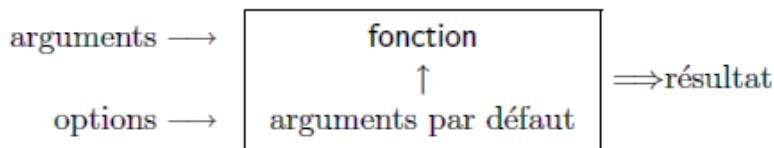


Figure 6: Fonctionnement de Langage R

II.2.2.3 Programmer avec R en pratique

- **Boucles et vectorisation**

Comme les autres langages, R possède des structures de contrôle qui ne sont pas sans rappeler celles du langage C.

Supposons qu'on a un vecteur x, et pour les éléments de x qui ont la valeur b, on va donner la valeur 0 à une autre variable y, sinon 1. On crée d'abord un vecteur y de même longueur que x :

```
y <- numeric(length(x))  
for (i in 1: length(x)) if (x[i] == b) y[i] <- 0 else y[i] <- 1
```

On peut faire exécuter plusieurs instructions si elles sont encadrées dans des accolades :

```
for (i in 1: length(x)) {  
  y[i] <- 0  
}  
if (x[i] == b) {  
  y[i] <- 0
```

}

Les boucles et structures de contrôle peuvent cependant être évitées dans la plupart des situations et cette grâce à une caractéristique du langage R : la vectorisation.

La structure vectorielle rend les boucles implicites dans les expressions et nous en avons vu de nombreux cas.

II.2.2.4 Ecrire un programme en R

Typiquement, un programme en R sera écrit dans un fichier sauvé au format ASCII et avec l'extension ‘.R’. La situation typique où un programme se révèle utile est lorsque l'on veut exécuter plusieurs fois une tâche identique.

Le caractère ‘#’ sert à ajouter des commentaires dans le programme : R passe alors à la ligne suivante. Comme pour toute lecture dans un fichier, il est nécessaire de préciser le chemin d'accès au fichier s'il n'est pas dans le répertoire de travail.

II.2.2.5 Lire des données dans un fichier

Pour les lectures et écritures dans les fichiers, R utilise le répertoire de travail. Pour connaître ce répertoire, on peut utiliser la commande `getwd()` (get working directory), et on peut le modifier avec, par exemple, `setwd("C:/data")` ou `setwd("/home/paradis/R")`. Il est nécessaire de préciser le chemin d'accès au fichier s'il n'est pas dans le répertoire de travail.

La fonction `read.table` a pour effet de créer un tableau de données et est donc le moyen principal pour lire des fichiers de données. Il y a plusieurs options dont voici les valeurs par défaut :

```
read.table(file, header = FALSE, sep = "", quote = "\\"", dec = ".",
row.names, col.names, as.is = FALSE, na.strings = "NA",
colClasses = NA, nrows = -1,
skip = 0, check.names = TRUE, fill = !blank.lines.skip,
strip.white = FALSE, blank.lines.skip = TRUE,
comment.char = "#")
```

II.2.2.6 Information et gestion de données

NA : Donnée manquante (Not Available) et is.na (a) : Demande si un autre objet contient des NA. na.omit (X) / na.exclude (X) / a[!is.na(a)] supprime les informations manquantes (trois méthodes quasiment équivalentes, attention à vérifier le résultat de ces fonctions parfois capricieuses) identical (obj1, obj2) Test si deux objets sont identiques

II.2.3 Cropwat 8.0 for Windows

II.2.3.1 Présentation du modèle cropwat 8.0 for Windows

De manière générale, un modèle correspond à une représentation simplifiée de la réalité. Un modèle peut être défini comme étant : « un ensemble de relations mathématiques » composé de « variables d'entrée, de paramètres relatifs aux différents processus et de variables de sortie »

Un logiciel conçu par la FAO. Il facilite les calculs des besoins en eau des cultures, des plans d'irrigation et des besoins en eau d'un périmètre à partir des données climatiques moyennes décennales, des données concernant la culture et les sols.

Il a été développé par Joss Swennenhuis pour le service des eaux ressources, mis en valeur et aménagé par la FAO. Il est basé sur les versions DOS de CROPWAT 5.7 (1992) et de CROPWAT 7.0 (1999). Les procédures, les algorithmes et la documentation ont été développés et/ou testés par Martin Smith, Gerardo Van Halsema, Florent Maraux, Gabriella Izzi, Robina Wahaj et Giovanni Muñoz.

II.2.3.2 Objectif du modèle cropwat 8.0 for Windows

Le modèle Cropwat est un support d'aide pour l'irrigation des cultures développé par la FAO, basé sur le calcul du bilan hydrique. Il est utilisable pour toutes les sortes de culture et dans différentes régions climatiques.

Sa fonction principale est de déterminer le besoin en eau des cultures et de développer des schémas d'approvisionnement en eau. Pour cela, le modèle calcule l'évapotranspiration de référence, basée sur l'équation de Penman-Monteith et en fonction de données météorologiques.

Le logiciel offre également la possibilité de développer un calendrier d'irrigation des cultures, d'évaluer les effets du manque d'eau sur les cultures, ainsi que l'efficience des différentes pratiques d'irrigation.

Afin de pouvoir simuler, les besoins en eau d'une culture, des données sur la culture en question, ainsi que sur le sol sur lequel la culture pousse, s'ajoutent aux données

météorologiques. L'ensemble des données utilisées par le programme est détaillé comme les suivantes :

II.2.3.3 Données d'entrée (Input)

- **Climat/ETo:**

On peut accéder aux options du Climat/ETo en choisissant Options dans le menu paramètre ou en choisissant le bouton options dans la barre d'outils

La FAO fournit également une base de données climatique, CLIMWAT, qui répertorie les données nécessaires au calcul de l'ETP, par station et en moyennes mensuelles : températures minimales et maximales, humidité, vitesse du vent, et insolation.

À partir des données climatiques, on calcule donc l'ETP journalière (mm/jour) par cellule de la grille du CRU puis, pour chaque bassin versant on effectue la moyenne sur les cellules concernées. Ces valeurs d'ETP sont ensuite rentrées dans des fichiers compatibles avec le logiciel Cropwat ; on crée un fichier des moyennes mensuelles d'ETP journalière.

- **Précipitations :**

Les options précipitations sont accessibles en choisissant sur l'icône précipitations dans la barre de modules .Toutes les options Précipitations se réfèrent au calcul des précipitations efficaces basé sur les données de précipitations réelles.

- **Culture :**

Ce module peut être sélectionné en cliquant sur l'icône Culture, située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. Dans ce module, il y a deux possibilités. D'une part, on doit encoder l'ensemble des cellules sur fond blanc. D'autre part, on utilise un fichier « .cro » fourni avec le logiciel CROPWAT, en cliquant sur l'icône « **Ouvrir** » située dans la barre d'icônes de ce logiciel.

Cette fenêtre contient les informations relatives aux : nom de la culture, sa date de plantation, valeurs de kc, phase (jours), profondeur d'enracinement (m), épuisement maximum (fraction), et la réponse en rendement (t):

- **Sol :**

Ce module est activé en cliquant sur l'icône Sol dans la barre Modules située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. Comme le précédent, ils offrent deux possibilités. Soit on encode les données directement. Soit on utilise un fichier « SOI » fourni par le logiciel CROPWAT.

Cette fenêtre contient les informations suivantes : le nom du sol, l'eau disponible totale (CC-PF), le taux d'infiltration maximum de l'eau de pluie, la profondeur maximum d'enracinement et l'épuisement de la teneur en eau initiale (en % de RU (TAM)). L'eau disponible initiale est automatiquement calculée en fonction du % d'épuisement de RU.

- **Assolement :** pour l'entrée de données assolement nécessaire pour les calculs d'approvisionnement du périmètre.

II.2.3.4 Données de sortie (Output)

- **Besoins en eau :**

Le module « Besoins en eau » des cultures peut être activé en cliquant sur l'icône « Besoins en eau » située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. Le tableau contient 8 colonnes : le mois, la décade, la phase, le Kc, ETc [mm/jour], ETc [mm/déc.], la Pluie efficace [mm/déc.] et les Besoins en irrigation [mm/déc.]

Le module « Besoins en eau » des cultures inclut des calculs fournissant les besoins en eau d'irrigation d'une culture sur une base décadaire pour toute la durée de la saison de développement. Ces besoins d'irrigation sont obtenus à partir de la différence entre l'évapotranspiration et les Précipitations efficaces.

- **Calendrier :**

Le calendrier a été effectué avec un critère d'échéance : « Irriguer à l'épuisement maximum » c'est-à-dire réserve facilement utilisable par la plante (RFU), le critère d'apport de la dose d'irrigation est « recharger le sol à la capacité au champ », le critère d'efficience est de 70%.

Il est possible de personnaliser les critères d'échéances, d'apports et l'efficience de l'irrigation. Ce module peut être activé en cliquant sur l'icône « Calendrier » située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. Ceci permet de :

- Développer des calendriers d'irrigation indicatifs pour améliorer la gestion de l'eau.
- Évaluer les pratiques d'irrigation actuelles et les productivités en eau des cultures correspondantes.
- Évaluer la production des cultures en pluviale et examiner la faisabilité d'une irrigation d'appoint.
- Développer des programmes alternatifs de distribution d'eau dans des conditions d'approvisionnement en eau restreint.
- **Périmètre** : pour le calcul de l'approvisionnement du périmètre basé sur un assolement

Sur cette fenêtre sont résumés :

- ✓ Les informations utilisées pour le calcul : Station météo utilisée pour l'ET₀, Station météo utilisée pour la pluviométrique, le nom de l'assolement.
- ✓ Les déficits mensuels en précipitations sont fournis pour chacune des cultures de l'assolement.

II.2.3.5 Schéma de fonctionnement du logiciel

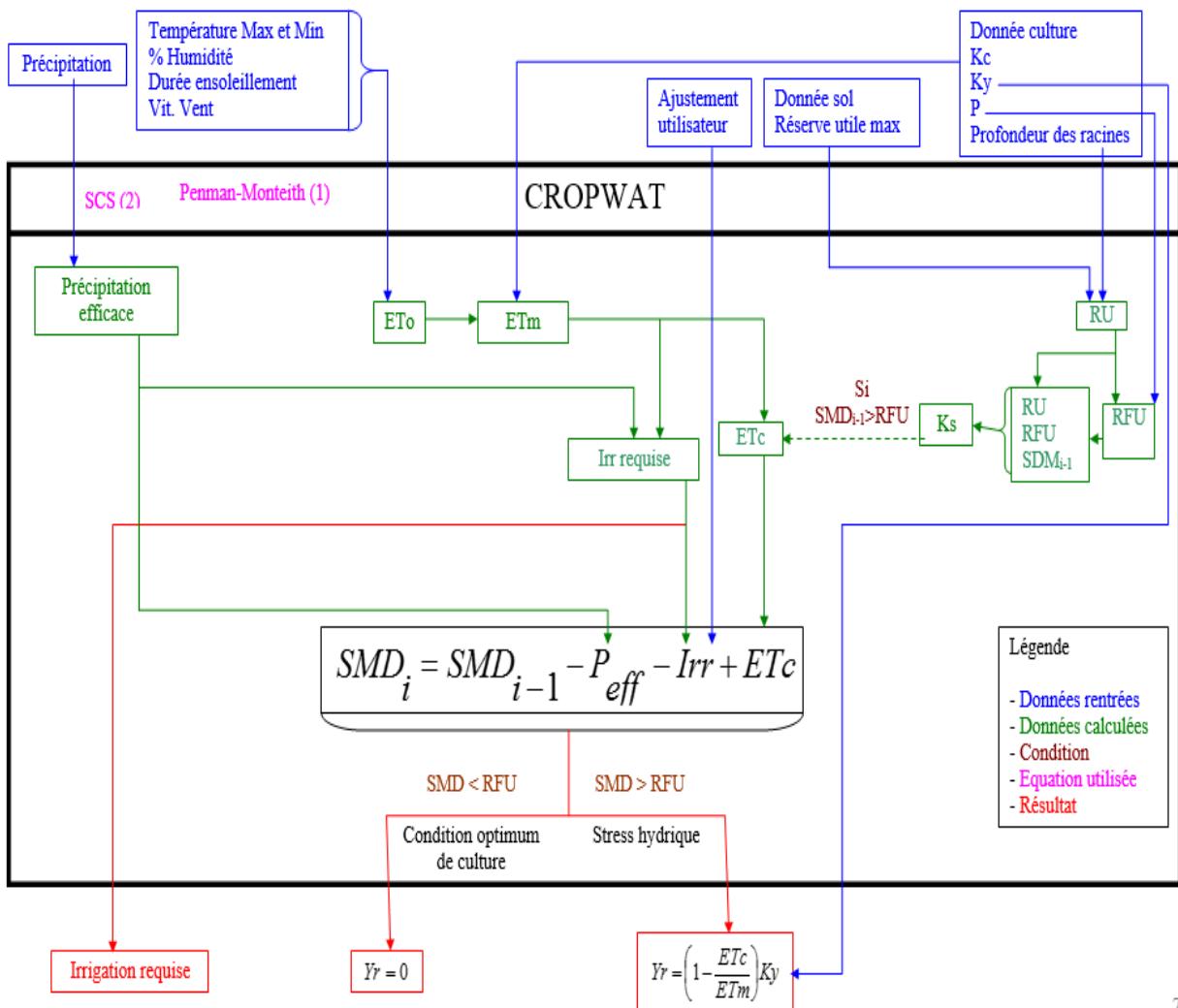


Figure 7: Schéma de fonctionnement du logiciel et formules utilisées

Source : Utilisation de CROPWAT

II.2.4 Formule utilisée pour le logiciel CROPWAT

II.2.4.1 Coefficient de stress hydrique K_s

Pour déterminer K_s , nous utilisons la formule suivante :

$$K_s = \frac{RU - SMD_{i-1}}{RU - RFU}$$

K_S : Coefficient de stress hydrique (sans dimension)

RU : Réserve utile (mm)

SDM_{i-1} : Déficit de la réserve utile à la date i-1 (mm)

RFU : Réserve utile facilement utilisable

II.2.4.2 Calcul de la réserve utile (TAM ou RU)

$$RU = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \times z$$

RU : Réserve utile (mm)

θ_{FC} : Eau contenue au maximum dans le champ (m^3/m^3)

θ_{WP} : Eau contenue au point de flétrissement (m^3/m^3)

z : Profondeur des racines (m)

II.2.4.3 Calcul de la réserve facilement utilisable (RAM)

$$RFU = RU \times P$$

RFU : Réserve utile facilement disponible (mm)

RU : Réserve totale disponible (mm)

P : Tarissement admissible

II.2.4.4 Calcul du déficit de la réserve utile dans le sol (SMD)

$$SDM_i = SDM_{i-1} - P_{eff} - I_{rr} + ETC$$

SDM_i : Tarissement de la réserve du sol à la date i (mm)

SDM_{i-1} : Tarissement de la réserve du sol à la date i-1 (mm)

P_{eff} : Précipitation efficace à la date i (mm)

I_{rr} : Irrigation (mm)

ETC : Evapotranspiration de la culture à la date i (mm)

II.2.4.5 Calcul des pluies efficaces

Pour calculer les pluies efficaces, Cropwat utilise la formule de l'USDA –SCS :

- ✓ Pour des précipitations inférieures à 250mm :

$$P_{eff} = \frac{P_{tot} \times (125 - 0,2 \times P_{tot})}{125}$$

P_{eff} : Précipitation efficace (mm)

P_{tot} : Précipitation totale (mm)

- ✓ Pour des précipitations supérieures à 250 mm, il utilise la formule :

$$P_{eff} = 125 + 0,1 \times P_{tot}$$

II.2.4.6 Calcul de l'alimentation en eau du champ (FWS)

$$.FWS = 1\text{ hectare} \times Irr_{req} \times (100 \times Irr_{eff})$$

Irr_{req} : Irrigation requise (m)

Irr_{eff} : Efficacité de l'irrigation (%)

**PARTIE 3 RESULTATS ET
INTERPRETATIONS**

V. 1 La qualité de la saison pluvieuse dans la région Vakinakaratra

III.1.1 Évolution de la pluviométrie durant la saison de pluie 1961- 2010

Sur les 49 saisons de pluie de l'année d'analyses de la pluviométrie, 26 sont excédentaires c'est –à- dire supérieure à la moyenne entre la saison de pluie depuis les années 1961 au 2010 (soit 53,1%) et 23 sont déficitaires (soit 46,9%).

Cette moyenne s'élève à 1126,23 mm (normale de la période 1961-2010). Le minimum pluviométrique est enregistré durant la période culturelle 1981-1982 avec 99mm et qui représente un déficit de -1027,2mm. Le maximum est enregistré pendant la période culturelle 2008-2009 avec un excédent de 929,5mm par rapport à la moyenne interannuelle.

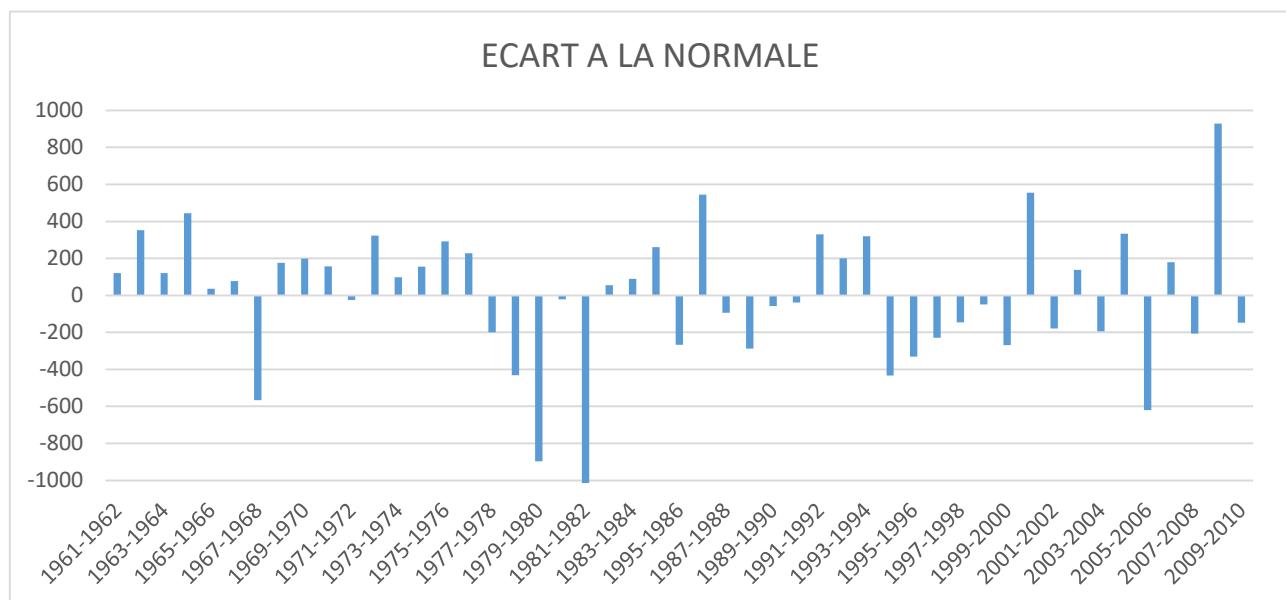


Figure 8: Évolution de la pluviométrie durant la saison de pluie 1961- 2010

Source : Auteur

En ce qui concerne la pluviométrie durant la saison de pluie, dans le contexte de ce climat qui change, on assiste à une forte variabilité entre les saisons de pluie illustrée par la courbe d'évolution de la pluviométrie durant la saison de pluie 1961 à 2010 ci-dessus.

Cette courbe montre la dominance des saisons de pluie humide 1961 à 1977, dont la moyenne pluviométrique est de 1263,2 mm et représentant un excédent moyen de 137 mm par rapport à la moyenne entre les périodes de pluie. Pendant ces 16 saisons de pluie, 14 sont excédentaires et deux saisons seulement sont déficitaires.

Pendant les années 1987 à 2000, on a une alternance avec de séquences moyennes de 3 à 6 saisons de pluie bien distinctes période sèche (1978 à 1982) et humide (1983 à 1985) et très sèche (1988 à 1991) puis humide (1992 à 1994) et sèche (1995 à 2000) avec la plus importante sèche à l'année culturelle 1981-1982.

Mais avec les manifestations des changements climatiques perçus sur nos pays, on peut le voir sur la courbe à partir de l'année 2000 les variabilités interannuelles très marquées qui vont en dents de scie donnant l'impression d'un affolement de notre climat avec la dominance de période sèche.

III.1.2 Évolution du nombre de jours pluvieux

La saison des pluies dure plus longtemps dans la région Vakinakaratra avec le nombre moyen environ 108 jours. Toutefois, la *figure 9* montre une nette tendance à la baisse des jours pluvieux dans cette région durant la période 1961-2010. Cette situation corrobore le déficit pluviométrique observé dans la région depuis la fin des années 1960.

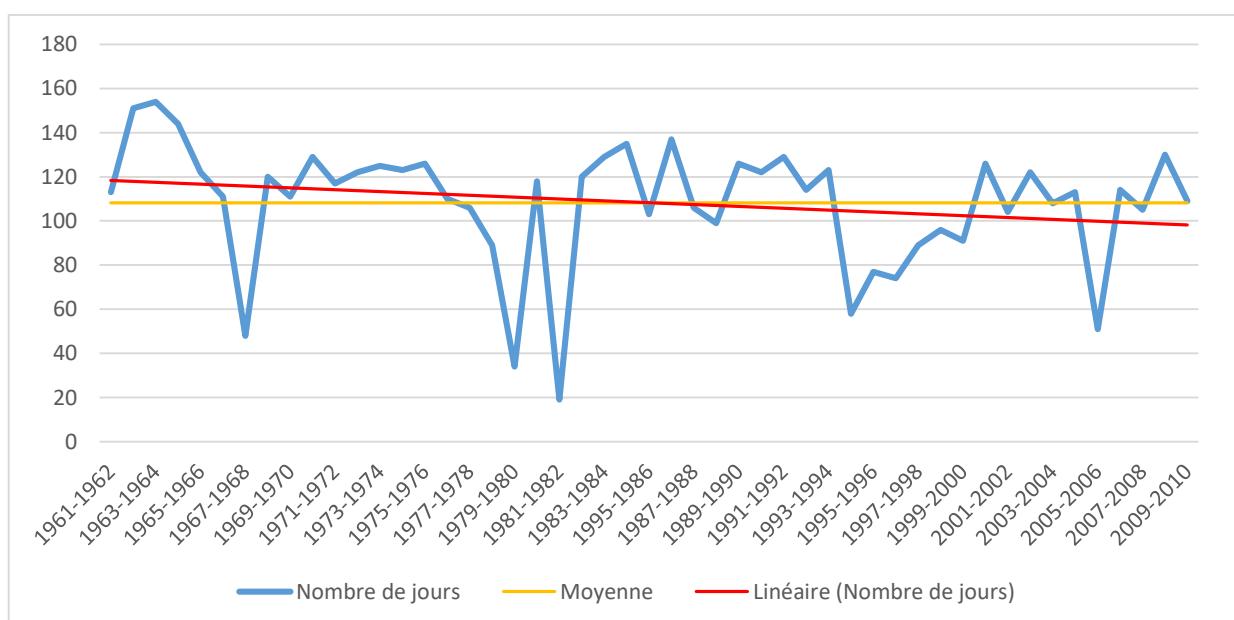


Figure 9: Nombre de jours pluvieux dans la région Vakinakaratra de 1961 à 2010.

Source : Auteur

Tableau 4:Données de la pluviométrie de la région Vakinakaratra (1961-2010)

Années	Nombre de jours	Qté en mm	Années	Nombre de jours	Qté en mm
1961-1962	113	1246,5	1986-1987	137	1670,1
1962-1963	151	1478,8	1987-1988	106	1032,4
1963-1964	154	1247,4	1988-1989	99	839,2
1964-1965	144	1571,0	1989-1990	126	1067,9
1965-1966	122	1162,4	1990-1991	122	1087,5
1966-1967	111	1204,0	1991-1992	129	1457,2
1967-1968	48	559,9	1992-1993	114	1326,2
1968-1969	120	1301,5	1993-1994	123	1445,7
1969-1970	111	1325,0	1994-1995	58	693,3
1970-1971	129	1283,7	1995-1996	77	794,5
1971-1972	117	1102,4	1996-1997	74	897,8
1972-1973	122	1449,1	1997-1998	89	979,8
1973-1974	125	1225,2	1998-1999	96	1077,5
1974-1975	123	1282,2	1999-2000	91	858,3
1975-1976	126	1419,0	2000-2001	126	1680,7
1976-1977	110	1354,2	2001-2002	104	946,9
1977-1978	106	926,1	2002-2003	122	1264,1
1978-1979	89	694,6	2003-2004	108	931,4
1979-1980	34	228,8	2004-2005	113	1460,6
1980-1981	118	1104,7	2005-2006	51	505,8
1981-1982	19	99,0	2006-2007	114	1305,8
1982-1983	120	1181,7	2007-2008	105	919,7
1983-1984	129	1216,6	2008-2009	130	2055,8
1994-1985	135	1386,5	2009-2010	109	978,4
1995-1986	103	858,6			

III.1.3 La durée de la saison des pluies

D'après cette figure, le début moyen (1961-2010) de la saison des pluies dans la région Vakinakaratra varie entre le 4 septembre et le 21 janvier. Et, la série temporelle des dates de fin de la saison pluvieuse calculée sur cette période montre une tendance à la baisse, indiquant que cette saison a tendance à finir plus tôt.

Cette tendance est significative au seuil de 6 % pour l'ensemble de la période. La date moyenne de fin de la saison pluvieuse se situe vers le 25 avril. Les résultats nous permettent de retenir que la durée de la saison de pluies a subi une oscillation entre 115 et 229 jours.

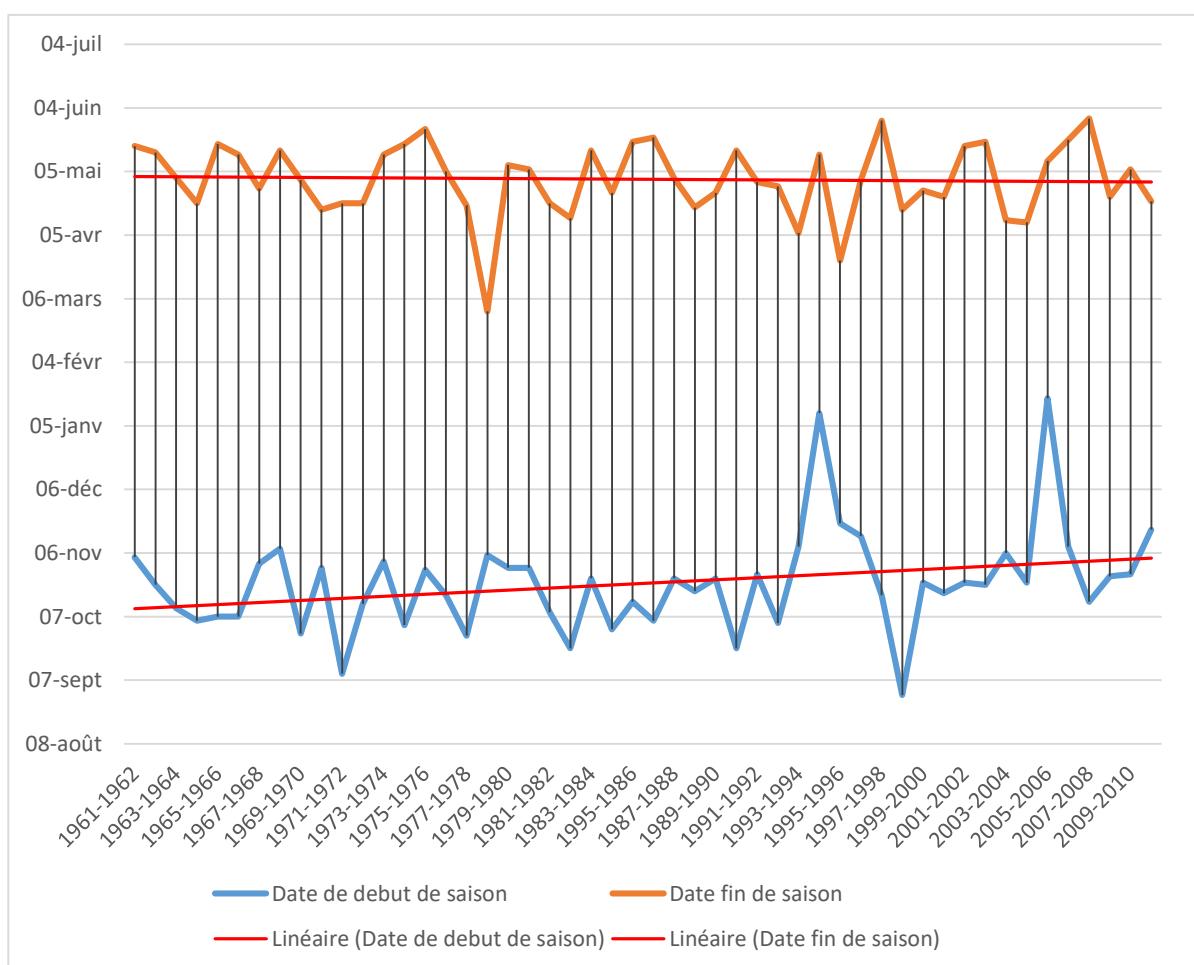


Figure 10: Durée de la saison des pluies de 1961 à 2010 de la région Vakinakaratra

Source : Auteur

L'analyse de la figure 10 fait apparaître un rétrécissement de la durée de la saison des pluies. L'approche fréquentielle de cette longueur de la saison offre un intérêt certain pour la planification des activités agricoles.

En effet, pour minimiser les risques liés au début tardif et à la fin précoce de saison de pluie, les agriculteurs de la région Vakinakaratra peuvent faire correspondre leurs activités agricoles entre la troisième décade de septembre et la troisième décade de décembre. Durant cette période, les risques liés aux aléas climatiques pour les activités agricoles sont moindres.

III.1.4 La distribution des épisodes pluvieux pendant une période culturelle

Compte tenu de la distribution hétérogène des chaque épisode pluvieux EP_n de la région Vakinakaratra obtenue par le traitement de données sur R, nous avons alors dressé la figure 11 qui présente les fréquences des nombres de jours pluvieux et leurs quantités de précipitations respectives sur la période de pluie.

Cette figure présente un intérêt certain car il permet quel que soit la position géographique où l'on se trouve de déterminer la quantité de pluie pouvant tomber selon les durées de 1, 2,..., n jours consécutifs en connaissant la valeur moyenne de la pluie journalière

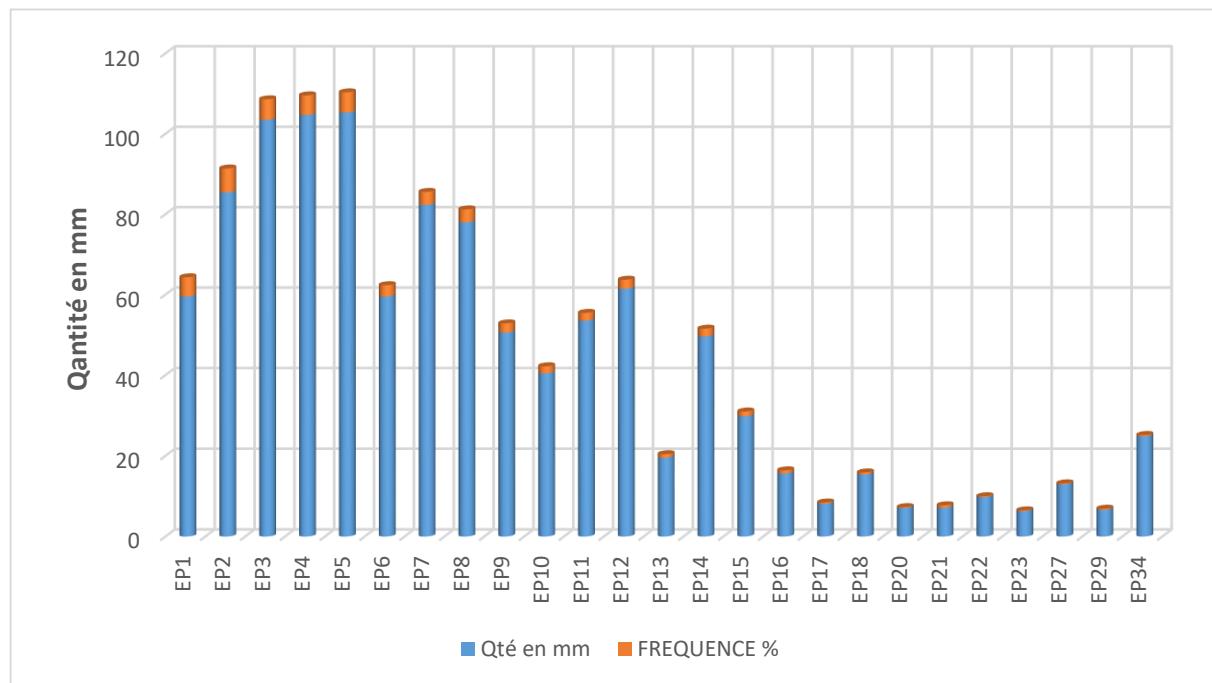


Figure 11:Distribution des épisodes pluvieux de longueur n jours (EPn) d'Antsirabe

Source : Auteur

Pendant une période culturelle, du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril pour notre étude, environ 212 jours, la station d'Antsirabe a 108 jours pluvieux environ en moyenne ou bien 51,1%

de la saison de pluie sont pluvieux dans la station d'Antsirabe avec une quantité moyenne de précipitation de 1126,23 mm.

D'après la méthodologie, la distribution des épisodes pluvieux durant la période de pluie peut classifier en quatre catégories. Il s'agit des épisodes pluvieux moins 5 jours, 6 à 9jours, 10 à 16 jours, et supérieur à 16jours.

III.1.4.1 Épisodes pluvieux moins 5 jours

C'est le type d'épisodes pluvieux les plus fréquents au cours de la campagne. Leurs distributions sont comme le suivant :

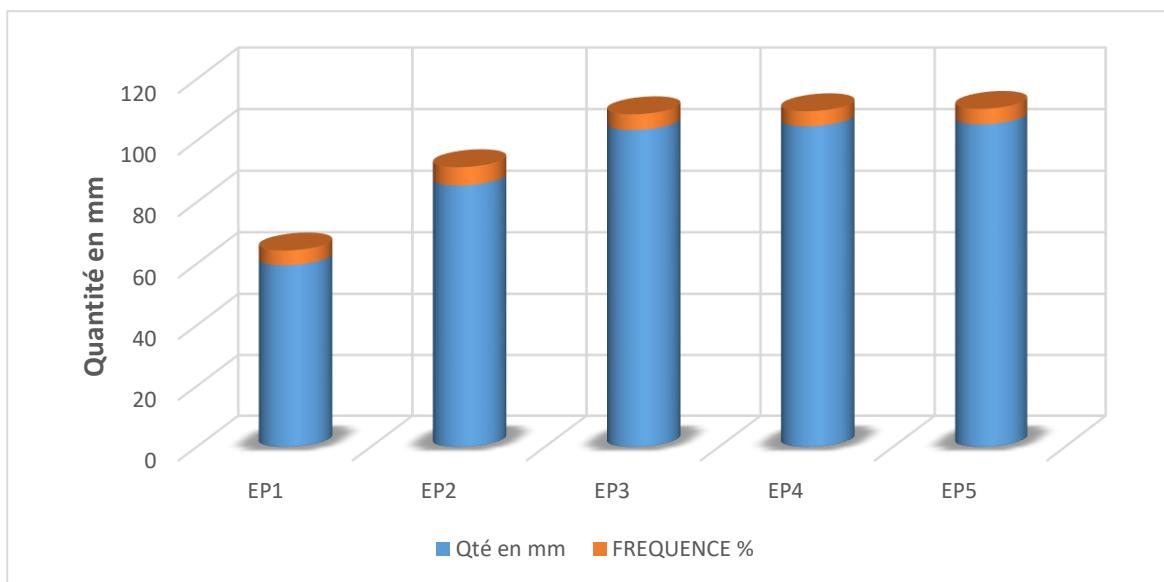


Figure 12: Diagramme des épisodes pluvieux mois 5 jours

- L'épisode pluvieux de longueur $n = 1$ jour (EP1) a une fréquence de 4,78 % de la période culturelle avec une quantité de pluie de 59,5 mm.
- L'épisode pluvieux de 2 jours successifs (EP2) a une fréquence de 5,96 % de la période culturelle avec une quantité de pluie environ de 85,42 mm.
- L'épisode pluvieux de trois jours successifs (EP3) a une fréquence de 5,10 % de la période culturelle avec une quantité de pluie environ de 103,46 mm.
- L'épisode pluvieux de quatre jours successifs (EP4) a une fréquence de 4,87 % de la période culturelle avec une quantité de pluie environ de 104,67 mm.
- L'épisode pluvieux de cinq jours successifs (EP5) a une fréquence de 5,01% de la période culturelle avec une quantité de pluie environ de 105,3 mm.

III.1.4.2 Épisodes pluvieux 6 à 9jours

La fréquence des épisodes pluvieux entre 6 à 9 jours varie entre 0,26 et 0,47 %. Leurs distributions sont comme le suivant :

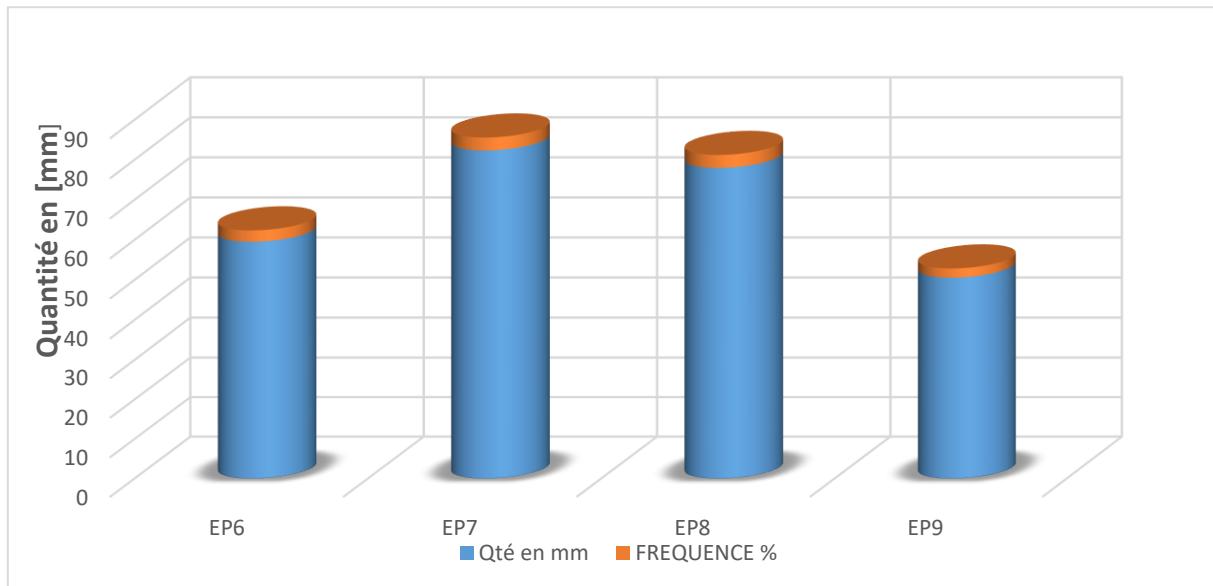


Figure 13:Diagramme des épisodes pluvieux 6 à 9jours

- L'épisode pluvieux de longueur $n = 6$ jours (EP6) occupe une fréquence de 2,83 % de la période culturelle avec une quantité de pluie de 59,5 mm.
- L'épisode pluvieux de 7 jours successifs (EP7) occupe une fréquence de 3,23 % de la période culturelle avec une quantité de pluie environ de 82,3 mm.
- L'épisode pluvieux de 8 jours successifs (EP8) occupe une fréquence de 3,22 % de la période culturelle avec une quantité de pluie environ de 77,9 mm.
- L'épisode pluvieux de 9 jours successifs (EP9) occupe une fréquence de 2,30 % de la période culturelle avec une quantité de pluie environ de 50,55 mm.

III.1.4.3 Épisodes pluvieux 10 à 16 jours

La fréquence des épisodes pluvieux entre 10 à 16 jours varie entre 0,19 et 0,08 %.

Leurs distributions sont comme le suivant :

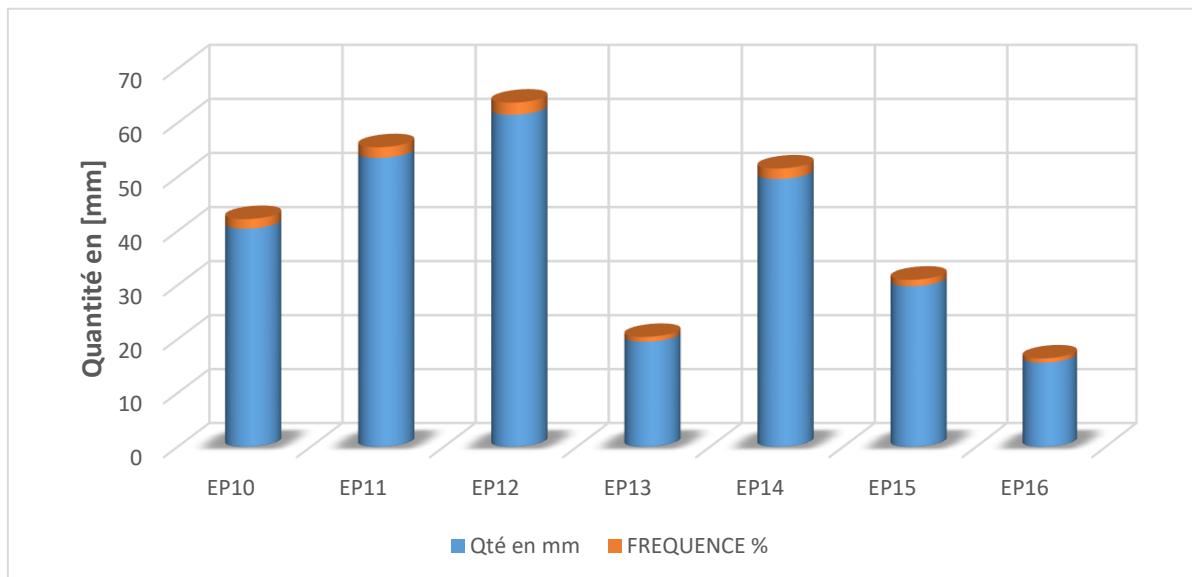


Figure 14:Diagramme des épisodes pluvieux 10 à 16 jours

- L'épisode pluvieux de longueur $n = 10$ jours (EP10) a une fréquence de 1,77 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 40,4 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 11$ jours (EP11) a une fréquence de 1,75 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 53,5 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 12$ jours (EP12) a une fréquence de 2,24 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 61,4 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 13$ jours (EP13) a une fréquence de 0,89 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 19,5 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 14$ jours (EP14) a une fréquence de 1,93 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 49,6 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 15$ jours (EP15) a une fréquence de 1,18 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 29,7 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 16$ jours (EP16) a une fréquence de 0,79 de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 15,6 mm.

III.1.4.4 Épisodes pluvieux supérieurs à 16jours

La fréquence des épisodes pluvieux supérieurs à 16jours varie entre 0,2 et 0,6 %. Ces fréquences sont faibles ; leurs distributions sont comme le suivant :

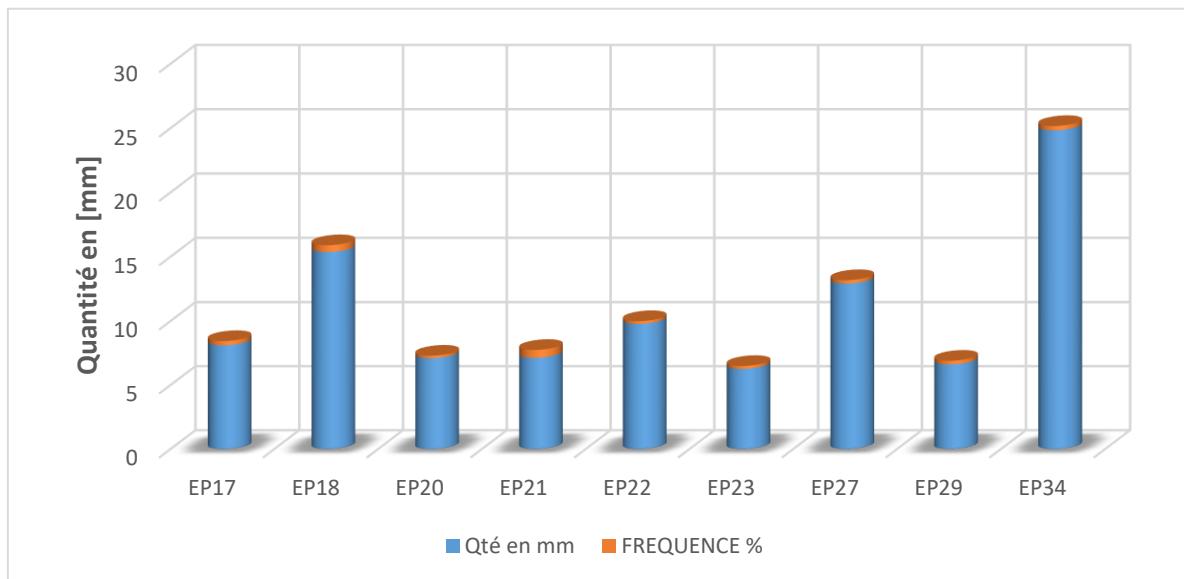


Figure 15:Diagramme des épisodes pluvieux supérieur à 16jours

- L'épisode pluvieux de longueur $n = 17$ jours (EP17) a une fréquence de 0,33 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 8,09 mm.
- Les épisodes pluvieux de longueur $n = 18$ jours (EP18) ont des fréquences de 0,03 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 15,35 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 20$ jours (EP20) a une fréquence de 0,20 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 7,08 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 21$ jours (EP21) a une fréquence de 0,62 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 7,11 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 22$ jours (EP22) a une fréquence de 0,22 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 9,76 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 23$ jours (EP23) a une fréquence de 0,23 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 6,26 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 27$ jours (EP27) a une fréquence de 0,27 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 12,90 mm.
- L'épisode pluvieux de longueur $n = 29$ jours (EP29) a une fréquence de 0,28 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 6,61 mm.

- Les épisodes pluvieux, EP34 a des fréquences de 0,33 % de la période culturelle avec une quantité moyenne de pluie de 24,82mm.

III.1.5 Evolution de l'intensité des épisodes pluvieux

Cette figure 16 montre la fréquence de chaque catégorie des épisodes pluvieux et leurs quantités respectives.

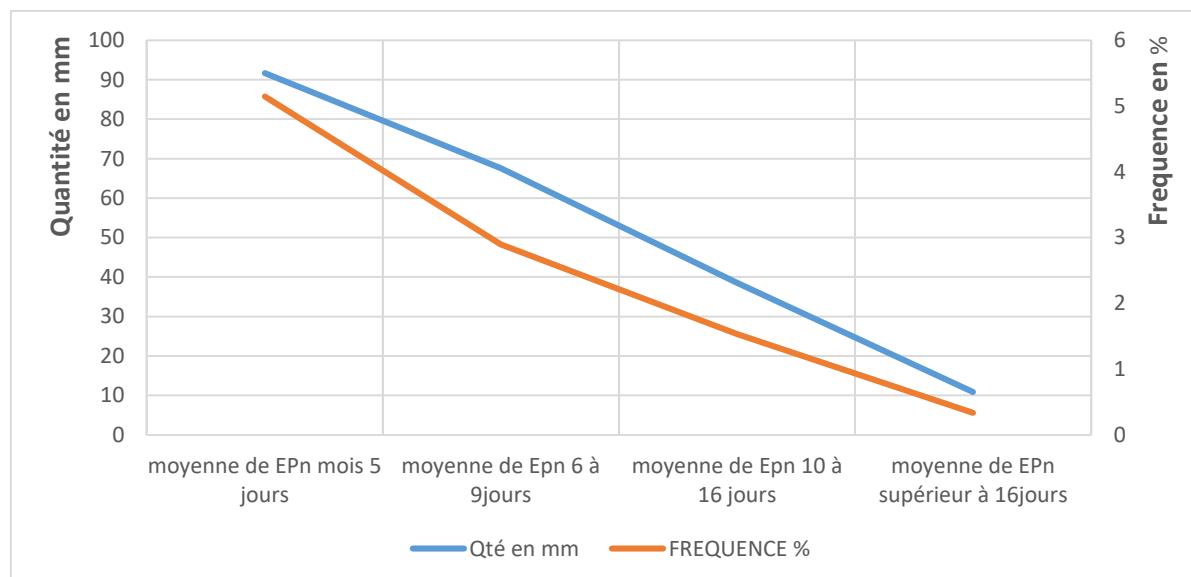


Figure 16: Rapport de quantité de pluie et la fréquence entre chaque catégorie des épisodes pluvieux

On peut donc constater sur ce graphique que les épisodes pluvieux de courte durée (inférieur de 5 jours et entre 6 et 9 jours) sont les plus fréquents. En effet, la fréquence des épisodes de moins 5 jours est 25,73 %; et celle de 6 à 9 jours oscille autour de 11,58 %. La fréquence des autres catégories de périodes pluvieuses reste faible 10,74% (EP9 à EP16) et 3,01 %(supérieur à EP16). Les fréquences des épisodes pluvieux prolongées sont donc quasiment faibles au niveau de la région Vakinakaratra.

V. 2 Besoin en eau de la pomme de terre

On rappelle qu'il existe trois types de cycle pour la période de plantation de pomme de terre, dans cette étude on choisit le cycle dit de saison. On prend la troisième décade du mois de septembre « 21 septembre » comme la date de semis de la pomme de terre, ce choix dépend le calendrier cultural de la pomme de terre dans la région de Vakinankaratra (**I.4.2**).

III.2.1 Calcul de l'Évapotranspiration et rayonnement global

III.2.1.1 Calcul de l'Évapotranspiration

Les valeurs d'ETo présentées dans la Fig. 17 ci-dessous sont fournies par le logiciel CROPWAT 8.0. Ces données montrent les données mensuelles d'ETO, calculé automatiquement d'après l'insertion des données climatiques moyennes (température, vitesse du vent, humidité relative de l'air et durée d'ensoleillement) sur la table de calcul de l'évapotranspiration.

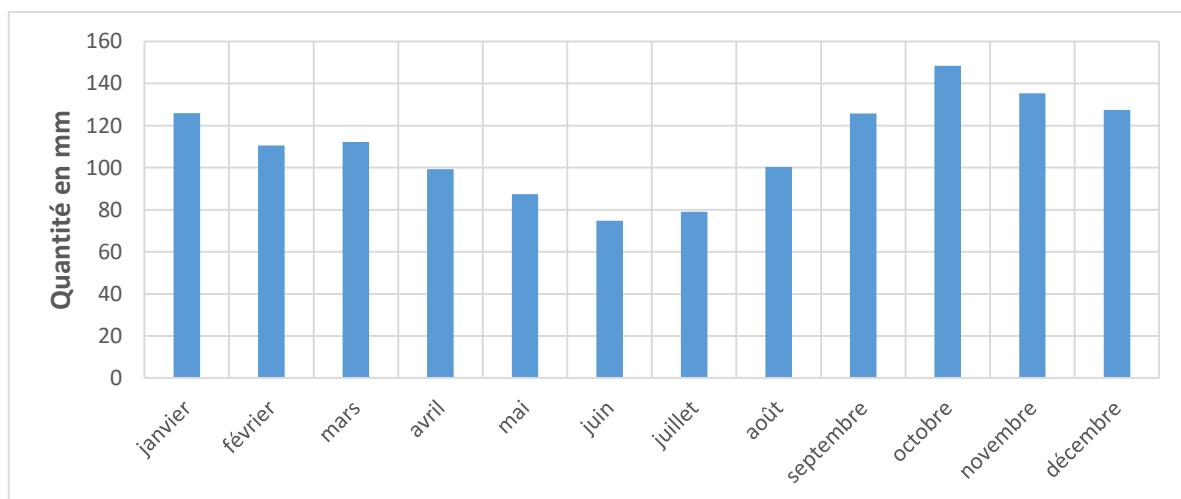


Figure 17: Histogramme d'évapotranspiration de référence mensuel calculé à partir du modèle CROPWAT dans la région Vakinakaratra

La valeur moyenne de l'évapotranspiration de référence (ETo) calculée par ce modèle dans une année est de 1326,45 mm. La valeur minimale qui se trouve au mois de juin est de 74,83 mm et la valeur maximale qui se trouve au mois de l'Octobre est de 148,39 mm.

Pendant la saison chaude à partir du mois du Septembre jusqu'au mois d'Avril, l'évapotranspiration de référence est élevée. Et, la saison froide Mai à Août cette valeur est diminuée.

III.2.1.2 Comparaison entre l'ETo calculée par ce modèle et l'ETo observée

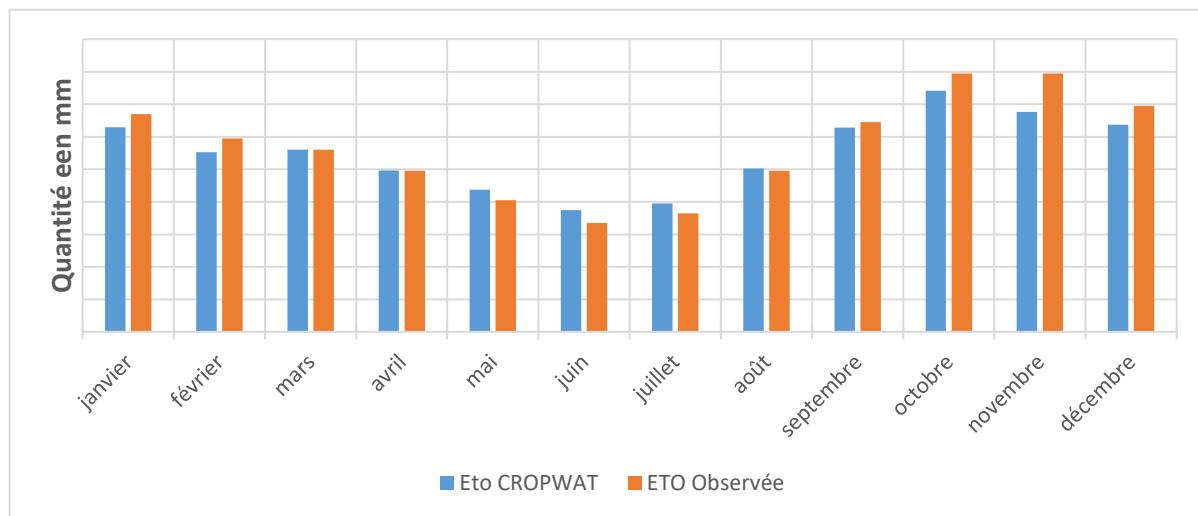


Figure 18: Histogramme d'ETo calculée par ce modèle et ETo observée dans la région Vakinakaratra

Source : Auteur

Cette figure montre une ressemblance entre d'ETo calculée par le modèle CROPWAT et d'ETo observée dans la région Vakinakaratra. Dans notre étude, on utilise la donnée décadaire d'ETo calculée par le modèle CROPMAT pour permettre de calculer le besoin moyen en eau de culture.

III.2.1.3 Rayonnement global

La figure ci-dessous montre la valeur de rayonnement globale mensuelle moyenne pendant le cycle cultural dans la région de Vakinankaratra à partir des résultats obtenus par ce modèle.

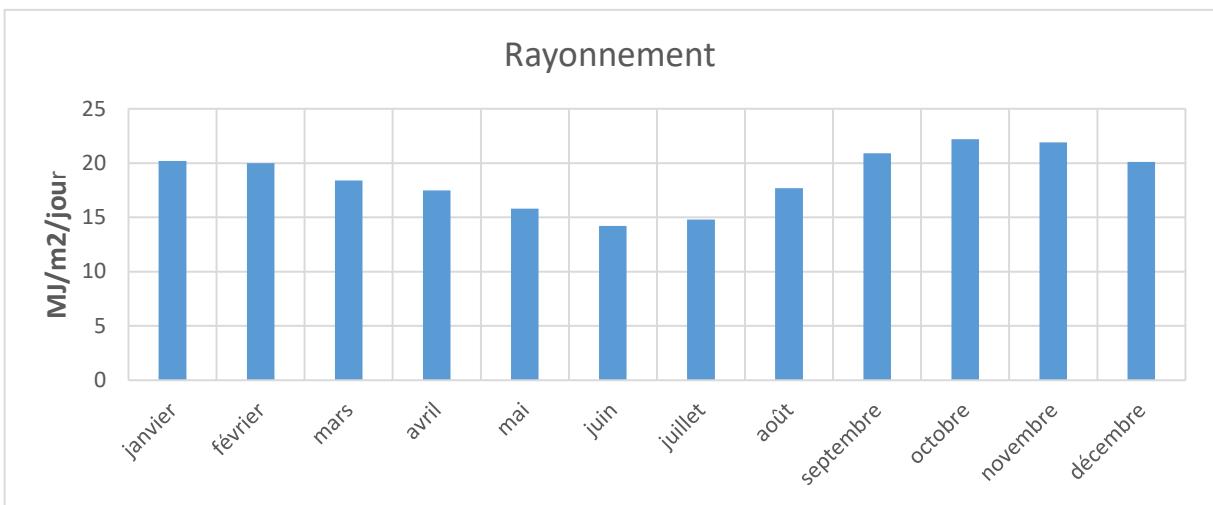


Figure 19: Rayonnement global pendant le cycle cultural

La valeur moyenne journalière du rayonnement dans cette région est de 18,6 MJ/m²/jour pendant un cycle cultural. La valeur maximale qui se situe au mois d'Octobre est de 22.2MJ/m²/jour et la valeur minimale qui se situe au mois de Juin est de 14.2 MJ/m²/jour.

La variation de rayonnement global pendant le cycle cultural est équivalente à la variation d'évapotranspiration de référence c'est-à-dire, si on augmente l'évapotranspiration de référence, le rayonnement global est augmenté aussi.

III.2.1.4 Calcul des pluies efficaces

La totalité des précipitations n'est pas disponible pour les cultures puisqu'une partie est perdue par ruissellement et percolation en profondeur. Le CROPWAT propose plusieurs modèles de calcul de la pluie efficace qui sont détaillés dans le Bulletin FAO-25, nous avons choisi de travailler avec la méthode l'USDA pour tenir compte cette partie de pluie perdue.

Ces valeurs des pluies efficaces présentées ci-dessous (Fig. 20) montrent les données fournies par le logiciel CROPWAT 8.0 dans le district Antsirabe-I de la région du Vakinakaratra.

Précipitations par décade - untitled								
Station	Méthode Précipitations eff.				Méthode USDA S.C.			
	Pluie	Pluie eff.	Pluie	Pluie eff.	Pluie	Pluie eff.	Pluie	Pluie eff.
	Dec 1	Dec 1	Dec 2	Dec 2	Dec 3	Dec 3	Mois	Mois
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Janvier	74.1	47.7	89.9	50.7	99.3	51.6	263.3	150.0
Février	95.0	51.2	73.8	47.7	63.1	44.0	231.9	142.8
Mars	60.3	42.8	58.2	41.9	57.0	41.4	175.5	126.2
Avril	43.6	34.5	30.3	25.9	21.4	19.2	95.3	79.6
Mai	9.9	9.4	10.1	9.6	6.0	5.8	26.0	24.9
Juin	4.2	4.1	2.2	2.2	2.6	2.6	9.0	8.9
Juillet	3.9	3.8	3.8	3.7	4.5	4.4	12.2	12.0
Août	2.8	2.8	6.4	6.2	1.7	1.7	10.9	10.7
Septembre	3.8	3.7	5.9	5.7	7.1	6.9	16.8	16.3
Octobre	19.6	17.8	25.3	22.2	40.3	32.5	85.2	72.5
Novembre	45.6	35.6	52.2	39.1	48.4	37.2	146.2	111.9
Décembre	66.1	45.1	77.7	48.7	77.9	48.8	221.7	142.6
Total							1294.0	898.2

Figure 20: Données efficaces fournies par le logiciel CROPWAT 8.0 dans le district Antsirabe-I de la région du Vakinakaratra

Pour les productions agricoles, les précipitations efficaces se réfèrent à la part des précipitations qui peuvent être utilisées par les plantes. Dans le district ANTSIRABE, la pluie

efficace est relativement faible, néanmoins une estimation fut faite par soucis de précision dans la consommation totale d'eau.

La figure 21 suivante indique l'histogramme des résultats des précipitations efficaces par décades à partir du modèle CROPWAT sur la feuille Microsoft Excel.

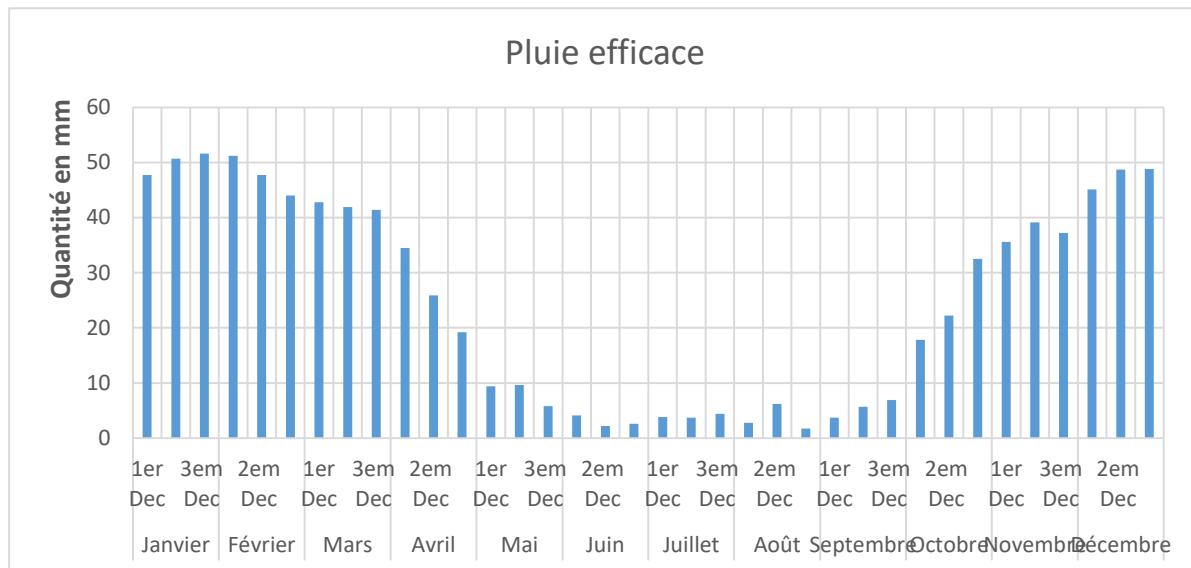


Figure 21: pluie efficace de la région Vakinakaratra, station Antsirabe.

L'analyse de cette figure montre que durant le mois de janvier aux fins de mois d'avril, la quantité de pluie efficace est augmentée, elle s'atténue au mois de mai jusqu'au septembre, et après le mois de Septembre cette courbe remonte.

La valeur totale des précipitations efficaces pendant une année dans la région de Vakinankaratra est de 891mm. La valeur maximale se trouve à la troisième décade du mois de Janvier avec la valeur de 51.6 mm et la valeur minimale se trouve à la troisième décade du mois d'Août avec la valeur de 1.7mm.

III.2.2 Besoin en eau des cultures de la pomme de terre

Après les résultats des précipitations efficaces, les besoins moyens en eau des cultures représentent le troisième résultat obtenu à partir du modèle CROPWAT 8.0. La figure suivante montre le troisième résultat obtenu à partir de ce modèle.

Besoins en eau des cultures							
Station ETo	ANTSIRABE ECL		Culture	Potato			
Station Pluie	ANTSIRABE ECOLE		Date de plantation	21/09			
Mois	Décade	Phase	Kc	ETc	ETc	Pluie eff.	Bes. Irr.
Sep	3	Init	0.50	2.20	22.0	8.4	13.5
Oct	1	Init	0.50	2.29	22.9	18.1	4.9
Oct	2	Crois	0.53	2.55	25.5	25.4	0.1
Oct	3	Crois	0.74	3.48	38.3	28.9	9.4
Nov	1	Crois	0.97	4.47	44.7	31.8	12.9
Nov	2	Mi-sais	1.15	5.17	51.7	35.6	16.0
Nov	3	Mi-sais	1.16	5.07	50.7	40.0	10.7
Déc	1	Mi-sais	1.16	4.92	49.2	45.3	3.9
Déc	2	Mi-sais	1.16	4.76	47.6	50.0	0.0
Déc	3	Arr-sais	1.15	4.73	52.0	50.7	1.3
Jan	1	Arr-sais	1.06	4.30	43.0	51.7	0.0
Jan	2	Arr-sais	0.92	3.73	37.3	53.1	0.0
Jan	3	Arr-sais	0.79	3.19	25.6	37.5	0.0
					510.4	476.4	72.8

Figure 22:Besoin moyen en eau des cultures

Source : Auteur

D'après le traitement de données de besoin en eau obtenue par le logiciel CROPWAT sur la feuille d'Excel, on a les courbes suivantes qui montrent le besoin en eau de la pomme de terre dans la région Vakinakaratra.

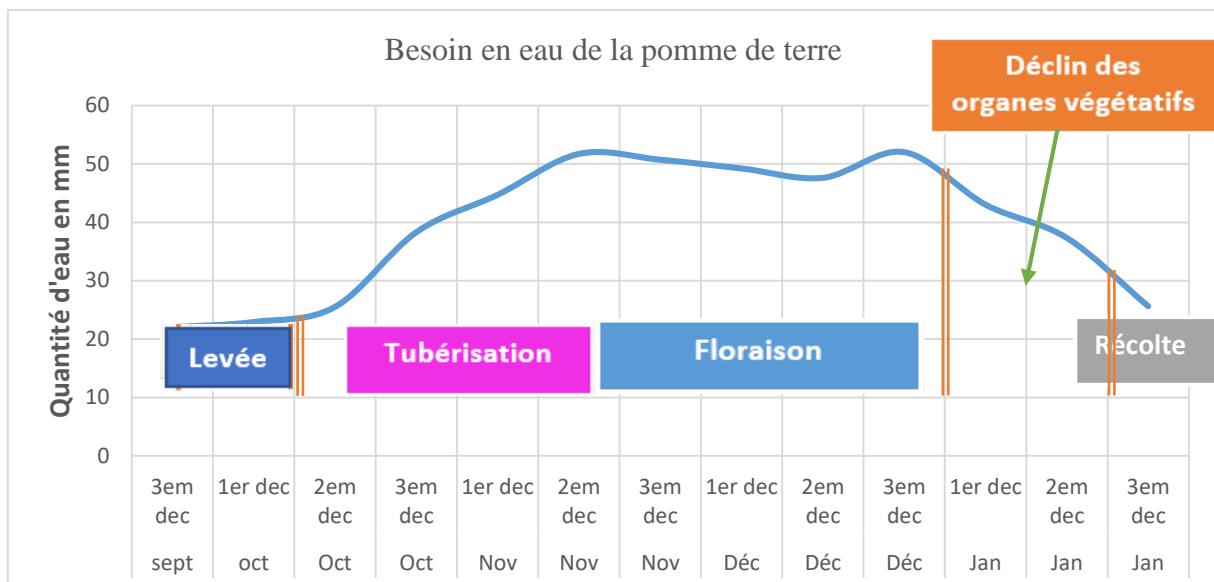


Figure 23: besoin en de la pomme de terre Vakinakaratra

Source : Auteur

Une analyse de cette courbe du besoin en eau de la pomme de terre, montre que durant la première phase ou la phase de levée, qui a duré environ 20 jours, entre le 3^{ème} décade de septembre et 1^{ère} décade d'octobre. Le besoin en eau n'est pas important.

Et, à partir de 2^{ème} décade de mois d'octobre jusqu'aux 3^{ème} décade de mois de décembre, les besoins en eau sont très importants. Ces périodes disent la phase Tubérisation et la phase de Floraison. Pendant ceux deux phases les tubercules sont commencées à augmenter et les tiges aériennes ont atteint leur hauteur définitive, les fleurs apparaissent et se transforment en fruits.

La courbe diminue à la 1^{er} décade de mois de janvier jusqu'à la récolte de pomme de terre. À ces phases, l'appareil végétatif de la plante est déjà formé bien avant le grossissement des tubercules, donc la pomme de terre ne besoin beaucoup d'eau.

D'après cette analyse, on estime que durant la phase de levée la quantité d'eau utile de la pomme de terre est environ 44,9 mm, pendant la phase de tubérisation et la phase de floraison la quantité utile pour cette plante est environ 334,2 mm.

Et pendant la phase de déclin des organes végétatifs et à la période de récolte, le besoin en de pomme de terre a estimé environ 105,9 mm. Donc, la pomme de terre besoin 510,4 mm d'eau depuis la plantation jusqu'à la récolte.

III.2.3 Besoin d'irrigation de la pomme de terre

Le calendrier irrigation aide les producteurs pour la gestion de l'eau ou le programme d'irrigation à fin d'éviter l'excès ou l'insuffisance de l'eau. Ces deux cas ont des effets négatifs sur la vie de la plante et surtout sur le rendement aux périodes de récolte.

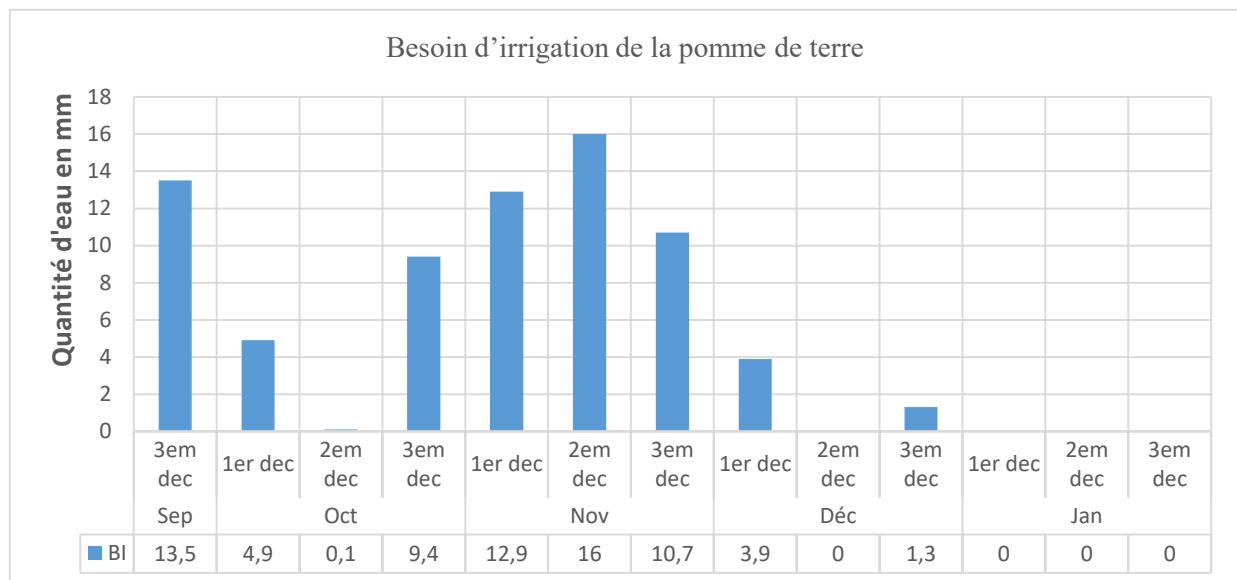


Figure 24: Diagramme de besoin d'irrigation de district de Vakinakaratra

La valeur totale de besoin moyen d'irrigation pendant le cycle cultural de la pomme de terre est de 72,8mm. La pratique d'irrigation de culture de la pomme de terre dans la région de Vakinankaratra commence au premier jour de plantation jusqu'à 3ème décade du mois de décembre sauf la 1ere décade d'octobre et 2em décade de décembre.

Le besoin d'irrigation de la culture de pomme de terre pendant la phase de levée est de 18,5 mm. Donc on peut dire que les deux premières décades ou la phase de levée, la pomme de terre besoin 18,5 litres de l'eau par un mètre carré de partielle par décade.

Le besoin d'irrigation de la culture de la pomme de terre pendant la phase de tubérisation et floraison est de 54,2 mm. Il varie entre 1.3 et 16 mm par décade. L'irrigation est très importante durant ces phases.

Pendant les phases de déclin des organes végétatifs jusqu'à la récolte, le besoin d'irrigation de la culture de la pomme de terre n'est pas important.

Chapitre VI Impacte de la distribution des épisodes pluvieux sur la production de la pomme de terre

VI. 1 Étude de bilan hydrique

III.1.1 Analyse agro climatique de la région Vakinakaratra

L'humidité, la température et la lumière sont les principaux éléments de l'environnement physique qui agissent sur la vie de la culture et leur croissance.

Afin de pouvoir déterminer à quel point les besoins en eau sont satisfaits, il faut étudier le bilan hydrique de la région choisi.

La figure 25 suivante peut déterminer le début de la saison cultural par rapport à la précipitation normale et l'ETP :

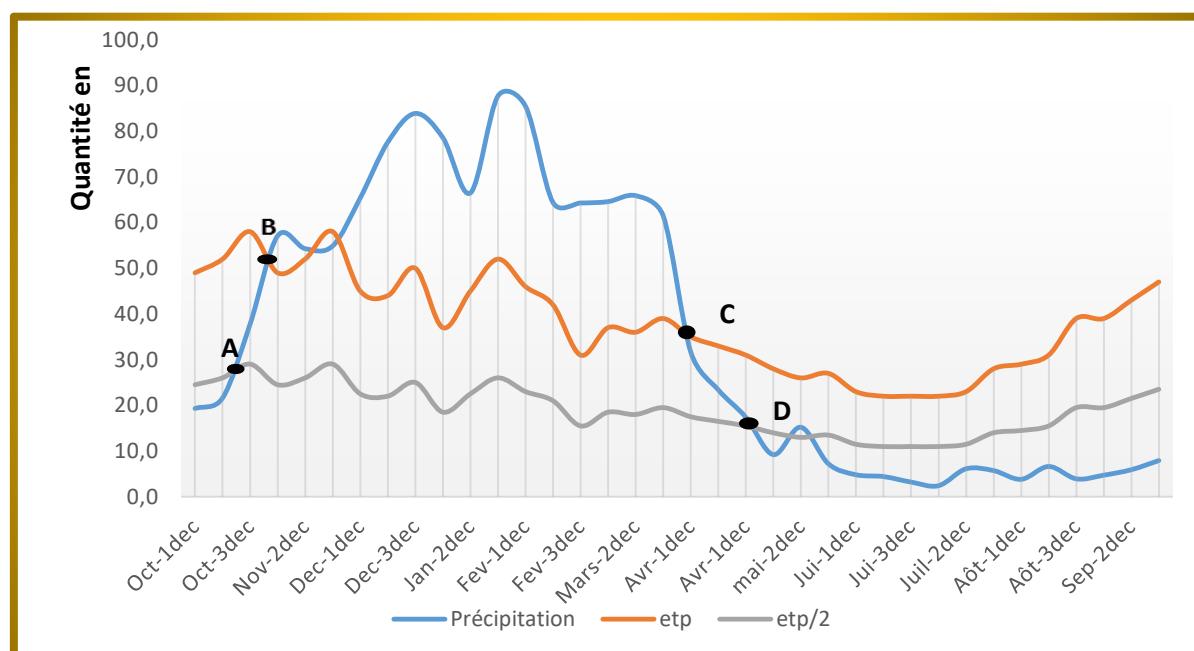


Figure 25: Le bilan hydrique de Vakinakaratra

Source : Auteur

A-B : près-humide

B-C : humide

C-D : poste-humide

Ce modèle théorique de découpage de la saison humide d'après ses événements majeurs s'interprète bien en termes d'agronomie :

- « Période pré-humide » : la période de la préparation du sol et période de semis.
- « Période humide » : période culturelle.
- « Période poste humide » période de la récolte.

Ce bilan montre que la période de la préparation du sol et plantation de la culture dans la région du Vakinakaratra est environ entre la mi-octobre jusqu'au début de mois décembre.

III.1.2 Besoin en eau par rapport à la précipitation

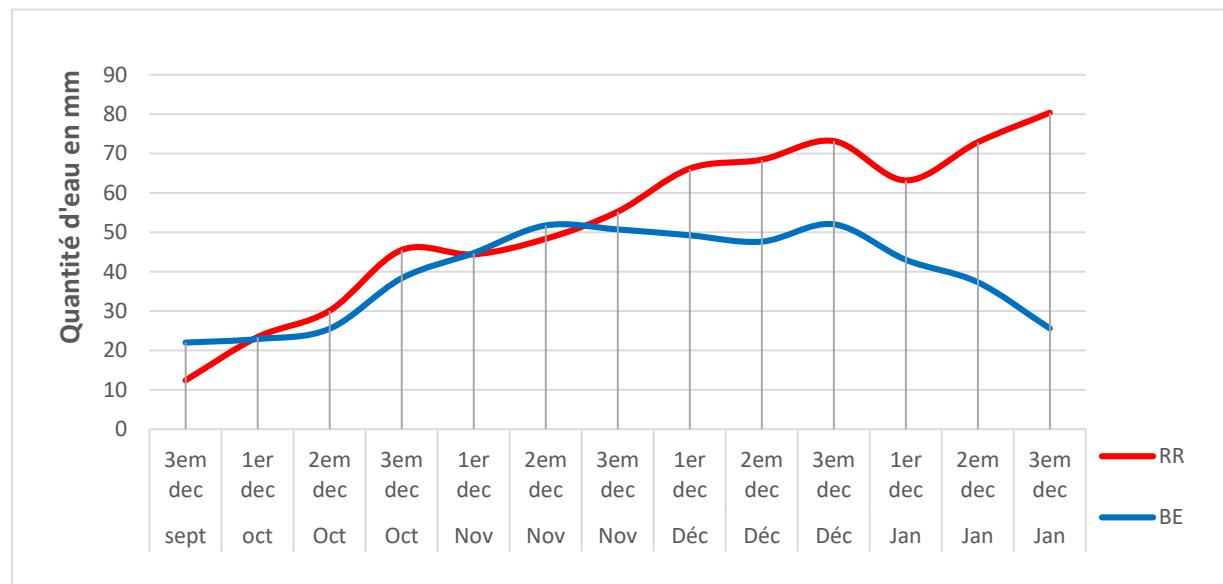


Figure 26 : Le rapport entre la précipitation moyenne dans la région Vakinakaratra et le besoin en eau de la pomme de terre

Source : Auteur

La rareté et l'abondance des pluies ont des conséquences non négligeables sur le rendement agricole. Depuis quelques années, on assiste à une instabilité de cette pluviométrie avec des conséquences néfastes sur les changements climatiques entraînant de ce fait une désorganisation du calendrier agricole et une baisse du rendement. Une bonne maîtrise et une bonne gestion de la ressource disponible en eau donc devaient être le remède à cette situation.

La figure 26 montre que la quantité de la précipitation moyenne durant une saison agricole est environ 682,8mm. Cette valeur reste très abondante par rapport à la quantité d'eau utilisée pour la croissance de la pomme de terre (510,5 mm). En générale, ce qui indique que l'apport de l'irrigation n'est pas nécessaire pour stabiliser la production.

Pour analyser bien cette figure : nous voyons que durant la première à la deuxième décade du mois de Novembre, la courbe bleue est au-dessous de la courbe rouge. Ce qui exprime que la précipitation ne comble pas le besoin en eau de la pomme de terre pendant ceux jours. Et le reste, la courbe bleue est au-dessus de la courbe rouge, ce qui expose que la pluie est satisfaite et peut être surmonté au besoin de la pomme de terre.

On rappelle que la courbe bleue représente la précipitation moyenne et la courbe rouge dessine le besoin en eau de la pomme de terre durant chaque phase de croissance. Alors, pendant que la courbe bleue est au-dessous de la courbe rouge, il faut faire l'irrigation sur cette culture parce qu'on a un déficit hydrique.

Néanmoins, l'abondance de pluie peut être entraînée la destruction ou le pourrissement du tubercule de la pomme de terre. Ici, la précipitation moyenne est très abondante par rapport au besoin en eau de cette culture, donc, les cultivateurs devaient faire le drainage ou l'assainissement de vos parties pour y avoir des bonnes productions. Même s'il y a une irrigation, le drainage s'occupe la grande partie pendant cette année.

VI. 2 La situation initiale de la pomme de terre de la région Vakinakaratra

Les changements climatiques constituent une des grandes préoccupations du monde aujourd’hui non seulement du fait de leurs impacts potentiels sur l’environnement, mais aussi pour leurs effets négatifs sur la production agricole.

L’effet des changements climatiques est ressenti dans la région Vakinakaratra. Dans cette région, on assiste depuis des années un déséquilibre important des précipitations et dessèchement des cours d’eau.

Il faut noter que dans la région Vakinakaratra, les cultivateurs cultivent principalement le riz, la carotte, et la pomme de terre. Cette région est le premier producteur de pomme de terre à Madagascar. Cette courbe ci-dessous montre la variation de la production de pomme de terre et le rendement dans cette région.

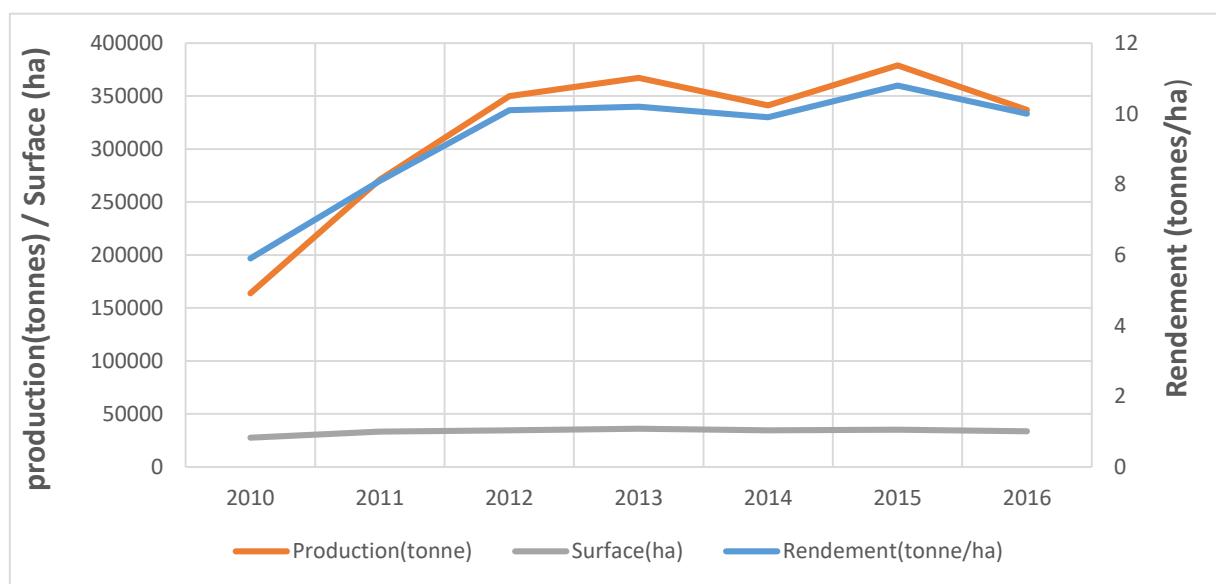


Figure 27: Variation de la production de la pomme de terre dans la région Vakinakaratra

Cette figure montre une bonne relance de production de la pomme de terre dans la région Vakinakaratra. Ainsi, pour l’année 2010 à 2016 le rendement de production est toujours augmenté.

Dans la région Vakinaratra, la variation de surface cultivée est très faible, la culture de pomme de terre est bien relancée selon la technique culturale et la répartition des épisodes pluvieux dans cette région. Nous allons voir une répartition des épisodes pluvieux de l'année culturelle 2009/2010 pour l'année de mauvaise production et 2014/2015 pour l'année de bonne production.

III.2.1 Répartition des épisodes pluvieux et la culture de la pomme de terre en 2009/2010 dans la région Vakinakaratra

Pour la période culturelle de la pomme de terre 2009/2010 qui dure environ 212 jours, le nombre de jours pluvieux est de 91 jours avec une quantité de pluie de 978,4 mm qui sont répartis comme suit :

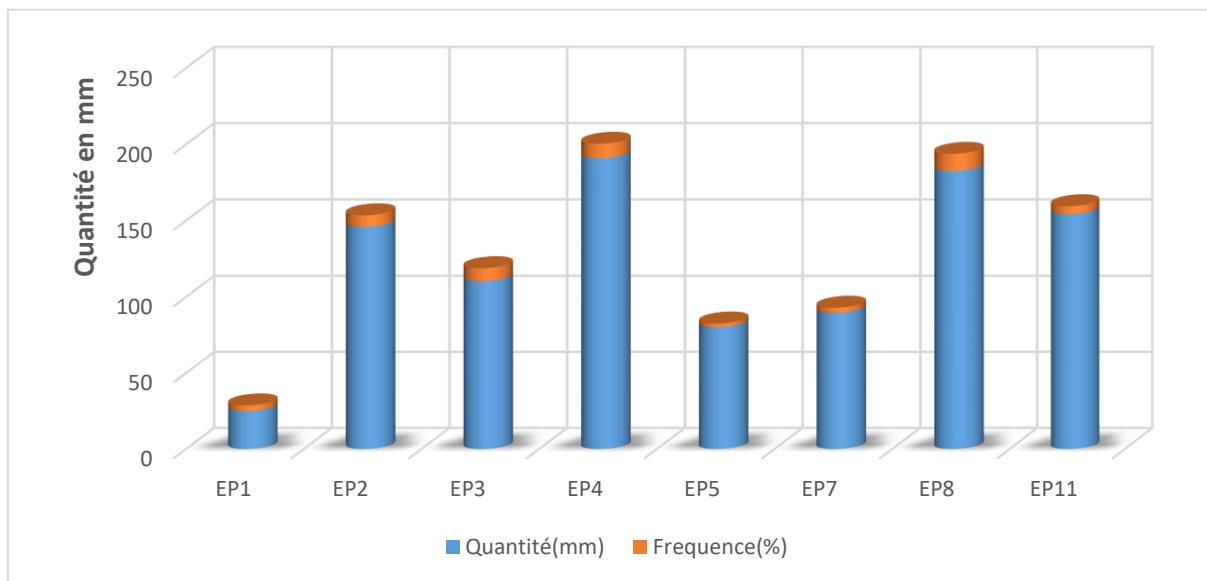


Figure 28:Distribution des épisodes pluvieux de longueur n jours (EPn) d'Antsirabe durant la période culturelle 2009/2010

Source : Auteur

L'analyse de cette figure montre que 42% de la saison de pluie sont de jours qu'on a des quantités de précipitation telle que : Huit épisodes pluvieux de longueur $n = 1$ jour (EP1) avec une quantité de pluie de 24,9 mm, huit épisodes pluvieux de deux jours successifs avec une quantité de pluie environ de 145,9mm, six épisodes pluvieux de trois jours successifs avec une quantité de pluie environ de 110,3 mm, cinq EP4 avec une quantité de pluie 190,9mm, un EP7 avec une quantité de pluie 89,6mm, trois EP8 avec une quantité de pluie 1824mm et un EP11 avec une quantité de pluie 154,2mm.

La figure 29 ci-dessous montre l'évolution de la durée des jours de pluie de chaque décade après la plantation de la pomme de terre au niveau de la station d'Antsirabe et la quantité de précipitation et leur besoin en eau de cette culture pendant la saison culturelle 2009/ 2010.

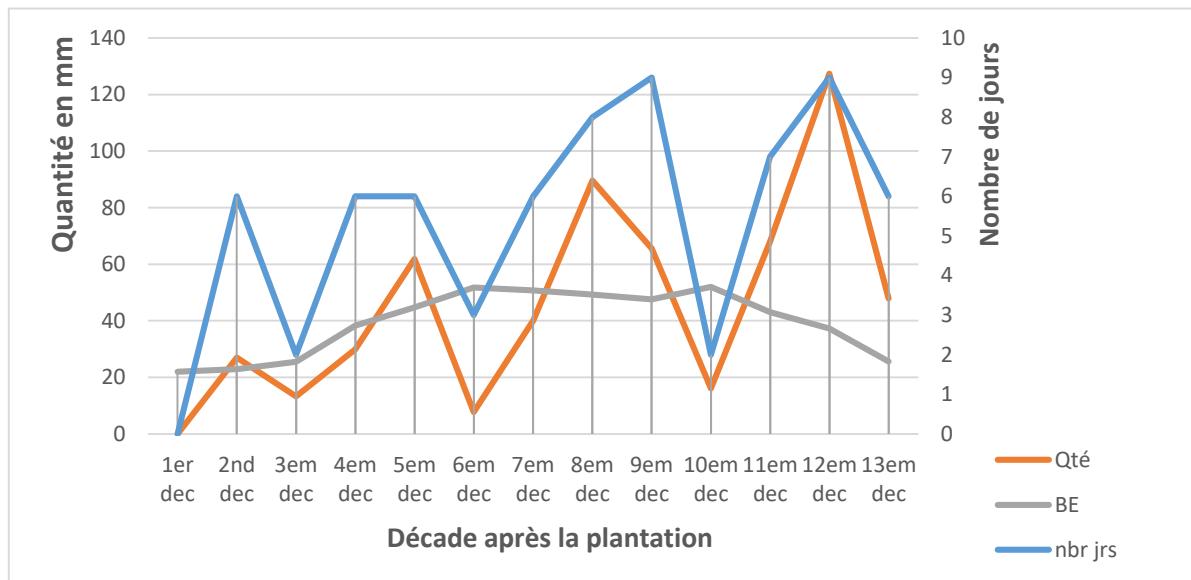


Figure 29:Rapport de la précipitation et le besoin en eau et le nombre de jours de pluie après le semis durant la période culturelle 2009/2010

Source : Auteur

L'analyse de cette courbe montre l'anomalie de la précipitation durant cette période culturelle. Le nombre de jours de pluie par décade atteinte 9 jours, mais la quantité de pluie ne le correspond pas c'est-à-dire il y a beaucoup de jours de pluie, mais la quantité est faible.

Et, durant le 3ème à 7ème décade, la quantité de précipitation ne comble pas le besoin en eau de la pomme de terre, mais durant ces décades la tige souterraine est apparue et le tubercule commence à grossir, alors le besoin en eau est très important pour leurs formations. Cette situation peut provoquer la diminution de rendement dans cette année.

Ainsi, la quantité de pluie durant cette période sont concentrées au 12em décade ou pendant la phase de déclin des organes végétatifs, la quantité de pluie atteint 127,4mm. Mais pendant cette phase la pomme de terre ne besoin beaucoup d'eau. Alors cette augmentation de quantité de pluie peut entraîner le risque de la diminution de rendement de la production de pomme de terre durant la période culturelle 2009/2010.

III.2.2 Répartition des épisodes pluvieux et la culture de la pomme de terre en 2014/2015 dans la région Vakinakaratra

Pour la période culturale 2014/2015, le nombre de jour pluvieux était de 100 jours avec une quantité de précipitation de 1438,2 mm qui se distribua en EPn engendrer par ses quantités de précipitation comme suit :

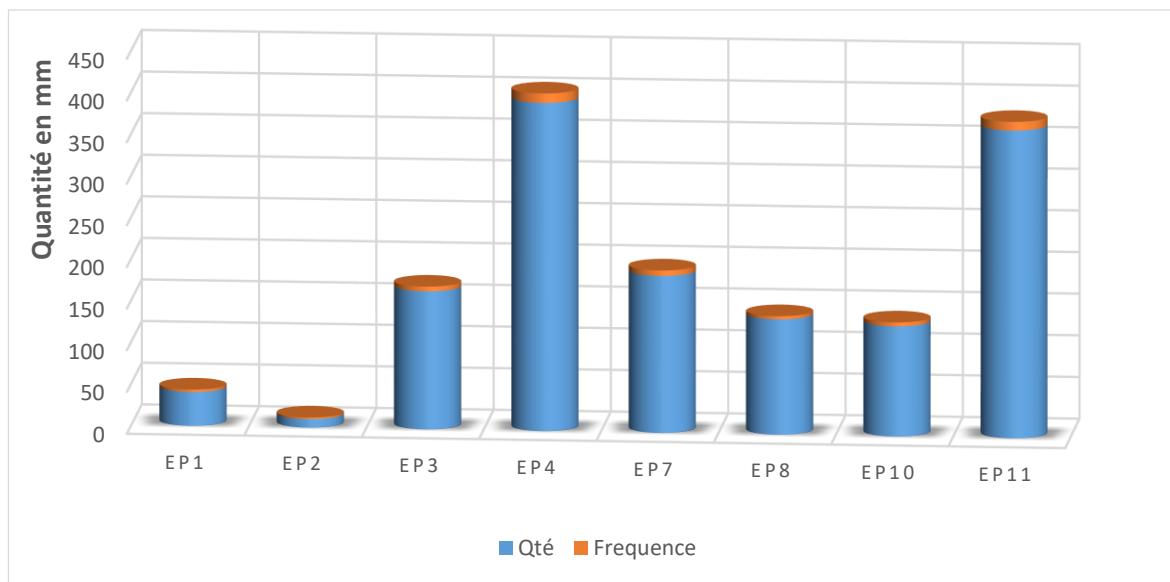


Figure 30: Distribution des épisodes pluvieux de longueur n jours (EPn) d'Antsirabe durant la période culturale 2014/2015

Source : Auteur

Cette figure montre que durant la période culturale 2014/2015 la durée maximale de jours successifs de pluie est 11 jours.

L'évolution de la durée des jours de pluie de chaque décade après le semis de la pomme de terre et la quantité de précipitation et leur besoin en eau de cette culture pendant la saison culturale 2014/2015 au niveau de la station d'Antsirabe est comme le figure 31 ci-dessous.

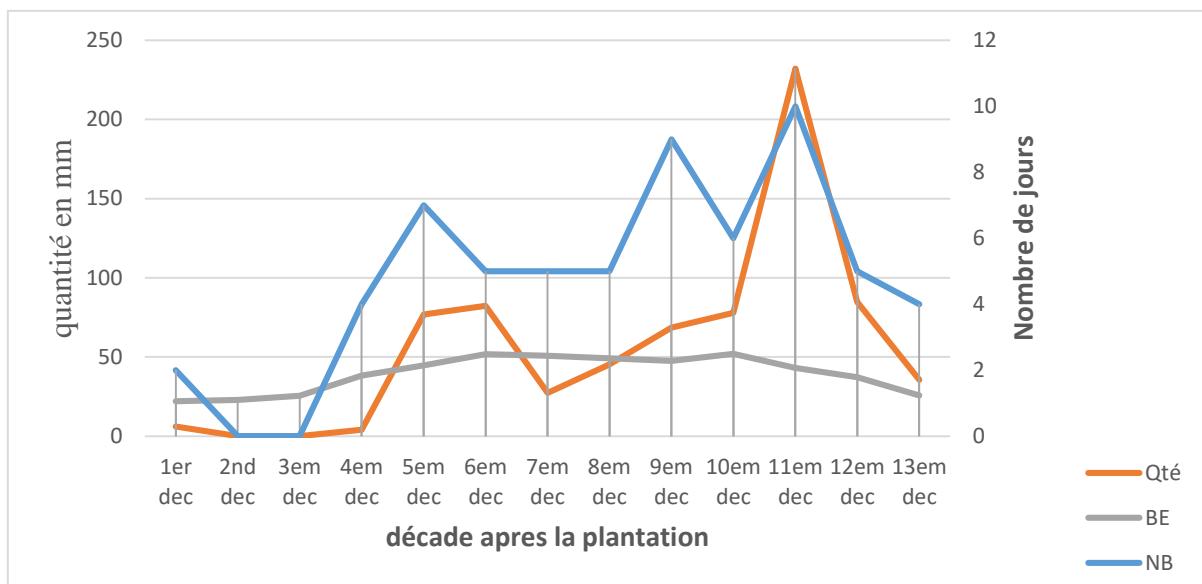


Figure 31: Rapport de la précipitation et le besoin en eau et le nombre de jours de pluie après le semis durant le période culturale 2014/2015

Source : Auteur

L’analyse de cette courbe montre que l’intensité ou durée de pluie de chaque décade sont très abondante durant la 4eme décade après la plantation jusqu’à la 12ème décade. Elle atteint un premier pic à la 5 ème décade et à la onzième décade.

Les trois premières décades ou pendant la phase de levée de la pomme de terre, le nombre de jours de pluie est trois jours avec une quantité faible 6,1mm. Pendant cette phase, cette quantité de pluie ne comble pas le besoin en de la pomme de terre, donc on doit faire l’irrigation.

Pendant la phase de floraison et la phase de tubérisation, troisième décade à la dixième décade après la plantation, le nombre de jours de pluie pendant chaque décade est varié 5 à 9 jours avec une quantité totale de 382,3 mm, sauf pour la 3 ème décade, on a une insuffisance de la quantité de pluie. Cette situation entraîne l’amélioration de la plantation de pomme terre, parce que durant cette phase cette plante besoin beaucoup d’eau.

Durant la 11 ème décade après la plantation, la précipitation est augmentée, mais elle s’atténue à la 12 ème au 13ème décade, donc le risque de pourrissement des petits tubercules est diminué.

VI. 3 Les actions en vue de l'amélioration de la production de pomme de terre dans la région Vakinakaratra

En générale, la plupart de paysans connaîtraient la maîtrise des paramètres biophysiques que forment le sol, la pression parasitaire et les adventices, et aux techniques culturales comme le travail du sol, calendrier agricole, l'utilisation de semences, les apports de fertilisants, la lutte contre les ennemis de cette plante pour pouvoir bénéficier d'une assurance des productions de la pomme de terre. Mais, la cause la plus visible pour la mauvaise production est l'instabilité du calendrier d'irrigation.

III.3.1 Pilotage d'irrigation

Selon le stade développement de la pomme de terre, une irrigation bien organisée permet un apport régulier en eau. Elle permet aussi à apporter des plusieurs avantages comme les suivants :

- Maintenir une meilleure initiation des tubercules. Un manque d'eau à ce stade produit moins de tubercules, mais d'un plus gros calibre.
- Augmenter et uniformiser le calibre de tubercule au stade de grossissement.
- Retarder les effets néfastes de ravageur.
- Uniformiser la maturité de tubercule, améliorant ainsi la qualité.
- Diminuer les défauts internes et externes aux tubercules.
- Éviter une sous-alimentation qu'une suralimentation en eau.

En tant qu'apport artificiel d'eau, l'irrigation intéresse avant tout les régions sèches du Madagascar. En général, l'irrigation est utile ou nécessaire pour corriger le climat. Elle conditionne à des degrés divers la vie sédentaire dans toutes les régions où la pluie manque.

Le pilotage de l'irrigation, appelée encore conduite ou programmation des arrosages, consiste à répondre à trois questions essentielles qui sont la date d'irriguer, la dose prévoir d'irrigation de chaque apport d'eau et le mode de l'apporter d'eau. Auxquelles il faut pouvoir répondre avec une précision maximale pour garantir un potentiel de production quantitatif et qualitatif à moindre coût en évitant tout apport d'eau intitule et parfois nuisible.

L'opération de pilotage est délicate, nécessite la combinaison de plusieurs facteurs qui sont : climat, sol, plante, et moyens techniques ; permet l'établissement d'un calendrier d'irrigation où sont définies pour chaque irrigation la date et la dose jugée optimale.

Les décisions apprendre pour conduire les irrigations sont :

- Choix de la date d'irrigation ;
- Choix de la dose et de la fréquence d'irrigation ;
- Choix de mode d'irrigation ;
- Outils de pilotage ;

Dans cette étude, la date d'irrigation, la dose et de la fréquence d'irrigation sont indiquées automatiquement dans le calendrier d'irrigation à partir du logiciel CROPWAT. Le choix de mode d'irrigation doit prendre en considération les contraintes techniques comme l'eau, le coût de matériel, main d'œuvre et l'efficience de système pour satisfaire les besoins en eau de la pomme de terre.

Et, l'objet principal d'un outil de pilotage d'irrigation est de permettre à l'agriculteur d'apporter la dose adéquate au moment opportun et de maintenir ainsi la production agricole et optimiser le rendement de cette culture.

Le pilotage de l'irrigation aura donc pour but d'éviter le stress hydrique sur l'ensemble du cycle de la culture afin d'avoir une production maximale sans contrainte d'alimentation en eau, et l'optimisation de l'utilisation de l'eau quand les ressources sont limitées.

Les avantages de l'irrigation sont donc nombreux : elle permet d'augmenter la superficie des surfaces cultivées, d'améliorer les rendements, d'assurer parfois plusieurs récoltes et, de façon générale, en se libérant des variations climatiques, d'intensifier et de stabiliser la production.

III.3.1 Calendrier d'irrigation

Dans ce présent mémoire, on étudie la culture de pomme de terre à la période dite saison, en choisissant la date 21 septembre pour la plantation. La figure suivante décrit les résultats du calendrier d'irrigation des cultures de la pomme de terre dans la région de Vakinankaratra pendant cette période. Ce calendrier d'irrigation est le quatrième résultat obtenu à partir de ce modèle CROPWAT 8.0.

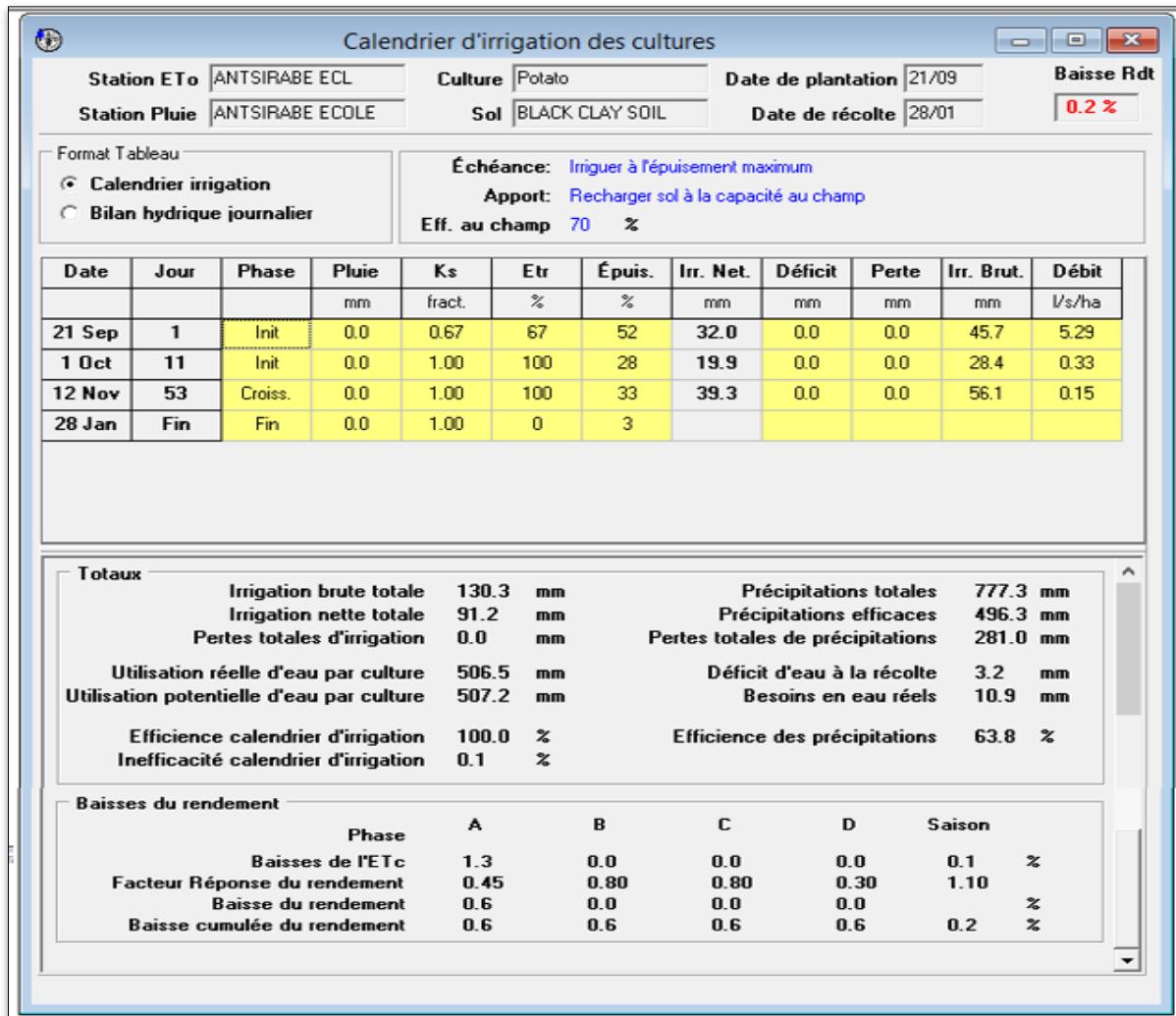


Figure 32:Calendrier d'irrigation de la pomme de terre à partir du modèle CROPWAT

Source : Auteur

Ce calendrier d'irrigation montre la dose d'irrigation de chaque apport d'eau si on choisit le 12 septembre comme la date de plantation et. L'irrigation brute totale est de 130.8 mm et l'irrigation nette totale est de 91.2 mm. Dans les résultats ci-dessus, le modèle CROPWAT indique que la baisse de rendement est 0.2% pour la culture de la pomme de terre.

Le modèle CROPWAT peut donner le résultat d'irrigation journalière en cliquant sur le bouton ‘bilan hydrique journalier’ dans la « figure 32 ». Donc la figure suivante illustre le résultat du bilan hydrique journalier à partir de ce modèle.

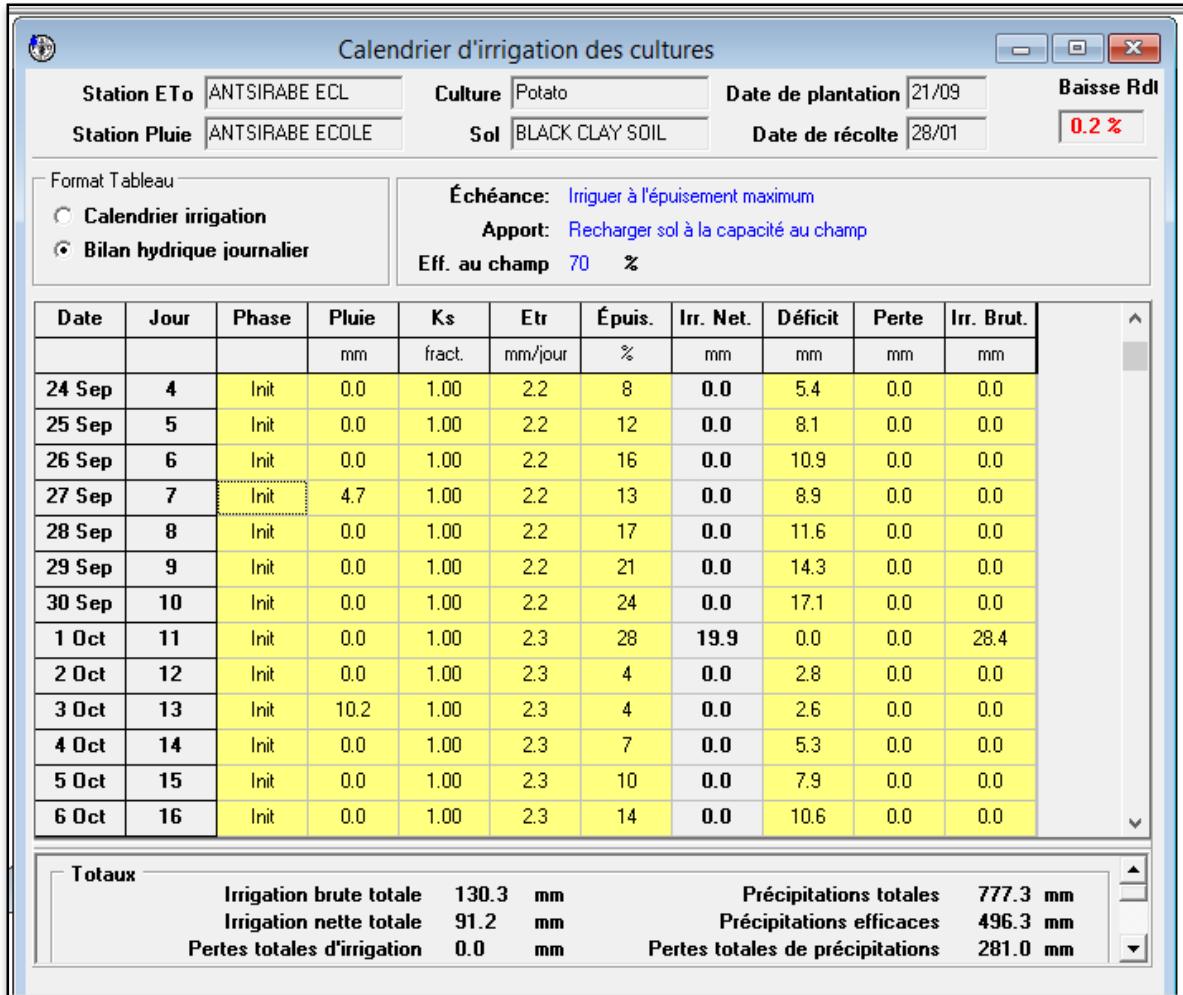


Figure 33: Bilan hydrique journalier du blé à partir du modèle CROPWAT

Source : Auteur

Comme on peut le voir dans le calendrier ci-dessus, l'irrigation brute représente la hauteur d'eau appliquée au champ et l'irrigation nette représente la hauteur d'eau qui est utilisée avantageusement. On note dans cette étude que 1mm d'eau indique $10m^3/ha$ c'est à dire un litre d'eau par une surface un mètre carré.

Ce calendrier peut aider les paysans pour la bonne pratique d'irrigation en fin d'avoir l'assurance de bonne production. Mais il y a certaines limites que les paysans, seuls, ne peuvent dépasser, comme leur situation socio-économique limitant leur niveau de

connaissance, leur revenu par rapport aux dépenses et investissements à effectuer, la situation politique et institutionnelle influant sur la variation du prix de la production,

De ce fait, il serait juste de réorganiser la filière pour que les paysans puissent bénéficier d'une assistance technique régulière jusqu'à leur autonomie, et jusqu'à ce qu'ils soient capables d'autogérer leur patrimoine, et en renforçant la communication, pour que les résultats des expérimentations en vue de l'amélioration de la production puissent arriver correctement aux destinataires et pour qu'ils soient adoptés par les bénéficiaires et pour que les paysans puissent bénéficier de l'intérêt de l'utilisation des données météorologiques parmi les techniques agricoles.

CONCLUSION GENERALE

L'étude dans ce présent mémoire avait pour principal objectif de déterminer la qualité de saisons pluvieuse dans la région du Vakinakaratra et d'estimer les besoins en eau de la pomme de terre. Cette étude présente les résultats relatifs à l'application du modèle CROPWAT pour la détermination de besoin en eau des cultures et le langage R pour analyser les épisodes pluvieux.

Cette étude montre une dégradation de la qualité de la saison des pluies. Elle confirme le raccourcissement de la saison des pluies, surtout au cours des trente dernières années. Le rétrécissement de la durée de la saison des pluies s'accompagne d'une diminution du nombre de jours pluvieux.

L'analyse de résultat obtenue permet de mettre en évidence que le facteur explicatif important de la production agricole est le climat. Ainsi, la rareté et l'abondance des pluies peuvent empêcher le développement des plantes limitant de ce fait le rendement, elles peuvent être entraînées la destruction ou le pourrissement du tubercule de la pomme de terre.

Malgré le changement climatique, il est possible d'obtenir une bonne production de pomme de terre dans cette région à partir de la connaissance de besoin en eau de cette plante et la saison de pluie.

La confirmation de ce résultat peut être bénéfique pour la programmation de l'irrigation et de maximiser l'aménagement de l'irrigation de la culture de pomme de terre dans les conditions semis aride.

BIBLIOGRAPHIQUE

Livre et ouvrage :

- [1] Ahmed SKIREDJ, Ali BÉKRAOUI & Mourad EL ALAOUI. (2000) Avertissement en irrigation pour la culture de pomme de terre dans le périmètre du Loukkos (Maroc).
- [2] André Mbairanoidji, thomas Ngue B., Ragobert Peyani T., Decembre 2007, guide pratique de la culture de la pomme de terre. 19p.
- [3] ARVALIS – Institut du végétal, janv. 2002. Fertilisation azotée de la pomme de terre, 128p
- [4] Assani AA. Variabilité temporelle et persistance des épisodes secs en saison des pluies à Lubumbashi (Congo-Kinshasa). Sécheresse 1999, 45-53p.
- [5] Blé et Pomme de terre à Madagascar : production et contraintes : Compte-rendu de la conférence Internationale du 24 au 28 Septembre 1984 à Antsirabe.
- [6] Bacci, M., Tarchiani, V., Vignaroli, P., Genesio, L., Di Vecchia, A. (2009). Identification et Suivi des Zones à Risque agro-météorologique au Sahel. Aracne Editrice: Roma. 80 pp.
- [7] D.CARDO & Ph.GREBET, Utilisation de l'informatique dans la constitution d'un fichier "coefficients culturaux, 22p.
- [8] Diop M. À propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. Sécheresse 1996, 15 p.
- [9] Euvrard R., 2010. La pomme de terre biologique de plein champ : entre diversité de systèmes et performances technico-économiques, Alter Agri, nov-déc 2010 n°104
- [10] El Hari, A. 1992. Besoins en eau des agrumes dans le Haouz- Effet du stress hydrique sur le rendement et le calibre du clémentinier. Diplôme d'Etudes Supérieures (DEA), Université Cadi Ayyad de Marrakech. Faculté des Sciences
- [11] Florence Deniere P, Avril 2013, la gestation et l'usage de l'eau en agriculture, 90p.
Gravouielle J.M. (1995) Irrigation de la pomme de terre au plus près des besoins. 45p.
- [12] GAUTIER F., LUBES-NIEL H., SABATIER R., MASSON J.M., PATUREL J.E. & SERVAT E., 1998. Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989. Hydrological Sciences Journal, 43: 921-935.

[13] Guide pratique de la pomme de terre de conservation, 1981, ITPT, 65 p.

[14] Hélène Manguin-Salomon, Nivo Rakotonirainy : Étude de la filière légumes sur les Hautes Terres de Madagascar.

[15] Le Houerou HN. 1992 : Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride. In : L'aridité, une contrainte au développement. Didactiques. Paris : Orstom éditions, 1992.

[16] Martin, S., Malenfant, N., Hoorman, J.J. et O Ménard. Cultures de couverture, les pratiques agricoles de conservation. Action Semis directe. Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

[17] Monographie de la région Vakinakaratra, février 2013, CREAM, centre de recherches, d'études et d'appui à l'analyse économique à Madagascar, 168p.

[18] Ntombi M.K., 1982 : La date du début de la saison des pluies à Lubumbashi (Shaba-Zaïre). Géo-Eco-Trop, 6(3), 183-190.

[19] Olivier DEBAUCHE, Nassima TADRIST & Pinnara KET. Climwat 2.0 & Cropwat 8.0, 2011.

[20] Peter Dalgaard, Introductory Statistics with R. Springer, 2002.

[21] Rey, G. (2002). « Les services des eaux potables et d'irrigation », L'encoche : revue d'information de la commune de Montana, (6) : 1-7p.

[22] Sané T. La variabilité climatique et ses conséquences sur l'environnement et les activités humaines en Haute-Casamance (Sud Sénégal). Thèse de doctorat de 3e cycle de géographie, université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2003.

[23] TURC (L.) - 1961 - Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle. Ann. agron., vol. XII, no 1, 13-49.

Documentation :

Bibliothèque d'ESPA.

Direction générale de la Météorologie AMPASAPITO.

Internet :

www.google.com

[www.wikipèdia.org](http://www.wikipedia.org)

www.agrométéo.fr

www.ardepi.fr

ANNEXES

ANNEXE 1: AUTRE METHODE POUR ESTIMER L'EVAPOTRANSPIRATION

❖ Les méthodes de radiation

- **La méthode de Makkink (1950)** : d'après cette méthode, l'évapotranspiration de référence est donnée par la formule suivante :

$$ETo = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma R_G}$$

Avec

Δ : la pente de la courbe de la pression de vapeur saturante à la température de l'air.

γ : la constante psychrométrique.

R_G : est la radiation à courte longueur d'onde et Cm est un facteur dépend de la région.

- **La méthode de Turc (1961)** : La formule de Turc est une relation qui peut être appliquée dans les régions tempérées pour estimer l'évapotranspiration de référence. Elle s'écrit :

$$ETo = 0.4(R_G + 50) \frac{T}{T + 50}$$

❖ Les méthodes de température :

- **La méthode de Hargreaves and Samani (1985)** : C'est une formule empirique nécessite uniquement la température dans le calcul de l'ETo.

$$ETo = a(T + 17,8) \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a$$

a : fonction de l'insolation et de l'humidité de l'air donnée.

Ra : est le rayonnement extraterrestre

Tmax : est la température journalière maximale (°C)

Tmin : est la température journalière minimale (°C)

➤ **La méthode de Blaney-Criddle (1951) :** L'évapotranspiration de référence est

$$\text{ETo} = a + bp(0,46T + 8)$$

Avec

T : température moyenne journalière (°C),

P : pourcentage d'heures de lumière du jour,

b : fonction des conditions climatiques.

ANNEXE 2: LE CODE SOURCE DU PROGRAMME CALCULANT LES NOMBRES DES EPn ET SES QUANTITES RESPECTIVES SUR R

```
# Insertion de donnée sur R

MyData <- read.csv(file="C:/Users/NEKENA/Desktop/data.csv", header=TRUE,sep=';',dec=',')

### Somme total de quantité

sum(MyData)

### calculer de nombre de jours de pluie

nbrjour<-length(which(MyData >0))

<-vector(length=length(MyData$Janvier))

for(i in 1:length(MyData$Janvier)) {

if(MyData$Janvier[i]==0){

x[i]<-1

}else{

x[i]<-0

}

}

cumul_zeros <- function(x) {

x <- !x

rl <- rle(x)

len <- rl$lengths

v <- rl$values

cumLen <- cumsum(len)

z <- x

# replace the 0 at the end of each zero-block in z by the

# negative of the length of the preceding 1-block.... 

iDrops <- c(0, diff(v)) < 0

z[ cumLen[ iDrops ] ] <- -len[ c(iDrops[-1],FALSE) ]
```

```

# ... to ensure that the cumsum below does the right thing.

# We zap the cumsum with x so only the cumsums for the 1-blocks survive:

x*cumsum(z)

}

cum<-cumul_zeros(x)

cum=c(cum,0)

### Calcul de nombre des épisodes EPn

EPn<-length(which(cum==n)[which(cum[which(cum==n)+1]==0)]) 

### Calcule de quantité des épisodes EPn

l<-length(which(cum==n)[which(cum[which(cum== n)+1]==0)]) 

s<-vector(length=l)

for(i in 1:l){

  b=which(cum== n)[which(cum[which(cum== n)+1]==0)][i]

  s[i]=sum(MyData$PC1993[(b-( n-1)):b])

}

ss=sum(s)

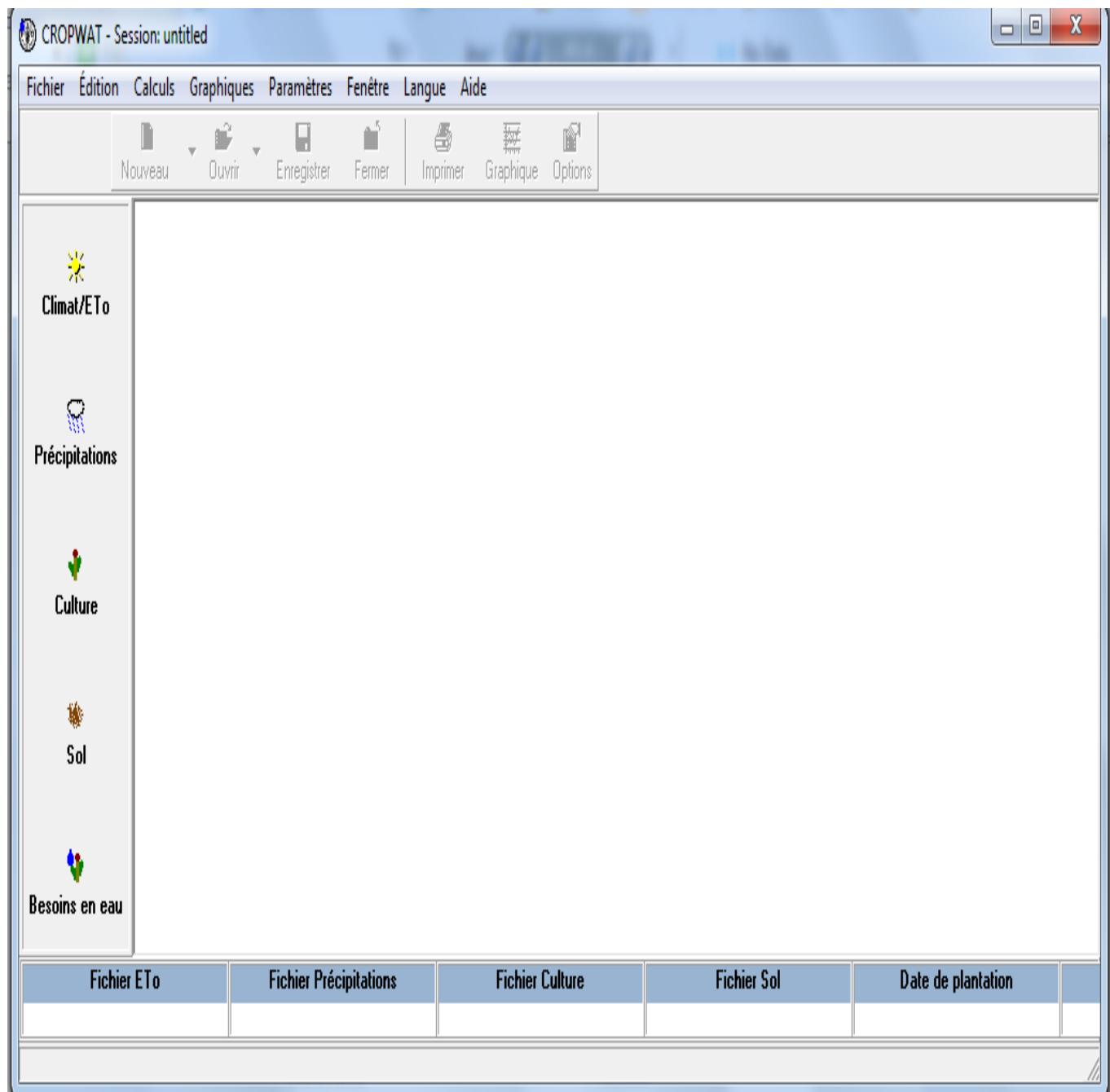
```

ANNEXE 3: EXEMPLE DE RESULTAT OBTENU SUR LE LOGICIEL R

	PC 1962		PC1963		PC 1964		PC 1965		PC 1966		PC 1967	
	nb jrs	Qté	nb jrs	Qté	nb jrs	Qté	nb jrs	Qté	nb jrs	Qté	nb jrs	Qté
EP1	20	169,8	7	8,1	11	51,8	10	53,8	16	92	5	30,6
EP2	13	211,3	6	53,1	9	33,9	6	168,5	9	130,2	5	8,6
EP3	3	126,9	5	140	3	2,1	4	158,6	3	158,2	7	257,2
EP4	3	158,6	2	123,3	3	100,9	5	235,4	2	93,1	6	306
EP5	0		2	92,1	3	21,7	3	50,1	0	0	5	303,8
EP6	1	110,6	0	0	3	269,1	4	381	2	70,6	1	34,1
EP7	0		0	0	0	0	2	149,5	1	70,3	0	0
EP8	1	174,9	3	246,6	2	123	0	0	2	263	1	73,6
EP9	0	0	2	264,8	0	0	0	0	1	17,2	0	0
EP10	0	0	0	0	1	111,9	1	52,7	0	0	0	0
EP11	0	0	1	140,5	1	58,5	0	0	0	0	0	0
EP12	0	0	1	179,5	0	0	0	0	1	221,4	1	190,1
EP13	0	0	1	160,5	0	0	1	140,2	0	0	0	0
EP14	0	0	0	0	0	0	1	181,2	0	0	0	0
EP15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	46,4	0	0
EP16	2	294,4	0	0	1	188,9	0	0	0	0	0	0
EP18	0	0	0	0	1	285,6	0	0	0	0	0	0
EP21	0	0	2	70,3	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	113	1246,5	151	1478,8	154	1247,4	144	1571	122	1162,4	111	1204

ANNEXE 4: INTERFACE DES OUTILS UTILISES

1. Interface du logiciel Cropwat



1. Interface du logiciel R

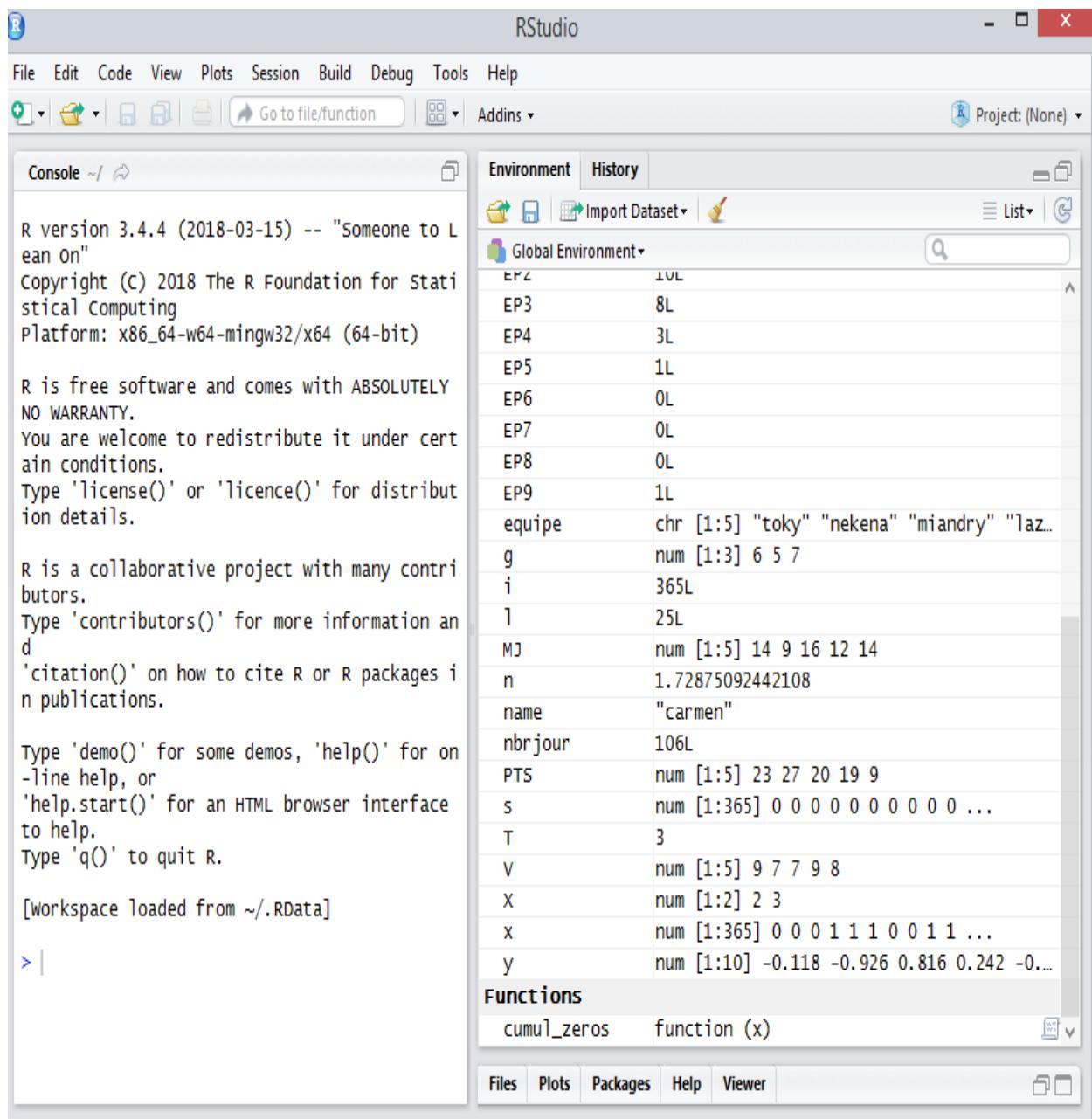


TABLE DE MATIERE

REMERCIEMENTS -----	I
SOMMAIRE -----	II
LISTE DES ABREVIATIONS -----	III
LISTE DES FIGURES-----	V
LISTE DES TABLEAUX-----	VI
LISTE DES ANNEXES-----	VII
GLOSSAIRE-----	VIII
INTRODUCTION GENERALE-----	1

PARTIE 1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Chapitre I Généralité sur la pomme de terre -----	2
I. 1 Origine de la pomme de terre	2
I. 2 Description botanique.....	2
I. 3 Variétés de la culture	2
I. 4 Importance de la culture	3
I. 5 Reproduction.....	3
I. 6 Phase végétative	4
I.6.1 Phase de germination :.....	4
I.6.2 Phase de levée :.....	4
I.6.3 Phase de tubérisation :.....	4
I.6.4 Phase de floraison et de fructification :	4
I.6.5 Phase de déclin des organes végétatifs :	5
I.6.6 Phase de repos végétatif :.....	5
I. 7 Exigences écologiques.....	5
I.7.1 Besoins en sols	5
I.7.2 Besoin en chaleur	5
I.7.3 Besoin en eau	5
I.7.4 Besoin en altitude.....	6
I. 8 Maladies et Ravageurs	6
I. 9 Ennemis	6
I. 10 Maladies et ennemis qui existent dans la région Vakinakaratra	7
I. 11 Technique culturale.....	7
I. 12 Périodes plantations.....	8
I. 13 Calendrier cultural.....	9
I. 14 Préparation du sol	9
I. 15 Récoltes	10
I. 16 Prix moyenne de vent de la pomme de terre	10
Chapitre II Généralité sur les zones d'étude-----	12
II. 1 Contexte géographique et découpage administratif	12
II. 2 Climat du Vakinakaratra.....	14
I.2.1 Le réseau de stations météorologiques	14

I.2.2	Température.....	15
I.2.3	Diagrammes ombrothermiques	16
I.2.4	Pluviométrie	16
I.2.5	Humidité de l'air.....	17
I.2.6	Vent	17
I.2.7	Cyclone	17
II. 3	Végétations et sols	18
I.3.1	Végétation	18
I.3.2	Sols	18
II. 4	Relief.....	18
II. 5	Agriculture	19
I.5.1	Caractéristiques globales de la culture	19
I.5.2	Occupation du sol.....	19

PARTIE 2 METHODOLOGIE ET APPLICATION

Chapitre III Méthodologie ----- 21

III. 1	Étude de la qualité de la saison pluvieuse	21
II.1.1	Détermination de la durée de la saison des pluies	21
II.1.2	Analyse des épisodes pluvieux.....	22
III. 2	Détermination des besoins en eau des cultures.....	25
II.2.1	L'évapotranspiration de référence (ETo)	26
II.2.2	Coefficient cultural (Kc)	28

Chapitre IV Traitement de données et logiciel utilisé ----- 30

IV. 1	Données utilisées	30
II.1.1	Données météorologiques	30
II.1.2	Données agricoles	30
IV. 2	Logiciel utilisé	31
II.2.1	Logiciel d'organisation de données MS Excel 2013	31
II.2.2	Langage R	31
II.2.3	Cropwat 8.0 for Windows	35
II.2.3.1	Présentation du modèle cropwat 8.0 for Windows.....	35
II.2.4	Formule utilisée pour le logiciel CROPWAT	39

PARTIE 3 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chapitre V Résultat obtenu----- 42

V. 1	La qualité de la saison pluvieuse dans la région Vakinakaratra.....	42
III.1.1	Evolution de la pluviométrie durant la saison de pluie 1961- 2010	42
III.1.2	Évolution du nombre de jours pluvieux	43
III.1.3	La durée de la saison des pluies	45
III.1.4	La distribution des épisodes pluvieux pendant une période culturale.....	46
III.1.5	Evolution de l'intensité des épisodes pluvieux	51
V. 2	Besoin en eau de la pomme de terre	52
III.2.1	Calcul de l'Évapotranspiration et rayonnement global	52
III.2.2	Besoin en eau des cultures de la pomme de terre	57
III.2.3	Besoin d'irrigation de la pomme de terre	59

Chapitre VI Impacte de la distribution des épisodes pluvieux sur la production de la pomme de terre -----	60
VI. 1 Etude de bilan hydrique	60
III.1.1 Analyse agro climatique de la région Vakinakaratra.....	60
III.1.2 Besoin en eau par rapport à la précipitation	61
VI. 2 La situation initiale de la pomme de terre de la région Vakinakaratra	63
III.2.1 Répartition des épisodes pluvieux et la culture de la pomme de terre en 2009/2010 dans la région Vakinakaratra	64
III.2.2 Répartition des épisodes pluvieux et la culture de la pomme de terre en 2014/2015 dans la région Vakinakaratra	66
VI. 3 Les actions en vue de l'amélioration de la production de pomme de terre dans la région Vakinakaratra	68
III.3.1 Pilotage d'irrigation.....	68
III.3.1 Calendrier d'irrigation	70
CONCLUSION GENERALE -----	73
BIBLIOGRAPHIQUE -----	I
ANNEXES-----	IV

Auteur : ANDRIAMANJATO Fenitraniaina Nekenasoa

Tel : 033 83 728 85/034 50 166 74

E-mail : andriamanjatoafn@gmail.com

Nombre de pages : 73

Nombre de figures : 33

Nombre de tableaux : 4



RESUME

Cet ouvrage avait pour principal objectif de déterminer la qualité de la saison pluvieuse dans la région Vakinakaratra et le besoin en eau de culture. La principale culture abordée est la pomme de terre. Le but poursuivi de ce présent mémoire est de fournir au lecteur une méthode suffisamment précise et relativement simple, pour déterminer la qualité de saisons pluvieuse et son application aux principales cultures.

Les étapes essentielles de cette étude reposent sur la détermination de longueur de la saison de pluie, le calcul des épisodes pluvieux en utilisant le langage de programmation R. Et puis, la détermination de besoin en eau en utilisant le logiciel CROPWAT. Enfin, les impacts des épisodes pluvieux sur la principale culture.

Mots clés : pomme de terre, épisodes pluvieux, besoin en eau.

Abstract

The main objective of this book was to determine the quality of the rainy season in the Vakinakaratra region and the need for culture water. The main crop is the potato. The purpose of this paper is to provide the reader with a sufficiently accurate and relatively simple method for determining the rainy season quality and its application to major crops.

The essential steps of this study are based on the determination of the length of the rainy season, the calculation of the rainy episodes using the programming language R. And then, the determination of the water requirement using the CROPWAT software. Finally, the impacts of rainy episodes on the main crop.

Keywords: potato, rainy episodes, water requirement.

Encadré par : M. RAKOTOVAZAHY Olivier, Responsable de la mention Météorologie à l'ESPA .

Promotion 2017