



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT METEOROLOGIE

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
d'ingénieur de la Météorologie*

Spécialité: AGROMETEOROLOGIE

Intitulé :

**CONTRIBUTION A LA PREVISION DE
RENDEMENT DU RIZ PLUVIAL DANS LA
REGION BONGOLAVA EN UTILISANT LE
MODELE AGROMETSHELL
(AMS)**

Présenté par :

RASANDIMALALA Herilanto Marius

Soutenu publiquement le, 03 Mai 2011



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT METEOROLOGIE

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
d'ingénieur de la Météorologie*

Spécialité : AGROMETEOROLOGIE

Intitulé :

**CONTRIBUTION A LA PREVISION DE
RENDEMENT DU RIZ PLUVIAL DANS LA
REGION BONGOLAVA EN UTILISANT LE MODELE
AGROMETSHELL
(AMS)**

Présenté par :

RASANDIMALALA Herilanto Marius

Membres de Jury :

Président : Monsieur ANDRIANARY Philippe Antoine

Encadreur : Madame RAHARIVELOARIMIZA Samuëline

Examineurs :

Monsieur RAKOTOVAZAHA Olivier

Monsieur RANDRIANASOLO Léon

Monsieur RAZAFINDRAKOTO Benjamin

*"Eo akaikin'izay torotoro i Javeh,
ary mamonjy izay rera-panah Izy"*

Salamo 34:19

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toutes mes reconnaissances à toutes les personnes qui m'ont aidé à l'élaboration de ce mémoire de fin d'études. Ainsi j'adresse mes vifs remerciements à :

- Monsieur ANDRIANARY Philippe Antoine, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui a bien voulu accepter la présentation de cette soutenance, me faire aussi l'honneur de présider le jury.
- Monsieur RAKOTOVAZAHA OLIVIER, Maître de conférence, Chef de département Météorologie, de m'avoir accepté comme étudiant au sein de son département, et d'avoir examiné ce mémoire.
- Madame RAHARIVELOARIMIZA SAMUELINE, Docteur Ingénieur en Chef, qui a assuré, avec sa patience et sa volonté, mon encadrement durant les différentes phases de mes travaux. C'est grâce à ses conseils et ses directives que j'ai pu réaliser cet ouvrage.
- Monsieur RANDRIANASOLO LEON, Maître de conférence, d'avoir accepté de siéger parmi les membres de jury pour apporter ses appréciations et ses critiques, afin d'améliorer ce travail.
- Monsieur RAZAFINDRAKOTO BENJAMIN, Chef de Service de la Météorologie appliquée à l'agriculture au sein de la Direction Générale de la Météorologie Ampasapito, Ingénieur de la Météorologie, d'avoir accepté aussi de siéger parmi les membres de jury pour apporter ses appréciations et ses critiques, afin d'améliorer ce travail.
- Tous les personnels de la Météorologie Nationale à Ampandrinomby, qui m'ont aidé, et plus particulièrement, Monsieur Rija Fidèle FANIRIANTSOA, qui m'a facilité l'accès aux données dont j'ai besoin lors de l'élaboration de ce mémoire.

Tous mes remerciements à toute ma famille de m'avoir soutenu financièrement, surtout moralement tout au long de l'élaboration de ce travail.

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire

LISTE DES ABBREVIATIONS

AMS	: AgroMetShell
Cc	: Capacité au champ
CIRAD	: Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
D	: Drainage
das	: densité apparente sèche
DAT	: Digital Audio Tape
DRDR	: Direction Régionale de Développement Rural
E	: Evaporation
ETM	: Evapotranspiration maximale
ETP	: Evapotranspiration potentielle
ETRv	: Evapotranspiration réelle au phase végétative
Ea	: Pression de vapeur réelle
Es	: Pression de vapeur saturante
G	: Flux de chaleur sensible dans le sol
Hp	: Humidités pondérales
Hv	: Humidités volumiques
JAS	: Jours Après Semis
Kc	: Coefficient cultural
NCEP	: National Center for Environmental Prediction
P	: Précipitation
PCP-SCRID	: Pôle de Compétence en Partenariat-Systèmes de Cultures et Riziculture Durable
pfp	: Point de flétrissement permanent
Pe_{eff}	: Pluie efficace
R	: Ruissellement
R_{det}	: Rendement detendancé
R_{obs}	: Rendement observé
R_{ten}	: Rendement tendancé
R_{dt sim}	: Rendement simulé
RFU	: Réserve Facilement Utilisable

RN1	: Route Nationale Numero1
Rn	: Rayonnement net
RU	: Réserve Utile
ΔS	: Variation de stock du sol
Δ	: Pente de la courbe de pression de vapeur saturante
γ	: Constante psychrométrique
T	: Transpiration
U2	: Vitesse moyenne du vent

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Appréciation des exigences en eau suivant les phases de développement du riz pluvial.....	5
Tableau 2: Réserves utiles calculées sur 1 m de profondeur pour un sol ferrallitique et un vertisol	15
Tableau 3: Listes des stations météorologiques.....	37
Tableau 4: Tableau récapitulatif de sources de données.....	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma d'un bilan hydrique d'une culture pluviale	6
Figure 2: Représentation graphique des différents états de l'eau dans le sol	12
Figure 3: Approche globale méthodologique avec Agrometshell.....	35
Figure 4 : Résultats de calcul de bilan montrant la distribution des indices de satisfaction en eau.....	42
Figure 5: Etape 1 ouverture d'un fichier AMS dans MS Excel.....	43
Figure 6 : Etape 2 ouverture d'un fichier AMS dans MS Excel	44
Figure 7: Etape 3 ouverture d'un fichier AMS dans MS Excel	44
Figure 8: Répartition de l'indice de satisfaction en eau en fonction de déficit d'eau	45
Figure 9: Comparaison de l'indice de satisfaction en eau avec le déficit en eau correspondant.....	48
Figure 10 : Variation de rendement du riz pluvial en fonction de l'évapotranspiration potentielle	49
Figure 11: Tendance de l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'année ..	50
Figure 12: Tendance du rendement à Tsiroanomandidy pendant 13 ans (1990-2002).....	51
Figure 13: Rendement en fonction de déficit d'eau.....	51
Figure 14 : Rendement détendancé en fonction de déficit d'eau.....	52
Figure 15 : Comparaison de rendement réel et simulé durant les 5 dernières années	53

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION 1

PREMIERE PARTIE : BILAN HYDRIQUE ET RELATIONS EAU-SOL-PLANTE 4

I.1. Importance de l'eau 4

I.2. Le bilan hydrique des cultures 6

I.2.1. Equation du bilan hydrique 6

I.2.2. Les composantes du bilan hydrique 7

I.2.2.1 Evapotranspiration 7

I.2.2.2. Ruissellement 8

I.2.2.3.Drainage 8

I.2.2.4. Précipitations 8

I.2.2.5. Irrigation 8

I.2.2.6. Remontées capillaires 8

I.2.3. Disponibilité de l'eau dans le sol 9

I.2.3.1. Le contenu en eau du sol 9

I.2.3.2. La disponibilité de l'eau du sol : les potentiels hydriques 11

I.2.4. Les mouvements d'eau dans le sol 15

I.2.5. Evapotranspiration et besoin en eau des cultures 16

I.2.5.1.Généralités 16

I.2.5.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP) 17

I.2.5.3. L'évapotranspiration réelle (ETR) 19

I.2.5.4. L'évapotranspiration maximale (ETM) 19

I.2.5.5. Les coefficients culturaux 20

DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DU MODELE 22

II.1. Présentation du modèle 22

II.1.1. Principe générale 22

II.1.2. Description 23

II.1.3. Les données d'entrées 25

II.1.4 Les sorties du modèle AMS 26

II.1.5 Particularités d'AMS 26

II.1.5.1. Brève présentation du modèle WOFOST 27

II.1.5.2. Le modèle AMS	27
II.2.1. Documentation	28
II.2.2. Apprentissage d'AMS	28
II.2.3 Données utilisées	28
II.2.4 Traitements des données	29
II.2.4.1. Méthode d'estimation directe de rendement	29
II.2.4.2. Prise en compte de tendance	30
II.3. Analyse du modèle AMS	31
II.3.1. Les points forts du modèle AMS	32
II.3.1.1. La rapidité de la prévision	32
II.3.1.2. La gestion et le traitement des données	33
II.3.2 Les limites de l'outil AMS	34
TROISIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSION	34
III.1 Utilisation de ce modèle AMS pour la prévision des rendements dans la région Bongolava	34
III.1.1 Présentation de la région Bongolava	34
III.1.1.1. Localisation	34
III.1.1.2. Reliefs et paysages	35
III.1.1.3. Géologie	35
III.1.1.4. Le climat	36
III.1.1.4.1. Les réseaux de stations météorologiques	36
III.1.1.5. Hydrologie	37
III.1.1.6. Sols et végétation	37
III.1.2. Simulations pour le suivi du riz pluvial	38
III.1.2.1. Processus de préparation de bilan en eau	39
III.1.2.2. Calcul du bilan hydrique	40
III.1.2.3. Enregistrement et visualisations des résultats	41
III.1.3. Prévision de rendement à Tsiroanomandidy	49
III.1.4. Prévision de rendement du riz pluvial à Tsiroanomandidy : Prise en compte de l'effet de tendance	50
III.2. Interprétation et discussions des résultats	54
CONCLUSION	56
ANNEXE	
BIBLIOGRAPHIE	

INTRODUCTION

La région Bongolava fait partie des hautes terres centrales malgaches et forme la zone de Moyen-Ouest de la province d'Antananarivo. Elle se caractérise essentiellement par des densités d'occupation de terres très inégales en fonction de la qualité des sols, de très faibles rendements agricoles et d'une forte dégradation du milieu naturel. Les systèmes de production dominant dans cette région sont concentrés sur la riziculture irriguée depuis la royauté Merina jusqu' à nos jours. Depuis l'indépendance, toutes les actions conduites par les actions publiques dans le domaine agricole ont été orientées quasi-exclusivement vers l'intensification rizicole des grandes plaines et des bas fonds.

Face à une pression démographique périurbaine croissante au cours des 20 dernières années, le système de production rizicole n'est plus à mesure de répondre aux besoins vivriers et monétaires de la plupart des familles paysannes. D'autant plus, pendant la crise économique sans précédent que connaît Madagascar depuis une vingtaine d'années, la faiblesse des ressources monétaires des agriculteurs et les conditions désastreuses du marché remettent en cause l'acquisition d'intrants que nécessitent les pratiques intensives rizicoles vulgarisées. Dans ces conditions, la riziculture de bas fonds, trait essentiel de la vie économique sociale et culturelle, ne suffit plus à assurer l'autoconsommation familiale. Les stratégies paysannes visent alors à diversifier les sources de nourriture et de revenus monétaires des exploitations au delà de la riziculture irriguée, notamment par la conquête des Tanety.

Le premier obstacle majeur à la mise en valeur de cette conquête des Tanety réside dans la mauvaise qualité des sols qui sont soumis à une dégradation continue par l'utilisation de techniques culturales inappropriées et par les feux de brousses, ainsi que par la surexploitation rapide de la couverture végétale (*jachères fourragères, espèces arbustives*).

De plus, au cours des ces 20 dernières années, les fluctuations climatiques ont montré des variations importantes et des périodes de sécheresse. Ces conditions particulières ont aggravé le déséquilibre alimentaire.

Compte tenu de cette évolution, il est devenu de plus en plus important de pouvoir établir en temps voulu une prévision du tonnage et de qualité des récoltes dans les 22 régions existants à Madagascar pour faire sortir notre pays de cette crise alimentaire, particulièrement en ce qui concerne le riz qui constitue la ressource alimentaire principale de la population malgache. Ces prévisions pourraient être très importantes pour les producteurs professionnels et leur permettent de connaître presque exactement la quantité de leur récolte et sa proportion en vue de l'exportation. De même, cette information s'avère indispensable pour le pays, car elle permet d'établir au préalable une estimation de récolte. Cette information lui renseigne aussi sur la qualité qui ne pourra pas être couverte par la production nationale afin d'en planifier le manque à gagner.

L'objectif de notre étude est la **« Contribution à la prévision de rendement du riz pluvial dans la région Bongolava en utilisant le modèle AMS(Agrometshell) »**. Dans ce modèle, la prévision sous-entend la prédiction des rendements et des éventuels problèmes pouvant survenir, suite à une variation d'un facteur climatique et un bilan hydrique des cultures pendant leurs différentes phases de développement.

La méthode utilisée est organisée en deux volets :

- Après avoir fait tourner le modèle AMS, on essaie d'explicitier le rendement à partir de l'un de ses paramètres de sortie ;
- On cherche à avoir une régression linéaire dans laquelle, le rendement est directement défini par un paramètre de sortie.

Cet ouvrage comporte trois grandes parties, dans laquelle :

- La première partie traite les généralités sur le bilan hydrique et les relations eau-sol-plante ;
- La seconde partie présente le modèle, la mise en œuvre d'AMS ainsi que la configuration du modèle en décrivant toutes les étapes nécessaires ;
- La troisième et dernière partie est réservée aux discussions de résultats obtenus.

PREMIERE PARTIE

PREMIERE PARTIE : BILAN HYDRIQUE ET RELATIONS EAU-SOL-PLANTE

Le sol constitue le réservoir où la plante va puiser ses éléments nutritifs. Ce réservoir est naturellement alimenté par les pluies. En pluviométrie, la quantité d'eau que peut contenir un sol s'exprime en hauteur d'eau (en mm).

1.1. Importance de l'eau

En général, l'eau représente 80 % du poids des végétaux. Elle est indispensable à leur croissance : sous l'effet de la photosynthèse, l'eau et le gaz carbonique sont transformés en sucres suivant la réaction :



En outre, l'eau transporte les éléments nutritifs des plantes. La transpiration crée une succion qui aspire l'eau et les sels minéraux du sol depuis les racines jusqu'aux feuilles et aux fruits. L'objectif prédominant de la gestion de l'eau, à l'échelle de la parcelle vise alors à accroître cette transpiration. Les pertes en eau doivent être réduites au niveau de l'évapotranspiration, du drainage ou de ruissellement tout en augmentant les apports, soit par irrigation ou soit par augmentation de la zone du sol exploitée par les racines.

Par contre, lorsque de l'eau est en excès, elle gêne l'activité biologique dans le sol et réduit la disponibilité en éléments nutritifs. Cette période où le sol est saturé doit être minimisée. Dans ce cas, la transpiration est, peu variable dans le temps. L'objectif à atteindre en termes de gestion de l'eau est alors l'augmentation du drainage.

De plus, le rendement d'une culture résulte de l'action commune d'une série de facteurs tels que :

- le choix de la variété ;
- la fumure ;
- l'état sanitaire de la culture (absence ou présence de mauvaises herbes et parasites) ;
- l'état calcique et humique, influant sur l'activité biologique et la structure du sol ;
- le choix des techniques culturales ;
- l'humidité du sol.

Chacun de ces facteurs peut se comporter comme un facteur limitant, c'est-à-dire réduire ou même annuler le rendement s'il est défavorable. S'il est possible actuellement d'obtenir de bons rendements par le choix de la fumure, de la variété, de la méthode de travail du sol et de la lutte antiparasitaire. C'est bien souvent l'eau, qui, par son excès ou par son absence, limite la production. En effet, les exigences en eau suivant les différentes phases de développement du riz varient selon leur stade de développement (Tableau 1).

Phase	Végétative		Reproductive			Maturation
Stade	Germination	Tallage	Montaison	Epiaison	Floraison	Maturation
Durée	4-5 JAS	18-22 JAS		105-115 JAS		130-150 JAS
Exigence	Elevée	Faible	Elevée	Elevée	Elevée	Faible

Tableau 1 : Appréciation des exigences en eau suivant les phases de développement du riz pluvial

Source : JACQUOT et COURTOIS (1983)

Le facteur hydrique reste donc le facteur primordial dans toute production agricole, aussi bien par excès que par manque d'eau.

I.2. Le bilan hydrique des cultures

I.2.1. Equation du bilan hydrique

Le bilan hydrique exprime la conservation de la masse d'eau présente dans le système sol/plante/atmosphère entre deux dates différentes. Cette eau est répartie entre l'eau stockée dans le sol et dans la plante, et les flux entrant et sortant de cette réserve. (Figure. 1).

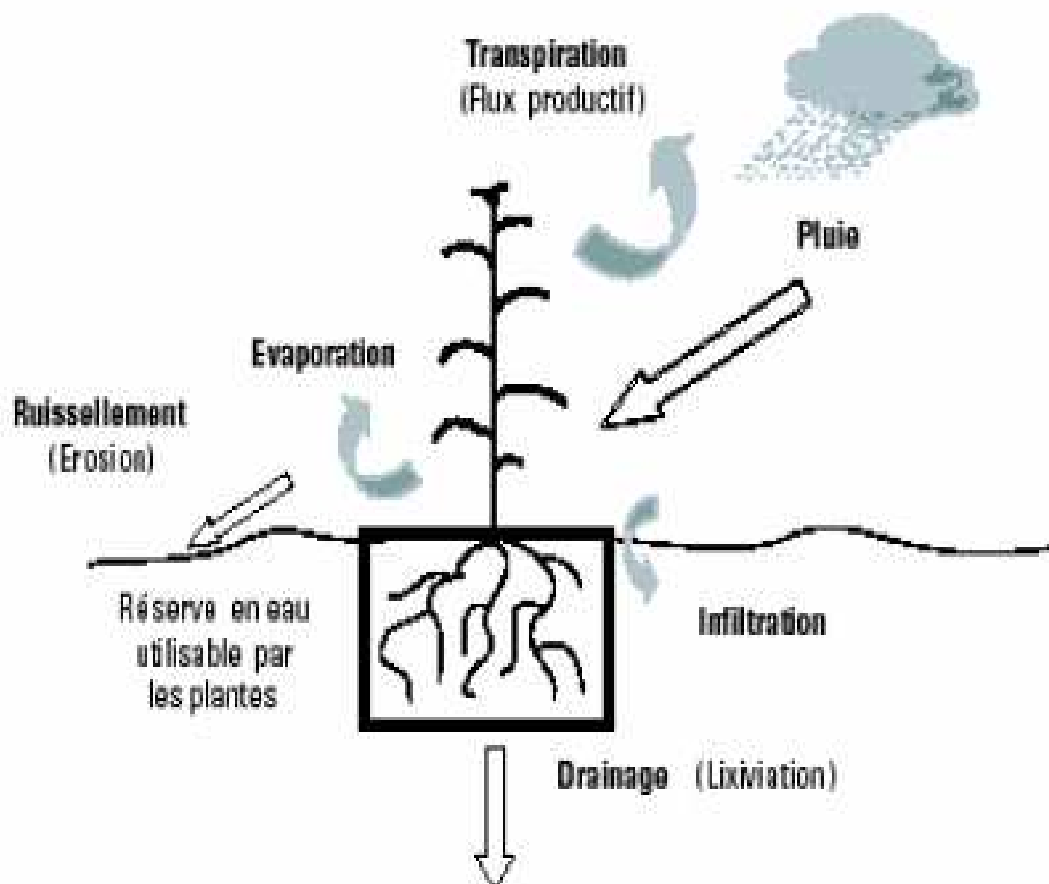


Figure 1 : Schéma d'un bilan hydrique d'une culture pluviale

Source : Mémento Agronome(2002)

L'équation de la conservation de la masse, dans un sol cultivé, entre deux dates différentes est la suivante:

$$P - E - T - D - R = \Delta S \quad (1)$$

où P = précipitations reçues entre les deux dates ;

E = évaporation du sol ;

T = transpiration des plantes ;

D = drainage sous la zone de sol exploitée par la culture ;

R = pertes en eau par ruissellement de surface ;

ΔS = variation du stock d'eau du sol (aux échelles pertinentes pour l'analyse des systèmes de culture, les variations de stock dans les plantes sont négligeables).

I.2.2. Les composantes du bilan hydrique

Les pertes en eau se répartissent sur trois postes :

- l'évapotranspiration ;
- le ruissellement ;
- le drainage.

Les sources d'apport d'eau possible au niveau d'une parcelle proviennent de celles des précipitations, de la remontée capillaire et éventuellement de l'irrigation.

I.2.2.1 Evapotranspiration

L'évapotranspiration qui comprend la transpiration végétale et l'évaporation propre du sol résulte de l'impact de la radiation solaire. La fraction la plus importante de cette radiation assure le changement d'état de l'eau liquide qui se transforme en eau vapeur : celle-ci se dissipe dans l'atmosphère (MOREL, 1989).

I.2.2.2. Ruissellement

Il peut être mesuré grâce à un dispositif recueillant les eaux de surface d'une certaine superficie, isolée du reste de la parcelle par des diguettes en tôle ou en matière plastique. Des mesures en continu sont possibles par pesée du récipient recevant l'eau ruisselée. Le ruissellement dépend non seulement de la pente de la parcelle mais aussi des propriétés physiques du sol (texture, rugosité de surface) et de l'intensité des pluies.

I.2.2.3. Drainage

C'est un mouvement descendant de l'eau du sol sous la zone racinaire après une pluie abondante (MARLET, 1988). La méthode tensiométrique permet de mesurer simultanément le drainage et la variation de stock du sol. Le drainage peut représenter une proportion élevée des précipitations, lorsque celles-ci sont abondantes par rapport aux besoins de la culture et à la capacité de stockage du sol. Ce drainage peut être très faible, voire nul, dans les situations arides.

I.2.2.4. Précipitations

La pluviométrie est une donnée extrêmement variable dans le temps et l'espace. Il s'agit du terme du bilan hydrique dont la mesure est la plus facile.

I.2.2.5. Irrigation

C'est le mouvement ascendant de l'eau dans le profil. Vis-à-vis du bilan hydrique, il s'agit d'un apport ascendant d'eau dans l'horizon racinaire.

I.2.2.6. Remontées capillaires

Lorsque les conditions naturelles d'approvisionnement en eau ne correspondent pas aux exigences des plantes, il faut faire de l'irrigation pour apporter les compléments d'eau nécessaires et suffisants. La dose apportée peut être calculée en fonction des débits du système d'irrigation, en tenant compte des pertes diverses en amont des parcelles. Dans le cas d'une forte hétérogénéité

spatiale de la distribution d'eau et lorsqu'une précision élevée est requise, fréquent irrigation, il peut être nécessaire de mesurer le plus directement possible la dose apportée à chaque parcelle : pluviomètres en irrigation par aspersion, ou calcul du débit à la raie en irrigation gravitaire.

I.2.3. Disponibilité de l'eau dans le sol

I.2.3.1. Le contenu en eau du sol

➤ Humidité

Les paramètres les plus utilisés pour caractériser l'état hydrique d'un sol concernent l'humidité pondérale H_p et l'humidité volumique H_v .

L'humidité d'un sol représente la quantité d'eau qu'il contient. Il existe deux sortes de l'humidité :

— l'humidité pondérale d'un sol, exprimée en pourcentage de son poids :

$$H_p(\%) = \frac{\text{Poids de terre humide} - \text{Poids de terre sèche}}{\text{Poids de terre sèche}} \times 100 \quad (2)$$

— l'humidité volumique d'un sol, qui s'exprime officiellement en volume d'eau par volume de sol (m^3/m^3 ou $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$), et le plus souvent en pratique en pourcentage d'eau ramenée au volume:

$$H_v = \frac{\text{Volume d'eau}}{\text{Volume occupé par la terre en place}} \quad (3)$$

$$H_v = \frac{\text{Volume d'eau}}{\text{Volume occupé par la terre en place}} \times 100 \quad (4)$$

Par exemple : $H_v = 0,354 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ correspond à $H_v = 35,4 \%$

Mesure de l'humidité :

La méthode est la suivante :

- Prélever un échantillon de terre, puis dessécher à l'étuve durant 24 heures à 105°C.
- En déduire l'humidité à partir de son poids avant et après séchage (cf. formule ci-dessus) pour obtenir ainsi l'humidité pondérale du sol.

➤ **Densité apparente**

La densité apparente d'un échantillon de terre est le rapport entre son poids sec et son volume(ou du poids d'un même volume d'eau).

$$das = \frac{\text{Poids d'un volume de terre sèche en place}}{\text{Poids du même volume d'eau}} \quad (5)$$

Si la densité réelle d'un échantillon, c'est-à-dire la densité des constituants solides du sol est connue, la porosité exprimée en pourcentage peut s'en déduire selon la formule suivante :

$$\text{Porosité} = \frac{\text{densité réelle} - \text{densité apparente}}{\text{densité réelle}} 100 \quad (6)$$

La densité réelle des sols varie peu et celle d'un sol de texture équilibrée est de 2,6. Les sols très riches en matières organiques ont une faible densité. La mesure de la densité apparente est nécessaire pour estimer les réserves en eau, lorsque les humidités mesurées sont des humidités pondérales (ce qui est la plupart des cas). La relation suivante relie l'humidité volumique et l'humidité pondérale :

$$H_v = das \ H_p \quad (7)$$

➤ Stocks

Le stock en eau S du sol entre la surface et une cote z est donné par :

$$S(mm) = \text{Somme } i = \frac{0, z (W_i e_i \text{ das}_i)}{10} = \text{Somme } i = \frac{0, z (H_i e_i)}{10} \quad (8)$$

avec :

W_i : teneur en eau pondérale (%) de la tranche de sol i

H_i : teneur en eau volumique (%) de la tranche de sol i

e_i : épaisseur de la tranche de sol i (cm)

das_i : densité apparente de la tranche de sol i

1.2.3.2. La disponibilité de l'eau du sol : les potentiels hydriques

➤ Les différentes formes de l'eau dans le sol (Cf. Fig. 2)

Toute l'eau contenue dans un sol n'est pas disponible pour les plantes. Une partie est drainée en profondeur et l'autre est retenue trop fortement dans les micropores du sol. Après saturation en eau de la totalité des espaces vides (la macroporosité) du sol d'un pot rempli de terre et portant une plante, l'eau dans le sol se présente sous trois formes :

- ❖ **L'eau de gravité** ou eau de saturation qui s'écoule d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement, quittant les espaces vides les plus grands qui se remplissent d'air. Cette eau occupe la macroporosité du sol. Lorsque l'eau cesse de s'écouler, la terre ressuyée atteint son taux d'« **humidité à la capacité au champ** », valeur qui traduit sa capacité de rétention.
- ❖ **L'eau utilisable** par les plantes qui est celle que retient le sol soit à l'intérieur des fins canaux ou « capillaires », soit sous forme de films assez épais autour des éléments solides. La plante s'en nourrit tandis que le taux d'humidité de la terre s'abaisse. Mais bientôt, la plante semble souffrir de la

sécheresse et se fane quand le « **point de flétrissement** » est atteint. Pourtant une mesure de l'humidité montre que la terre contient encore de l'eau.

- ❖ **L'eau non utilisable** qui forme autour des éléments solides des films très minces. Elle est retenue fortement par le sol avec tant d'énergie que la force de succion des racines (en général autour de 16 atmosphères) ne peut plus l'extraire.

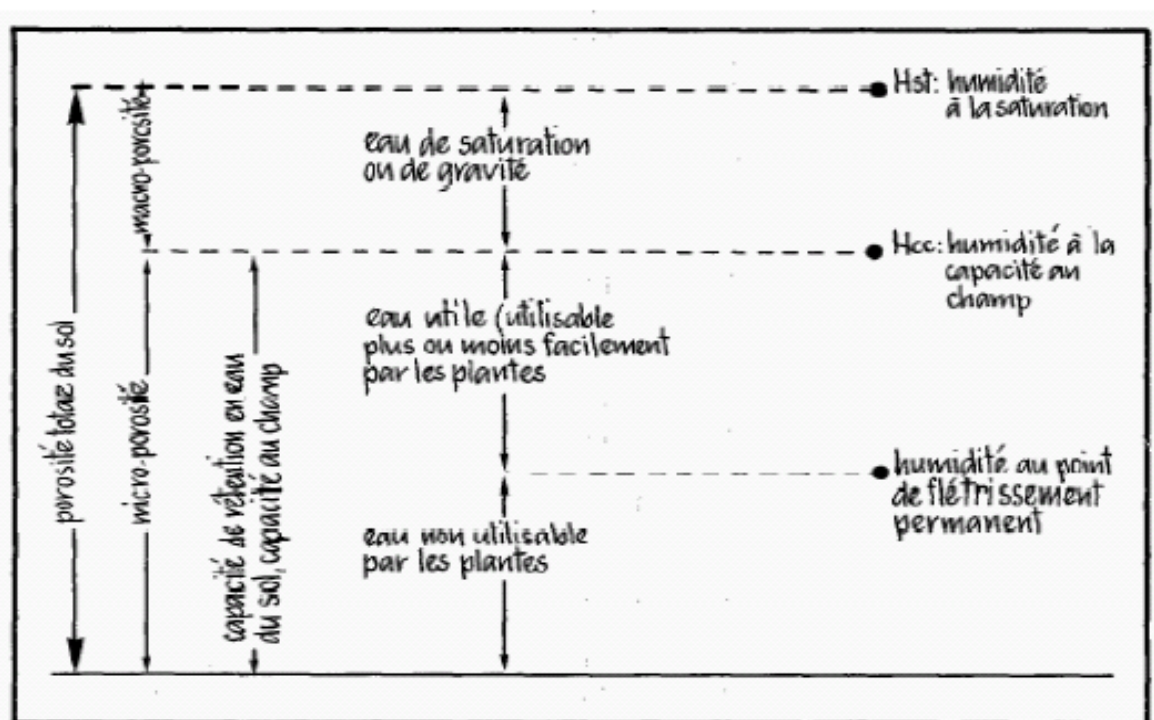


Figure 2: Représentation graphique des différents états de l'eau dans le sol

Source : Manuel d'agronomie tropicale appliquée à l'agriculture haïtienne (1990)

— Les potentiels hydriques

L'eau dans le sol est soumise à trois forces, à savoir :

- ❖ la force de gravité ;
- ❖ la force de succion du sol.
- ❖ la force de succion des racines due à l'appel d'eau provoqué par la transpiration des feuilles;

La force avec laquelle l'eau est liée et retenue par le sol est appréciée énergétiquement comme un potentiel. C'est le potentiel de succion, appelée aussi potentiel matriciel. Il y ajoute la force de gravité qui s'exerce et tend à faire aller vers le bas toutes les particules. La somme des deux potentiels est le potentiel total qui est appelé également "charge hydraulique". La relation pour la charge hydraulique H s'exprime comme suit :

$$H = h - z \quad (9)$$

où h : pression effective de l'eau ou potentiel de succion ou potentiel matriciel

z : potentiel de gravité = profondeur comptée positivement vers le bas depuis la surface.

Pour pouvoir s'alimenter en eau, les racines des plantes doivent exercer une force de succion supérieure au potentiel de succion.

— Réserve utile

La réserve d'eau dépend du type de sol : un sol sableux retient moins d'eau qu'un sol limoneux qui, lui-même, retient moins d'eau qu'un sol argileux.

La réserve utile (**RU**) est la quantité maximale d'eau retenue par le sol et utilisable par les plantes. Les plantes n'exploitent l'eau du sol qu'entre deux valeurs de stocks S , qui définissent la réserve utile :

- **Spf** : celle où le sol est à la teneur en eau en dessous de laquelle la culture ne parvient plus à transpirer et dite « teneur en eau au point de flétrissement permanent », *Spf*, évaluée classiquement par la teneur en eau à $pF = 4.2$;
- **Scc** : celle où le sol est à sa teneur en eau maximale et au-delà de laquelle l'eau s'écoule par gravité, dite « capacité au champ », **Scc**.

Cette capacité se calcule pour un horizon homogène d'épaisseur h .

$$RU = (\text{Quantité d'eau retenue par le sol à la capacité au champ}) \\ - (\text{Quantité d'eau retenue au point de flétrissement permanent}) \quad (10)$$

$$RU = Scc - Spf \quad (11)$$

$$RU = 10 \ h \ \text{das} \ (Hcc - HpF_{4,2}) \quad (12)$$

où RU : réserve utile en mm d'eau

h : épaisseur de l'horizon en m (mètre)

das : densité apparente

Hcc et $HpF_{4,2}$: humidités en %

La capacité de rétention en eau du sol et sa réserve utile varient donc selon sa texture. Plus un sol contient d'éléments fins, plus il cède l'eau avec difficulté. Les sols très argileux ont une humidité très élevée après ressuyage, mais une grande partie de cette eau n'est pas utilisable par les plantes car l'humidité au point de flétrissement est aussi très élevée.

Des mesures de réserves utiles pour un sol ferrallitique et un vertisol à la Guadeloupe ont donné les résultats du Tableau 2.

Quel que soit à la capacité au champ ou au point de flétrissement permanent, le vertisol retient une quantité plus d'eau plus grande que celle du sol ferrallitique. Cependant, ce dernier type de sol a une plus grande réserve utile.

	A la capacité au champ		Au point de flétrissement permanent			
	Humidité pondérale	Quantité d'eau en mm	Humidité pondérale	Quantité d'eau en mm	Densité apparente	R.U
Vertisol Sol ferralitique	55 44	583 440	37 22	392 220	1.06 1.08	191 mm 220 mm

Tableau 2: Réserves utiles calculées sur 1 m de profondeur pour un sol ferralitique et un vertisol

Source : Manuel d'agronomie tropicale appliquée à l'agriculture haïtienne (1990)

I.2.4. Les mouvements d'eau dans le sol

Les mouvements d'eau dans le sol résultent principalement des différences (gradients) de charges hydrauliques, selon la loi de Darcy:

$$q = -K(H_v) \frac{\Delta H}{L} \quad (13)$$

avec q : vitesse de Darcy ou densité de flux (mm/j)

$K(H_v)$: la conductivité hydraulique (mm/j), qui varie avec l'humidité

$\frac{\Delta H}{L}$: le gradient de potentiels

Cette relation exprime la proportionnalité de flux avec le gradient de charge hydraulique.

La conductivité hydraulique traduit le rapport de la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol avec le gradient de charge hydraulique qui provoque cet écoulement. Elle exprime l'inverse d'une résistance du sol à l'écoulement. Cette conductivité évolue en fonction de la teneur en eau. Les propriétés hydrodynamiques du sol se caractérisent par :

- la courbe de rétention qui relie l'humidité du sol H_v (m^3/m^3) au potentiel matriciel de l'eau du sol ψ (m) ;
- la conductivité hydraulique K ($m\ s^{-1}$) qui caractérise la vitesse d'écoulement d'eau dans un sol à humidité volumique donnée H_v (m^3/m^3) ou à son potentiel matriciel.

L'évaluation du flux de drainage [négalif dans le cas de remontées capillaires] fait appel aux tensiomètres. Plusieurs tensiomètres installés à différentes profondeurs fournissent ainsi le moyen de calculer les gradients de charge hydraulique entre ces différentes cotes, d'où les flux, si l'on connaît les lois de conductivités hydrauliques.

I.2.5. Evapotranspiration et besoin en eau des cultures

I.2.5.1. Généralités

➤ L'évaporation du sol

L'eau s'évapore à la surface du sol sous l'effet cumul de la température, du rayonnement et de la vitesse du vent.

Cette évaporation est exprimée en mm ou en litres d'eau par m^2 .

➤ La transpiration de la plante

De même que le sol, les végétaux sont soumis à la température, au rayonnement et au vent, facteurs qui entraînent automatiquement une évaporation de l'eau au niveau des ouvertures stomatiques quand ils sont ouverts. Cette évaporation, qui s'appelle "transpiration" pour les êtres vivants, est en principe impérative de jour car elle refroidit les feuilles. Elle entraîne par ailleurs une circulation de l'eau dans la plante, des racines vers les feuilles: la transpiration est ainsi "*le moteur de la plante*", lui permettant de puiser les éléments nutritifs du sol et de les remonter.

Cependant, si la plante a des difficultés pour puiser l'eau du sol (Réserve Facilement Utilisable épuisée) à la même vitesse que le climat l'exige, elle a le pouvoir de diminuer sa transpiration en fermant plus ou moins ses stomates. La fermeture des stomates entraîne cependant un ralentissement de la photosynthèse et donc, de la production de matière sèche : la plante souffre au point de diminuer le rendement. Et à l'extrême, si ses feuilles et ses organes chauffent trop et trop longtemps, des fonctions physiologiques et enzymatiques peuvent être altérées.

La combinaison de ces deux processus séparés, par lesquels l'eau pourrait se perdre d'une part du surface de sol par évaporation ou d'autre part se perdre par la transpiration végétale. Ce dernier processus est désigné sous le nom de « *l'évapotranspiration* » qui correspond à la quantité d'eau utilisée par la plante et son environnement et détermine le « *besoin en eau de culture* ».

I.2.5.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

La valeur de la demande atmosphérique en eau est évaluée par le biais d'une évapotranspiration potentielle de référence, *ETo*. Auparavant, on utilisait le sigle ETP. L'évapotranspiration potentielle est définie comme l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, continu et homogène (le gazon). Pour ce gazon "standardisé" l'évapotranspiration potentielle ne dépend donc que du climat. En général, *ETo* varie dans les régions tropicales entre 2 mm/jour et 7 mm/jour.

Dans le passé, les valeurs d'*ETo* étaient obtenues en effectuant des mesures très précises de bilan hydrique d'un gazon standard (Fétuque Manade) bien irrigué à l'aide de dispositifs spéciaux (lysimètres).

Mais actuellement, différentes formules physiques sont établies (calibrées et validées par comparaison aux mesures sur lysimètres) permettant de déterminer les valeurs d'*ETo* en fonction des paramètres climatiques: formules de Penman, Blaney Criddle, Hargreaves. A l'heure actuelle, un standard universel est

préconisé: la formule de Penman-Monteith. Elle est considérée comme la plus fiable (FAO, 1998).

➤ La formule de Penman-Monteith

La formule de Penman-Monteith se distingue parmi tant d'autres par son origine théorique dérivée du bilan de flux énergétique à la surface de couvert végétal. Dans un souci de normalisation, la FAO, à travers son groupe d'experts opérants dans différents contextes climatiques, a adapté la formule de Penman-Monteith aux conditions où le sol est couvert de gazon et propose la formule dérivée comme la nouvelle définition de l'évapotranspiration de référence.

La formule Penman-Monteith FAO se présente comme suit:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (14)$$

Avec Δ pente de la courbe de pression de vapeur saturante de l'eau (kPa/°C).

R_n rayonnement net (bilan radiatif) (MJ/m²/jour).

G flux de chaleur sensible dans le sol (MJ/m²/jour).

U_2 vitesse moyenne du vent du jour à 2 m (m/s).

E_s pression de vapeur saturante (dépend de T) (kPa).

E_a pression réelle de vapeur saturante (kPa).

T température moyenne du jour (à 2 m) (°C).

γ constante psychrométrique.

En résumé, la formule de Penman-Monteith implique la connaissance des paramètres météorologiques suivants:

- Les températures maximale et minimale, à défaut la moyenne (mais on perd en précision dans les calculs de E_s et E_a).
- Les humidités maximale et minimale, à défaut la moyenne (mais on perd en précision dans les calculs de E_s et E_a).

- Le vent moyen du jour mesuré à 2 m de haut, ou à défaut le vent à une autre hauteur (souvent mesuré à 10 m) sachant qu'il existe des formules de passage pour déterminer le vent à 2 m.
- Le rayonnement net, ou à défaut le rayonnement global, ou à défaut la durée d'insolation.

I.2.5.3. L'évapotranspiration réelle (ETR)

C'est la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur d'eau par une surface ou un couvert végétal et qui s'exprime usuellement en mm/jour.

L'ETR dépend :

- de la culture considérée,
- du stade phénologique de cette culture,
- du contenu en eau du sol,
- des conditions météorologiques observées.

L'évapotranspiration réelle d'une culture peut être affectée par l'état de son système aérien et racinaire et par son stade de développement physiologique (croissance active, floraison, maturation). Ces paramètres biologiques influencent de façon décisive la régulation de l'évapotranspiration réelle plus ou moins indépendamment de l'état hydrique du sol. En effet, si le système aérien est peu développé, les capacités de transpiration de la plante sont réduites.

I.2.5.4. L'évapotranspiration maximale (ETM)

L'évapotranspiration maximale (ETM) est la valeur de l'évapotranspiration réelle, dans le cas où l'alimentation en eau de la plante est bonne et où son développement est optimal. Lorsque l'eau ne constitue plus un facteur limitant au niveau de l'absorption des racines, la régulation stomatique devient minimale.

L'ETM dépend donc :

- de la culture considérée,
- du stade phénologique de cette culture,
- des conditions météorologiques observées.

Parfois la terminologie "évapotranspiration potentielle de la culture" (ETPc ou EPC) s'utilise au lieu de l'ETM. Le rapport entre ETM et l'évapotranspiration potentielle de référence (ETP) varie au cours du cycle de la culture, principalement en fonction de la biomasse et de la morphologie des cultures. Ces paramètres dépendent de la fertilité du sol, de l'espèce utilisée, et d'une manière générale, de toutes les pratiques culturales. La demande en eau de la culture reste également en fonction de tous ces facteurs.

Au cours de sa phase de croissance végétative, la physiologie de la plante si elle ne souffre pas d'un déficit hydrique limite peu ses échanges gazeux (vapeur d'eau et gaz carbonique) par les stomates. Mais, au moment de la maturation, la plante réduit sa transpiration en fermant partiellement ou totalement ses stomates. Il n'est pas facile de tenir compte explicitement tous ces facteurs.

I.2.5.5. Les coefficients culturaux

Les agronomes ont cherché à comparer, dans des conditions similaires de bonne alimentation en eau, l'évapotranspiration maximale d'une culture donnée, à un stade phénologique donné, avec l'évapotranspiration potentielle.

$$\text{ETM} = K_c \text{ ETo} (= K_c \text{ ETP}) \quad (15)$$

Le coefficient cultural K_c varie le plus souvent entre 0,4 et 1,4 suivant le type de culture, son stade de développement et le type de climat. (cf. A III, chap 2, p iii). Cette variation temporelle indique que ce coefficient :

- est minimum au début du développement de la culture,
- augmente avec la croissance du végétal et l'augmentation du couvert végétal, et passe par un maximum au moment du stade adulte pendant la phase de reproduction (floraison et formation du grain),
- il décroît jusqu'à la récolte.

Les coefficients culturaux importants (supérieurs à 1) correspondent au fait que l'indice foliaire est élevé (surface des feuilles supérieure à la superficie du sol) et que la plante a une faible régulation stomatique.

Les besoins en eau d'une culture varient non seulement selon son développement végétatif, mais aussi selon :

- ✓ Les variétés : celles à cycle long utiliseront plus d'eau ; certaines résisteront mieux à la sécheresse ;
- ✓ Les conditions climatiques et, en particulier, le vent : l'évapotranspiration d'une culture sera réduite si elle se trouve dans une parcelle entourée d'arbres qui coupent le vent et ombragent en partie la culture ;
- ✓ Les techniques culturales : densité, date de semis, fertilisation, travail du sol.

DEUXIEME PARTIE

DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DU MODELE

II.1. Présentation du modèle

II.1.1. Principe générale

Les objectifs du modèle AMS se situent principalement dans le suivi agrométéorologiques des campagnes agricoles et la prévision des rendements. La prévision sous-entend la prédiction des rendements et d'éventuels problèmes pouvant être survenus suite à une variation d'un facteur climatique (situation de stress ou d'excès en eau). De plus, le modèle AMS se veut être :

- Un outil pouvant être intégré dans les systèmes d'alerte précoce tant nationaux, régionaux qu'internationaux ;
- Un modèle bien documenté et facile d'accès. Actuellement il reste d'utilité publique c'est-à-dire utilisable par tous et est téléchargeable gratuitement sur le Web à l'adresse : <http://www.hoefsloot.com/agrometshell.htm>.
- Un lien entre différentes sources de données qui peuvent être utiles dans le domaine de la sécurité alimentaire et des systèmes d'alerte à savoir : des données socioéconomiques, climatiques, satellitaires, cartographique, ainsi que celles relatives aux cultures ;
- Une interface pouvant utiliser facilement des fichiers provenant d'autres logiciels (Windisp, Microsoft Access, Microsoft Excel, Microsoft Word et USGSDailyrainfall.exe).
- Un outil ouvert où chacun peut apporter sa contribution pour son amélioration et la cause de la sécurité alimentaire. Ceci peut se faire à partir de la commande *My menu/ add program or command file*.

AMS est un outil développé spécialement par la FAO et qui permet le suivi agrométéorologique des cultures. Son développement a débuté dans les années 1980 afin de trouver un outil qui permettrait d'estimer les rendements dans une optique d'alerte précoce. A l'époque, le prédicteur principal de rendement était le WRI (Water Requirement Index), mais avec le développement de AMS d'autres paramètres issus du modèle de bilan hydrique (CSSWB : Crop specific soil water balance) peuvent à présent être utilisés pour étudier la corrélation entre les conditions pluviométriques et le rendement.

Le modèle CSSWB est un modèle de bilan hydrique simple utilisé pour estimer l'impact des conditions climatiques sur les cultures. Il constitue le cœur du fonctionnement du modèle AMS. Dans ce modèle CSSWB, le bilan hydrique est calculé pour un pas de temps décadaire en général. Le pas de temps de 10 jours (une décade) est suffisant pour estimer avec une précision acceptable le bilan hydrique dans un but agrométéorologique.

II.1.2. Description

Conçu par le Hollandais Peter Hoefsloot pour le compte de la FAO, le modèle AMS est un modèle de suivi de culture qui utilise des données agrométéorologiques pour faire ses prévisions. Celles-ci peuvent être faites au pas de temps journalier, mais l'utilisation de pas de temps décadaire ou mensuel est également possible.

Le modèle se fonde sur l'influence des facteurs climatiques pour exprimer la variation des rendements, notamment la pluviométrie. Des relations empiriques sont établies à partir du calcul de la balance en eau pour avoir le rendement.

Quand l'indice de satisfaction en eau à un moment du cycle de la culture n'est pas égal à 100%, c'est-à-dire quand les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration réelle, le modèle simule l'utilisation de l'irrigation pour compenser le manque d'eau. L'irrigation, considérée comme une lame d'eau et

exprimée en millimètre, peut être simulée en mode automatique ou en mode manuel.

En mode automatique, on apporte une quantité d'eau qui compense le déficit ; il devrait y avoir suffisamment d'eau pour effectuer une telle opération et la gestion de l'eau est supposée rationnelle, c'est-à-dire qu'on ne fournit pas une quantité supérieure aux besoins. Dans un tel système, l'indice de satisfaction en eau restera à son maximum tout au long de la saison.

En mode manuel, la lame d'eau apportée est fixée à une certaine hauteur. L'eau est administrée aux cultures suivant sa disponibilité. Dans cette situation, elle peut être apportée en surplus, en quantité suffisante ou insuffisante.

Le modèle AMS fait aussi des simulations sans irrigation. Avec des informations fiables prouvant l'absence des moyens d'irrigation au niveau de la zone d'étude, il vaut mieux de concevoir le modèle sans apport artificiel d'eau.

Le modèle AMS fonctionne avec des données ponctuelles venant d'une ou de plusieurs stations et peut interpoler spatialement les résultats.

Le nombre d'années n'est pas défini, il doit être supérieur à deux. Le modèle AMS présente la possibilité de travailler avec plusieurs stations sur une année de données ou avec une seule station sur plusieurs années. Des observations sur plusieurs années sont alors nécessaires.

L'équation est la suivante :

$$W_t = W_{t-1} + R - ET_c - (r + i) \quad (16)$$

Avec : W_t , la quantité d'eau stockée dans le sol au moment t

W_{t-1} , la quantité d'eau stockée dans le sol à la fin de la période précédente $t-1$

R , la quantité de pluie cumulée sur la période de temps t (souvent une décade)

ET_c , l'évapotranspiration potentielle de la culture sur la période t

r , la perte d'eau due à l'écoulement sur la période t

i , la perte d'eau liée à la percolation profonde sur la période t

Généralement, on ne tient pas compte de la pluie effective dans ce modèle. La pluie effective est estimée à 100%. Seul l'apport d'eau lié à la pluie est considéré (et pas l'apport d'eau lié au ruissellement). L'équation (16) peut alors être réduit à :

$$W_t = W_{t-1} + R - ET_c \quad (17)$$

Le contenu en eau du sol, les termes W_t et W_{t-1} de l'équation (17), représente la quantité d'eau stockée dans la zone racinaire de la plante. L'humidité du sol est supposée nulle au début de la saison de croissance. Si W_t est supérieur à la capacité de teneur en eau facilement disponible du sol alors il y a un excès d'eau pour la période t . Si W_t est inférieure à la capacité de teneur en eau facilement disponible du sol, il y a un déficit d'eau pour la période t .

II.1.3. Les données d'entrées

Comme dans tout modèle, le modèle AMS produit des résultats à partir de données qui lui sont assimilées. Ces données peuvent être importées d'une base de données structurée sous forme de fichiers ASCII ou sous forme d'images. L'intégration de ces données peut se faire aussi de façon manuelle, notamment quand on veut ajouter ou enlever une ou quelques stations à une liste déjà

présente dans la base, ou encore compléter ou modifier certaines informations concernant une station. Le modèle comprend une agrégation des fichiers, précisant pour chaque importation une identité à la station, sa localisation en termes de latitude, de longitude et de son altitude. Quant aux types de données, elles peuvent être des données agronomiques, des données satellitaires et des données administratives.

Les données agronomiques concernent :

- la date de plantation, qui est exprimée en décades et peut être calculée par le modèle ou définie par l'utilisateur.
- la durée du cycle de culture (en décades), qui est intégrée dans le modèle sous forme d'option à remplir manuellement. Elle est fonction de la culture et pour une même culture en fonction de la variété.
- la réserve en eau utile du sol est un paramètre qui peut, comme le deuxième, être entré manuellement.

Les données satellitaires sont des images satellitaires traitées dans Windisp, et **les données administratives** sont des images relatives aux limites administratives qui peuvent être aussi importées et servir comme fond de carte déjà géo référencé pour localiser spatialement la portion de territoire concernée par une situation particulière.

II.1.4 Les sorties du modèle AMS

Elles sont diverses. Ce sont des cartes montrant la répartition d'un facteur, des résultats tabulés, des graphes pouvant ressortir une évolution temporelle, des bulletins prédéfinis dans MS Word. La plupart de ces sorties seront vues au chapitre qui traite des différentes utilisations du modèle.

II.1.5 Particularités d'AMS

Dans cette partie, pour faire ressortir les caractéristiques spécifiques au modèle AMS, on va le comparer avec WOFOST (*world food study*) qui est aussi un modèle de suivi des cultures et de prévision de rendement.

II.1.5.1. Brève présentation du modèle WOFOST

Le modèle WOFOST est un autre modèle de suivi des cultures et de prévision de rendement. Ce modèle est basé sur les conditions agro-écologiques en vue des prévisions concernant notamment :

- la teneur en eau du sol ;
- la quantité d'éléments minéraux disponibles et la fraction assimilée par la culture ;
- le type de sol ;
- l'interception de la lumière solaire ;
- l'assimilation de CO₂, etc.

En termes d'hierarchisation, le modèle WOFOST peut se faire trois niveaux de prévision avec les mêmes paramètres d'entrées : une production potentielle où l'on suppose qu'il n'y a pas de facteurs limitants; un niveau de production limitée par la disponibilité en eau et par les éléments fertilisants. Ce modèle essaye de comprendre le mécanisme du système. C'est un modèle conceptuel.

II.1.5.2. Le modèle AMS

Bien que les deux modèles aient le même objectif, ils n'ont pas les mêmes perceptions en ce qui concernent les facteurs qui peuvent affecter la production agricole. Le modèle AMS soutient l'idée qu'un niveau de rendement obtenu dans une zone donnée peut être expliqué par son contexte agroclimatique. Ainsi, l'accent est mis sur l'eau (pluviométrie, teneur en eau du sol, irrigation, satisfaction en eau des cultures).

Ce modèle qui se rapproche d'une boîte noire fait allusion au développement de la plante en se référant à sa consommation d'eau à chaque stade. Il ne s'intéresse pas cependant aux échanges qui se font entre la plante et son milieu. Le modèle AMS n'est pas hiérarchisé car le choix des paramètres lors d'une simulation ne peut donner lieu qu'à un seul niveau de prévision.

Les deux modèles n'utilisent pas les mêmes hypothèses : ce modèle Wofost part de l'idée que les conditions de fertilité sont les mêmes partout alors que AMS ne tient pas compte de celles-ci et admet que le rendement est déduit par des relations de régression c'est-à-dire des relations établies entre le rendement et des indices tels que l'indice de satisfaction en eau, l'évapotranspiration actuelle, etc.

II.2. Méthodologie avec le modèle AMS

II.2.1. Documentation

Les travaux effectués consistent des séances de présentations du modèle, des rapports traitant de l'utilisation du modèle AMS dans le suivi agricole pour des pays ou des provinces. Des documents ont servi de manuel d'apprentissage et ont permis d'avoir une maîtrise plus rapide de ce modèle. Parfois, pour certaines applications, une adaptation de ce qui a été fait en fonction des données disponibles.

II.2.2. Apprentissage d'AMS

Pour commenter le logiciel, il faut l'apprendre. Comment les données doivent être organisées avant d'être importées et utilisées pour le faire tourner, les menus ont été utilisés par la pratique d'exercices.

II.2.3 Données utilisées

Les données utilisées concernent celles de la région Bongolava. Elles s'étendent sur une période de 18 ans allant de 1990 à 2007. Ce sont les données de précipitations, d'évapotranspiration potentielle, les températures minimum et maximum. Toutes ces données utilisées sont de types décadaires. Les données sur le rendement de la culture du riz pluvial ont été aussi employées. Ces données sont obtenues auprès de la Direction régionale de Développement Rural de Bongolava.

Les informations relatives à cette culture, à savoir la variété et le calendrier cultural étaient aussi nécessaires afin de rapprocher la simulation le plus possible de la réalité. On suppose dans toutes les simulations que les dates de plantations s'étendent durant la première décade du mois de Novembre (31^{ème} décade de l'année).

Les informations sur les types de sols n'étaient pas disponibles durant notre travail ; ainsi, il a été décidé d'attribuer une capacité de rétention en eau du sol fixe de 100mm (destiné seulement pour un sol ferralitique. (*source* : Manuel d'agronomie tropical appliqué à l'agriculture Haïtienne en 1990). Ce choix a été justifié par le fait que la région Bongolava est marquée par la dominance d'un sol ferralitique couvert par de faible couverture végétale. (*Source* : monographie 2002).

II.2.4 Traitements des données

Les traitements des données concernent leur mise en forme sur Ms Excel afin qu'elles puissent être importées dans le modèle AMS. Les fichiers ont été enregistrés en format CSV qui utilise le point-virgule comme séparateur.

II.2.4.1. Méthode d'estimation directe de rendement

Cette prévision peut être faite pour une petite région agricole en utilisant les données moyennes. Après la mise en œuvre du modèle AMS, on extrait les résultats obtenus lors du traitement sur Excel et on essaie d'expliquer le rendement à partir de l'une de ses sorties. En d'autres termes, on cherche à avoir une régression linéaire dans laquelle le rendement est directement défini en fonction d'un paramètre de sortie qui peut être :

- L'indice de satisfaction en eau à la récolte (ou à la dernière décade),
- L'excédent ou le déficit d'eau aux phases initiale, végétative, de floraison, de remplissage ou de l'ensemble de la saison
- L'évapotranspiration réelle à ces phases ou sur l'ensemble.

II.2.4.2. Prise en compte de tendance

Une autre méthode consiste à prendre en compte la tendance qui existe au niveau de la série de rendements annuels. Pour ce faire, le rendement du riz s'exprime en fonction du temps pour obtenir une tendance de type

$$y = a x + b \quad (18)$$

où y est le rendement et x l'année ; a et b sont définis automatiquement dans Ms Excel.

Pour obtenir cette expression, les 13 premières années de 1990 à 2002 sont prises en compte. Les 5 dernières étant utilisées pour une prévision et pour une validation (2003-2007). Ensuite, on cherche le paramètre de sortie ayant la meilleure corrélation avec le rendement. On exprime le rendement en fonction de chaque paramètre et la corrélation qui donne le plus grand coefficient de corrélation R^2 est retenue.

Le rendement étant influencé par un très grand nombre de facteurs, pour garder l'influence du seul facteur choisi, on doit enlever la tendance en utilisant la relation suivante :

$$R_{det} = R_{obs} - R_{ten} \quad (19)$$

avec :

R_{det} : rendement détendancé ;

R_{obs} : rendement observé, c'est le rendement obtenu réellement sur terrain ;

R_{ten} : rendement tendancé. Il est obtenu en remplaçant x de l'équation (18) par l'année en question.

Ce rendement détendancé, une fois obtenu, sera exprimé en fonction de la variable de sortie qui a été choisi par une relation linéaire de type

$$R_{det} = c \cdot t + d \quad (20)$$

avec R_{det} : rendement détendancé

c et d : des constantes.

t : le paramètre de sortie de AMS ayant la meilleure corrélation avec le rendement. Il s'agit des mêmes paramètres cités plus haut, à savoir : l'indice de satisfaction en eau à la récolte, l'évapotranspiration totale ou suivant les phases du développement de la culture, le déficit ou l'excès en eau de l'ensemble du cycle (initial, végétatif, floraison et récolte).

Un rendement simulé est obtenu en définissant une nouvelle expression du rendement à partir des équations (16) et (18), et en fonction des paramètres constitués par l'année et le facteur explicatif mentionné plus haut.

$$R_{dt \text{ sim}} = a \cdot x + b + (c \cdot t + d) \quad (21)$$

La validation est réalisée avec les données de rendements qui n'ont pas été utilisées dans les calculs, c'est-à-dire les 5 dernières années de la série. Au cours de cette étape, on a déterminé une nouvelle corrélation, celle qui existe entre les rendements simulés et ceux observés de chaque année. Elle est d'autant plus satisfaisante que le R^2 se rapproche de l'unité.

II.3. Analyse du modèle AMS

L'utilisation du modèle AMS permet de révéler certains aspects intéressants qui peuvent pousser au gestionnaire de risques naturels à l'adopter pour faire suivre les cultures et la prévision des rendements. Cependant, comme tout système, le modèle AMS présente des points forts et des points à améliorer.

II.3.1. Les points forts du modèle AMS

II.3.1.1. La rapidité de la prévision

C'est un modèle nécessitant plusieurs types de données pour faire des analyses et que celles-ci peuvent provenir de diverses sources. Ce modèle donne la possibilité de comparer différents résultats aux rendements afin de voir l'influence de chaque facteur climatique au cours de la saison de culture.

Ce modèle peut être utilisé par quelqu'un qui a une simple compréhension des phénomènes d'échanges dans la trilogie sol-plante-atmosphère. Il ne nécessite pas une maîtrise en détail des concepts de physiologie végétale, de nutrition minérale, etc.

Le modèle peut être utilisé dans le suivi de tout type de culture (cultures saisonnières, annuelles) pourvu que les données soient disponibles pendant tout le cycle. Il est aussi adapté tant pour les systèmes de production traditionnels que modernes.

Etant donné que le modèle AMS se base sur le besoin en eau des cultures, il y a possibilité de simuler des rendements pour des cultures associées. Il faut donc de nouvelles données de rendement car celles-ci ne sont pas nécessairement les mêmes en culture pure. Le coefficient cultural de chaque phase doit être néanmoins réajusté. Ceci demeure une grande opportunité parce que, dans la plupart des pays en développement, les agriculteurs luttent pour la subsistance et pratiquent des cultures associées. Elle pourrait aider à comptabiliser ces récoltes dans le bilan de la production.

Le modèle AMS aide dans l'établissement des équations simples de régression, c'est-à-dire des relations empiriques entre le rendement et certains facteurs comme, par exemple, l'évapotranspiration réelle. Une fois que cette relation existe, la détermination du rendement se fait très rapidement.

Ce modèle garde en mémoire les dernières opérations à l'aide du bouton  History. Près d'une cinquantaine d'opérations y sont mémorisées avec une précision sur la date et l'heure de chacune d'elles. Cela facilite la reprise d'une même opération en un seul click sans reprendre le chemin normal.

II.3.1.2. La gestion et le traitement des données

Le modèle AMS présente aussi d'autres avantages. En ce qui concerne l'importation et l'exportation d'informations, il constitue une interface d'échange avec plusieurs systèmes d'exploitation (Windisp, Ms Excel, MS Word, Ms Access et Bloc notes). A partir desquels, les paramètres de sorties du modèle peuvent être directement récupérés. Les données qui sont importées dans le modèle AMS sont préalablement traitées dans ces logiciels et enregistrées aux formats et extensions convenus tels : csv, dat; ce qui représente une très forte opportunité par le fait que ce sont des logiciels populaires et très utilisés.

Le modèle AMS participe à la gestion des fichiers agrométéorologiques qui peuvent être parfois volumineux car une fois importés, ces fichiers y sont stockés et sont réutilisables pour d'autres simulations. Quand ces fichiers sont installés sur un poste informatique, ils deviennent une base de données à part entière et agrandissent à chaque sauvegarde de nouvelles données. Le calcul du bilan se fait par l'acquisition de ces nouvelles données. Les cultures sont alors suivies pas à pas.

Le modèle AMS permet de compléter les données manquantes au niveau d'une station. Il les remplace par des données normales ou moyennes. Ce procédé facilite d'autres domaines d'activité utilisant des données climatiques autres que le domaine agricole. Ces données, une fois complétées, peuvent être soumises à des analyses statistiques pour d'autres fins.

Le modèle AMS se veut être un outil qui se rapproche un peu de la réalité, notamment dans le choix de certains paramètres. Si, par exemple, la durée du

cycle est trop restreinte, AMS ne va pas pouvoir faire le bilan hydrique même si les autres informations sont correctes.

III.3.2 Les limites de l'outil AMS

Le plus grand problème du modèle AMS repose sur l'absence d'un menu d'aide complet. Pour surmonter les difficultés liées à son utilisation, on est tenu à rechercher des informations disséminées dans plusieurs sources. Le modèle AMS ne permet pas de calculer le bilan si les données sont stockées sur un support amovible (cd, clé, USB, disquette), il faut que les données soient dans la base du modèle avant de procéder à tous calculs. Si son utilisateur change d'ordinateur, il lui faut reprendre les importations afin de pouvoir travailler.

Après chaque nouvelle configuration générale (dans le menu *edit*) c'est-à-dire après avoir défini les limites et l'image qui doivent s'afficher à la visualisation d'un paramètre, il est nécessaire de fermer AMS puis de le relancer. Cette fermeture complète représente une perte de temps pour que la nouvelle configuration puisse être effective.

Etant donné qu'il y a échange entre le modèle AMS et d'autres systèmes d'exploitation pendant l'importation et l'exportation d'informations, sa manipulation complète nécessite un minimum de connaissance des logiciels qui l'épaulent.

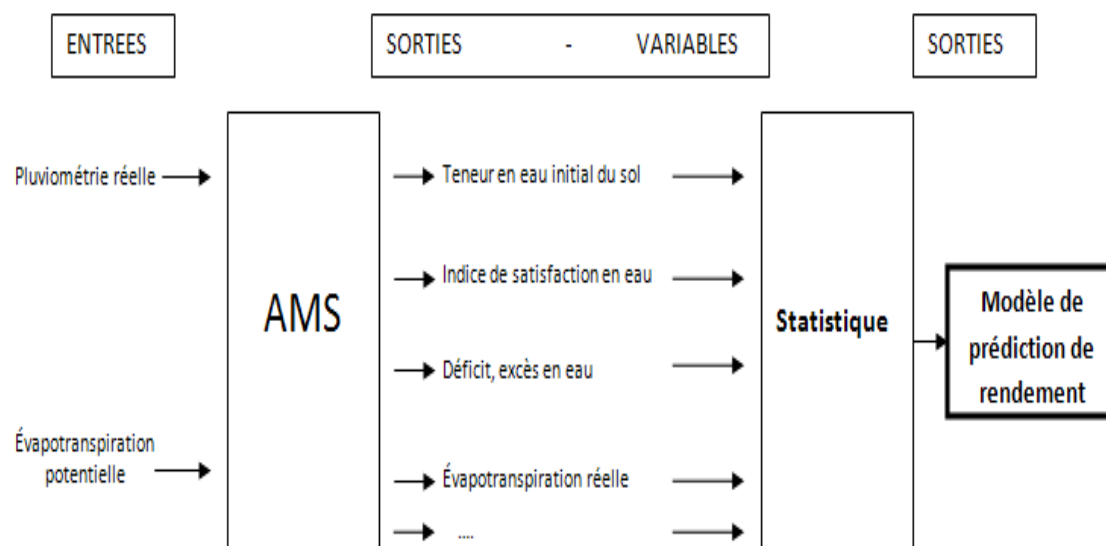


Figure 3: Approche globale méthodologique avec Agrometshell

TROISIEME PARTIE

TROISIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Utilisation de ce modèle AMS pour la prévision des rendements dans la région Bongolava

C'est une application concrète d'une mise en place du modèle. Cet exemple peut être intégré dans le tutorial qui devait accompagner le logiciel.

III.1.1 Présentation de la région Bongolava

III.1.1.1. Localisation

La Région de Bongolava comprend deux districts (Tsiroanomandidy et Fenoarivobe), elle est composée de 26 communes dont: 18 dans le District de Tsiroanomandidy et 8 dans le District de Fenoarivobe. Tsiroanomandidy, le chef-lieu de Région, se situe à 219 Km de la capitale Antananarivo en prenant la RN 1 Bis.

La Région de Bongolava qui fait partie du Moyen-Ouest de la Province d'Antananarivo est limitée par les coordonnées géographiques suivantes :

- Entre 17,76° et 19,46° de latitude Sud
- Entre 45,48° et 47,08° de longitude Est.

Elle est délimitée par les régions de :

- Melaky de la Province de Mahajanga, au Nord-Ouest
- Analamanga notamment la sous-préfecture d'Ankazobe, au Nord-Est
- Itasy, à l'Est
- Vakinakaratra, sous préfecture de Betafo, au Sud
- Menabe, sous préfecture de Miandrivazo, au Sud-Ouest

(cf. A VI, Chap2, p xix)

III.1.1.2. Reliefs et paysages

La région du Bongolava figure parmi les Hautes Terres centrales de Madagascar. Elle constitue la zone du Moyen-Ouest de la Province d'Antananarivo. La géomorphologie générale de la région est marquée par des surfaces d'aplanissement résultant de l'altération profonde des migmatites ou des gneiss d'âge précambrien. Lesquels se trouvent, sur de vastes étendues et découpés en croupes, de largeur variant entre 150m et plus de 900m selon le degré d'érosion régressive des cours d'eau.

Partout s'étend une large étendue de plateau succédé par des vallons et des thalwegs bien hiérarchisés. L'altitude s'abaisse rapidement à 1 500 m du Tampoketsa de Fenoarivobe à 800 m sur les marges occidentales.

Au sommet du relief, s'exigent des sols ferralitiques rajeunis. Sur les versants, suivant la vigueur de la pente et l'intensité des feux de brousse, se rencontrent fréquemment des glissements de terrains, aboutissant à la formation de « *lavaka* » qui évoluent de manière régressive jusqu'à ce qu'ils soient stabilisés. Sur les bas fonds, le relief est composé de vaste surface plane associée à un sol hydromorphe.

III.1.1.3. Géologie

Le sous-sol de la région Bongolava de, de par sa situation sur la bordure Nord-Ouest des Hautes centrales, est généralement constitué de :

- Granites et migmatites du Tampoketsa (Nord)
- Infra-graphite du groupe Ambodiriana, caractéristique du Moyen-Ouest de la Province d'Antananarivo.

Sur ce sous-sol, des formations diverses se sont constituées entre autres :

- les hautes pénéplaines latéritiques ou hautes surfaces d'érosion non encrotées sur roches acides.

- les pénéplaines latéritiques en surface d'aplanissement d'altitude moyenne sur socles acides.

Ces formations caractérisent la partie Ouest de la Province dont l'altitude varie de 800 à 1000 mètres.

- le relief granito-gneissique à enclave basique éparse sur hautes terres latéritiques ondulées.
- les cuvettes et plaines alluviales :
 - les cuvettes lacustres résultant des activités volcaniques, des coulées de lave ayant obturé des vallées et retenus, ainsi que des eaux qui s'accumulent en arrière. Certaines cuvettes étaient autrefois reliées entre elles. Ces zones d'alluvions lacustres, généralement fertiles, jouent un rôle important pour l'occupation humaine.
 - les plaines alluviales le long des fleuves généralement aménagées en rizières.

III.1.1.4. Le climat

La région de Bongolava connaît un régime climatique tropical d'altitude, supérieure à 900 mètres. La température moyenne annuelle y est inférieure ou égale à 20°C.

L'année comporte deux saisons bien distinctes, l'une pluvieuse (saison humide et chaude), de novembre en mars avec une température qui varie de 20°C à 30°C et l'autre fraîche et sèche de mi-avril à mi-octobre de température 13°C à 26°C et même plus.

III.1.1.4.1. Les réseaux de stations météorologiques

Dans la région de Bongolava, la plupart des stations ne sont plus fonctionnelles, et une douzaine est à réhabiliter.

Notre relevé météorologique a donné la situation suivante :

STATION	LONGITUDE EST	LATITUDE SUD	ALTITUDE(M)	MESURE EFFECTUEE		OBSERVATIONS
				T	P	
Tsiroanomandidy						
Tsiroanomandidy	46'03	18'045	900	-	-	à réhabiliter
Kianjasoa	46'22	19'05	1000	-	-	à réhabiliter
Akadinondry	46'27	19'01	940	-	-	non fonctionnelle
Fenoarivobe						néant

Tableau 3: Listes des stations météorologiques

Source : monographie Antananarivo 2001

III.1.1.5. Hydrologie

Une partie importante des principaux fleuves de Madagascar traverse la région de Bongolava, entre autres :

- la Mahajilo et ses affluents (la Mania, la Kitsamby, la Sakay qui traverse la commune d'Ankadinondry Sakay, limite orientale de la sous-préfecture de Tsiroanomandidy)
- la Manambolo et ses affluents traversant la région du Bongolava.

III.1.1.6. Sols et végétation

La région Bongolava est caractérisée par la dominance des sols ferrallitiques avec la présence d'une faible couverture végétale :

- Les sols ferrallitiques qui couvrent une grande partie de la région se sont évolués d'une manière très diverses, allant des argiles latéritiques, relativement fertiles, jusqu'aux cuirasses des Tampoketsa, imperméables, dépouillées d'éléments utiles, crevassées de « lavaka ». Dans l'ensemble, ces sols sont compacts, fragiles, difficiles à travailler. Néanmoins, convenablement amendés, ils peuvent être transformés en terrain de culture de maïs, de manioc, et se prêtent à la culture de pommes de terre et à l'arboriculture.

- Les sols alluviaux, n'occupant qu'une place restreinte, se rencontrent dans les cuvettes. Dans le Moyen-Ouest, ils sont essentiellement réservés à la riziculture.

Les sols de la région Bongolava se dégradent rapidement surtout ceux aux alentours de Tsiroanomandidy à cause de leur exploitation incessante au fil des années et nécessitant des apports d'amendements chimiques et surtout organiques.

Les sols de tanety en table sont soit du type ferralitique brun jaune développés sur les surfaces d'aplanissement du tertiaire, soit du type ferralitique brun rouge formés à partir des glacis quaternaires. Ils sont reconnus pour leur bonne capacité d'échange et donnent en général de bons rendements aux cultures pluviales classiques de tanety, mais la faible profondeur de l'horizon organique nécessite l'apport d'engrais. Ce terroir de plateaux à forte dominante graminée (*Heteropogon contortus*) subit de façon chronique les effets néfastes des feux de brousse. Les sol de bas fonds sont du type *hydromorphes* minéraux à moyennement organiques aptes avant tout à la riziculture irriguée, puis aux cultures de contres saison (légumineuses, cultures maraîchères et fourragères), sous réserve de possibilités d'irrigation..

III.1.2. Simulations pour le suivi du riz pluvial

A part l'évapotranspiration potentielle, les simulations sont faites à partir des données climatiques obtenues auprès des différents sites web, fournisseur des données sur internet. L'évapotranspiration potentielle s'est calculée selon la formule de Penman en utilisant seulement les températures maximale et minimale.

Paramètres	Source (site)
*-Précipitations mm/jours)	CMPO (pentade)
*-ETP (mm/jours)	Calculée
**-Température max (°C)	NCEP (journalier)
**-Température min(°C)	NCEP (journalier)
*-Rendement(t/Ha)	DRDR Tsiroanomandidy

Table 4: Tableau récapitulatif de sources de données

*- Données utilisées par AMS pour la simulation

**- Données utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle(ETP)

III.1.2.1. Processus de préparation de bilan en eau

Afin d'expliquer la variation du rendement en fonction des paramètres climatiques au niveau local, le calcul du bilan hydrique s'effectue à partir des données disponibles dans cette région sur plusieurs années. Dans ce travail, seule la démarche sur les données disponibles dans la région Bongolava sera présentée.

Etape 1 :

On va dans le menu *Water balance* et on choisit *Risk analysis run / New* (cf. A V, chap. 1, p viii).

Etape 2 :

Dans la fenêtre qui s'affiche, écrire dans la première ligne le nom de l'analyse (cf. A V, chap. 2, p viii). En l'occurrence, ce nom est ***analyse_Tsididy***. A la deuxième ligne, utiliser le menu déroulant pour sélectionner la station qui va être utilisée: ***BONGOLAVA***.

Etape 3 :

Choisir l'intervalle de temps dans lequel on veut travailler.

1990 et 2007 désignent donc le début et la fin de notre durée de temps de travail.

Etape 5 :

Choix de la culture que l'on veut étudier.

Le choix porté sur *l'upland rice* a été justifié par sa correspondance au système de riziculture pluviale, sans irrigation.

Il existe en fait deux systèmes de rizicultures différentes dans l'AMS :

- Flooded rice
- Upland rice

III.1.2.2. Calcul du bilan hydrique

Après la validation des choix ainsi effectués, il va falloir remplir les colonnes du tableur affiché (cf. An V, chap. 4, p ix).

La date de plantation à Tsiroanomandidy dépend du début de la saison pluvieuse, qui va être mentionnée manuellement dans la première colonne. La durée du cycle du riz pluvial a été fixée à 120 jours soit 12 décades. Dans la deuxième colonne, cette valeur se fait entrée automatiquement parce qu'elle sera la même sur toute la colonne. (cf. A V, chap3, p ix).

Il en est de même pour les autres valeurs qui concernent :

- le « Water holding capacity of the soil » (en mm): 100 (capacité de retention en eau du sol),
- le « Percentage effective rainfall »: 61 (pourcentage de pluie efficace par rapport à la pluie réelle),
- le « Pre-season Kcr » : 0.13 (coefficient cultural du sol nu),
- l' « Irrigation application » : 0

En admettant que K_{cr} , égal à celui de la première décade du cycle du riz pluvial est déjà incorporé dans le modèle AMS, lors de la période de semis. (Voir *menu/crop coefficient/Upland rice*). Et on clique sur *Save and Run* pour faire tourner le bilan et pour sauvegarder les fichiers qui en résulteront.

La pluie efficace était calculée à partir de l'équation **FAO/AGLW** :

$$\begin{array}{ll} P_{eff} = 0.6 P - 10 & \text{pour } P_{mois} \leq 70 \text{ mm} \\ P_{eff} = 0.8 P - 24 & \text{pour } P_{mois} > 70 \text{ mm} \end{array} \quad (22)$$

III.1.2.3. Enregistrement et visualisations des résultats

Dans la fenêtre qui suit l'opération précédente, Il faut mentionner le nom de l'analyse dans la première ligne, le répertoire où les fichiers résultats seront enregistrés, ainsi que le pas de temps dans lequel on travaille (cf. A V, chap.5, p ix). Pour que les résultats soient enregistrables aussi dans la base de modèle AMS, il faut cocher la case en dessous de la troisième ligne. Il en est de même pour la case *View results* en vue des résultats immédiats après le calcul, il faut cocher la case *View results ?*. (cf. A V, chap.5, p ix).

Une fois validée, une fenêtre contenant les six onglets se présente avec les résultats. Chacun d'eux donne une information particulière. L'index *distribution* montre la fréquence de distribution des indices de satisfaction des besoins en eau pour les 18 années. Le degré de la satisfaction des besoins en eau cumulés dans une période donnée, ou pour la totalité du cycle végétatif de la culture, y est représenté.

La figure 3 montre que parmi les 18 ans :

- quatre années sur le riz pluvial (2000-2002-2004-2006), ont un indice de satisfaction en eau de **100%** ;
- deux autres années (1998-2003), cet indice est de **95%** ;
- quatre autres années (1995-1996-1997-2007), ont un indice de satisfaction de **90%** ;
- deux autres années (1992 - 2005), cet indice est de **80 %** ;
- deux autres années (1990-1999), cet indice est de **75 %** ;
- Les quatre années restantes (1991-1993-1994-2001) ont une valeur d'indice de satisfaction en eau de **70%**.

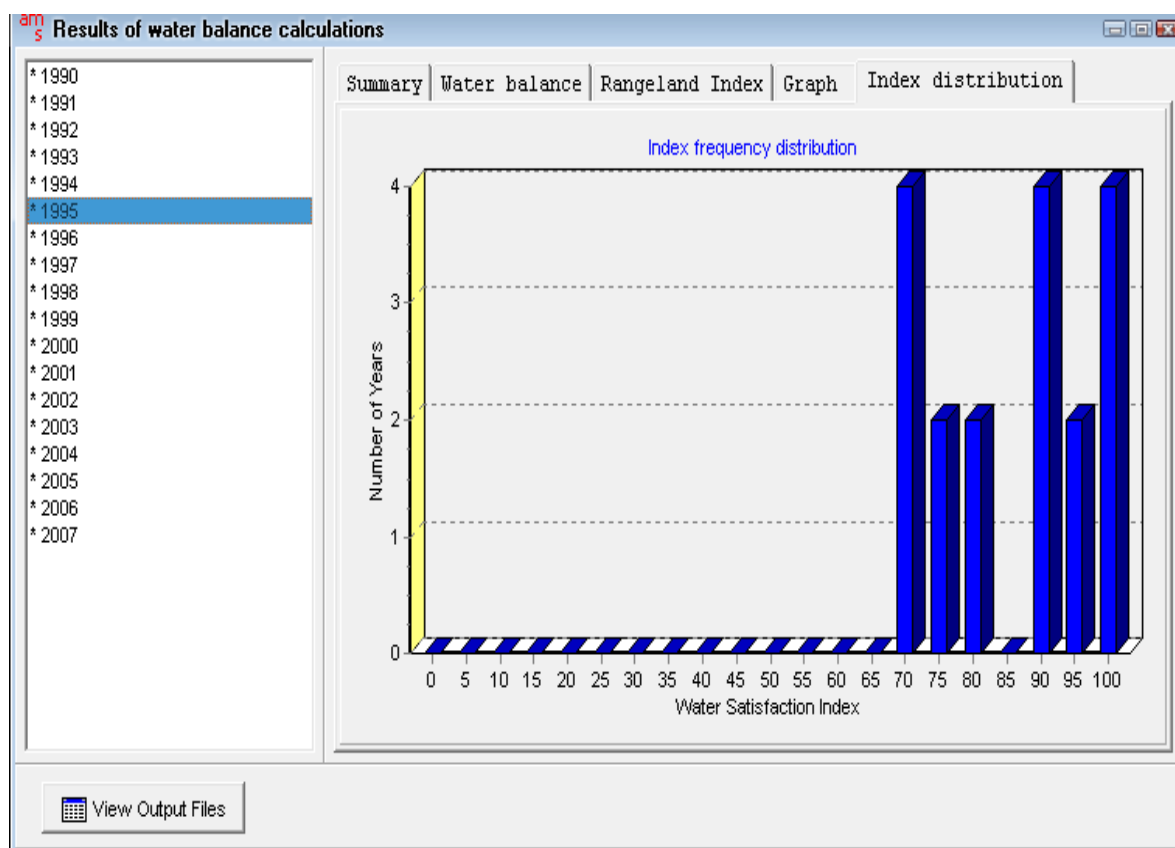


Figure 4 : Résultats de calcul de bilan montrant la distribution des indices de satisfaction en eau

À n'importe quel moment de la saison culturale, cet index représente le rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle de la plante. On présume qu'au moment de semis, la réserve en eau dans le sol est plus élevée que les besoins en eau de la plante au cours de la première décade après sa levée. L'index est donc fixé à 1.0 ou 100% pour la première décade. Dès qu'un déficit se manifestera, la valeur de l'index diminuera.

Les autres onglets représentent les informations par année. En cliquant par exemple sur l'année 1990, la figure qui synthétise le bilan hydrique tout au long de la saison de cette année sera visualisée (cf. A VI, p xiv).

Le calcul du bilan étant terminé, les résultats peuvent être visualisés dans *Ms Excel*. (cf. A VI, p xx). On lance *Ms Excel*, on va dans le répertoire contenant les résultats : `C:\Programmes files\Agrometshell\database`, puis on ouvre le fichier récapitulatif du bilan hydrique : ***BONGOLAVA_1990~2007_Summary_Dekad_output***

Ce processus comprend trois étapes (fig.4 à 6) :

— *Etape 1* : sélectionner *Délimité* puis *suivant*.

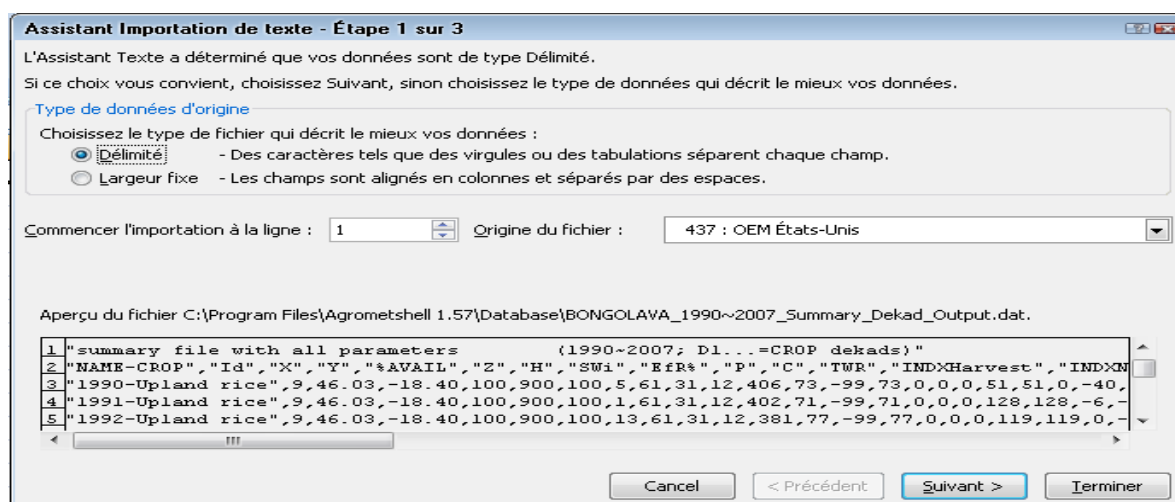


Figure 5: Etape 1 ouverture d'un fichier AMS dans MS Excel

— Etape 2 : choix de *Tabulation* et *virgule*, puis *suivant*

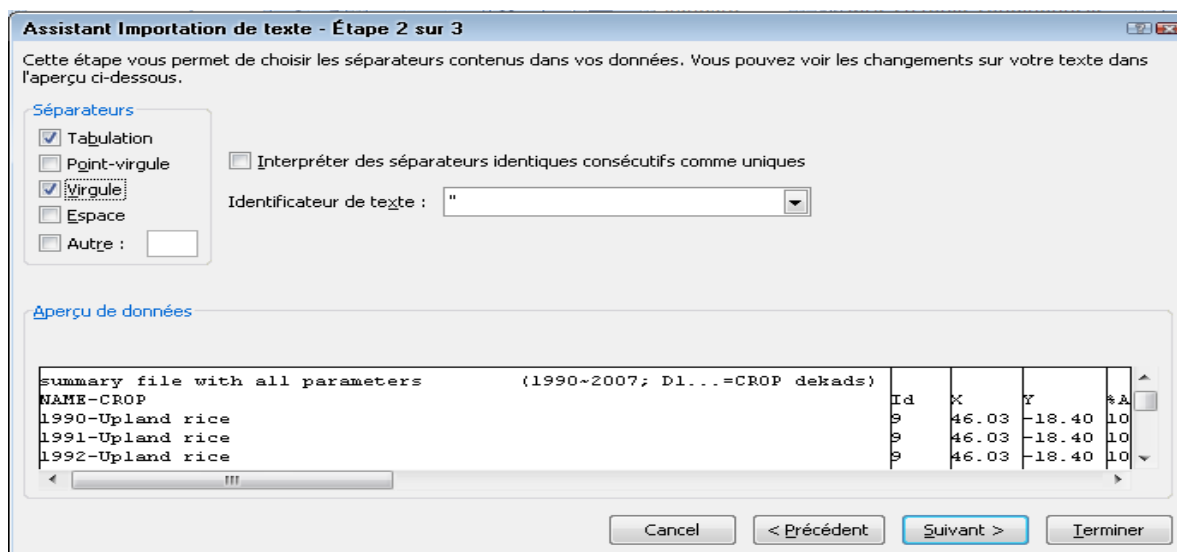


Figure 6 : Etape 2 ouverture d'un fichier AMS dans MS Excel

— Etape 3 : On pointe le curseur sur *Standard* puis *Terminer*

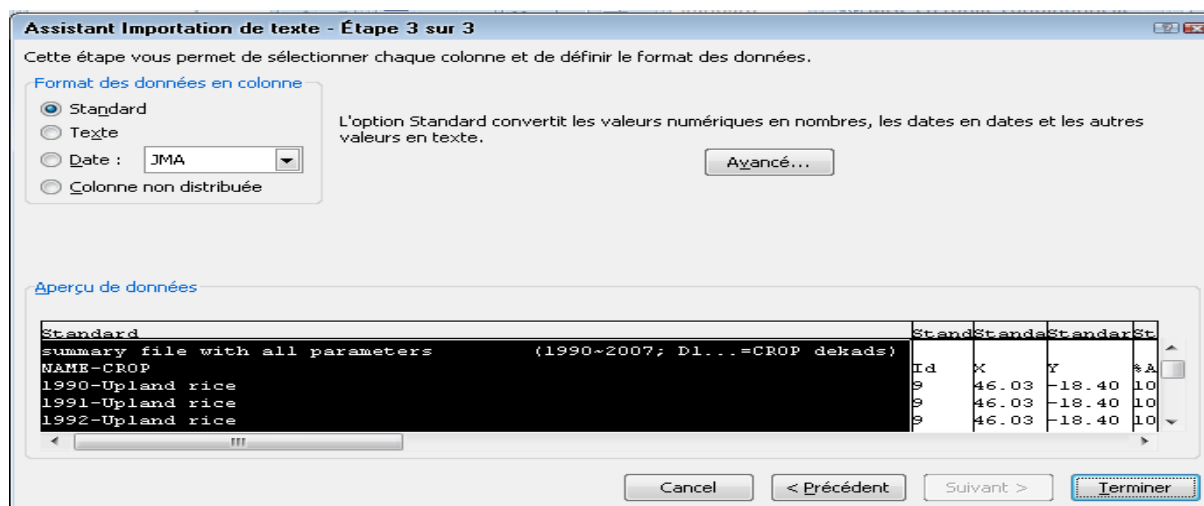


Figure 7: Etape 3 ouverture d'un fichier AMS dans MS Excel

Et le tableur Excel s'affiche avec les données. Pour faciliter les calculs, on insère dans la même page une nouvelle colonne ayant le rendement pour les 18 années.

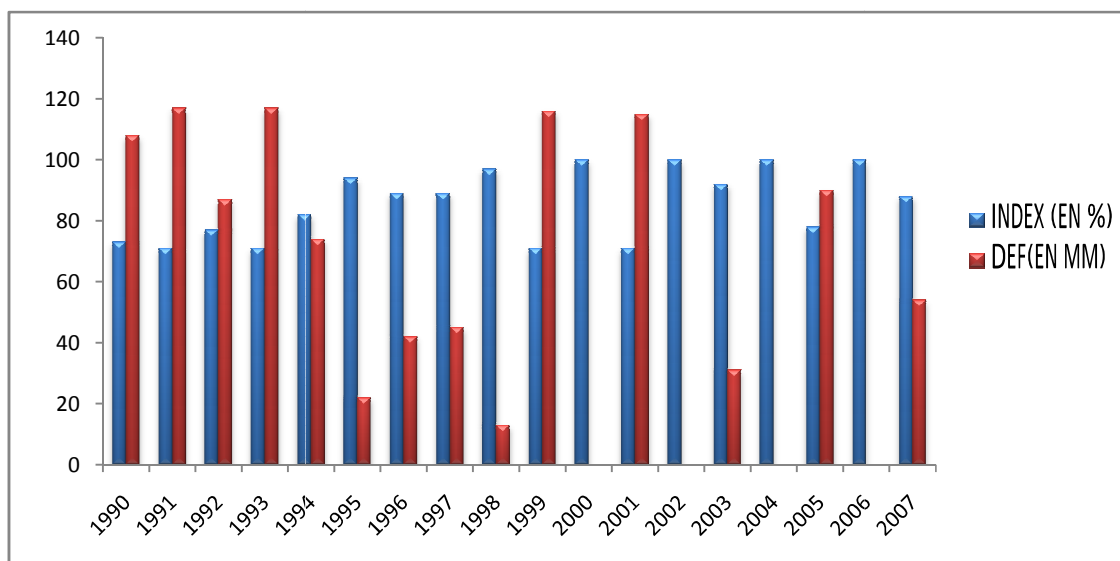
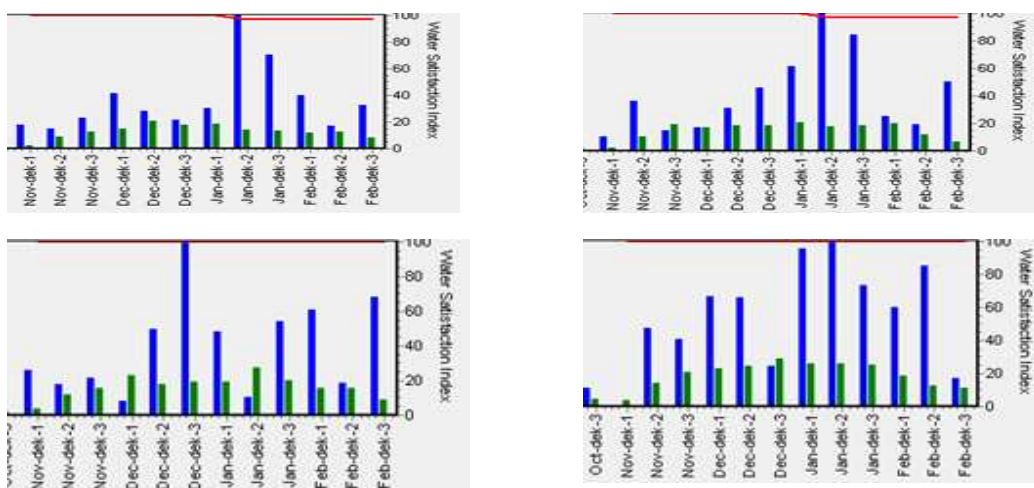


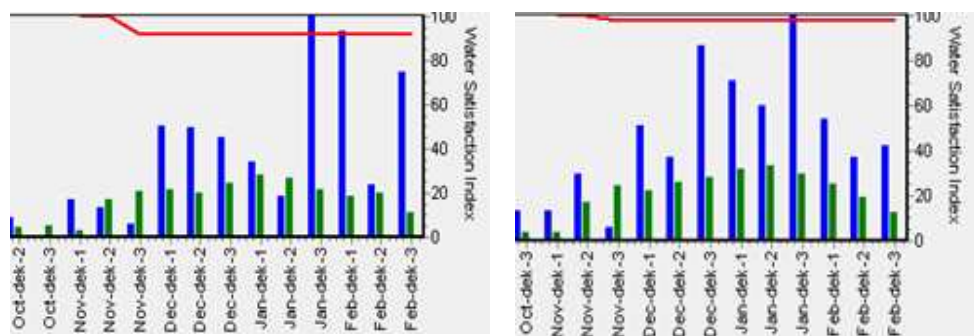
Figure 8: Répartition de l'indice de satisfaction en eau en fonction de déficit d'eau

D'après la Figure 3 précédent, on peut diviser en 6 groupes différents les 18 années de travail, selon la valeur de l'indice de satisfaction en eau :

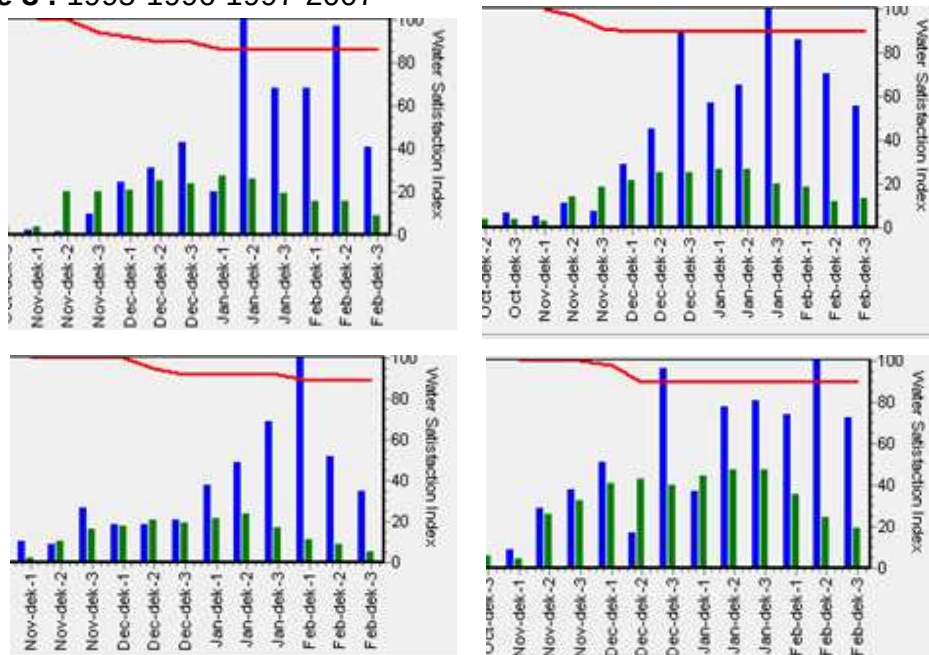
Groupe 1 : 2000-2002-2004-2006



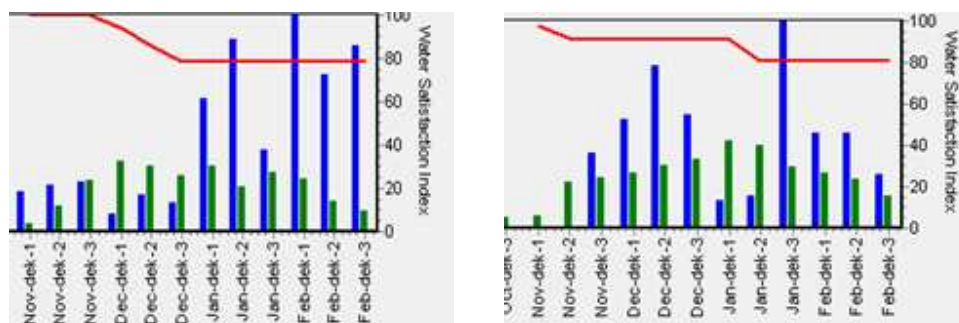
La courbe rouge des 4 figures montre que l'indice de satisfaction en eau reste au voisinage de 100%, le déficit en eau est presque nul tout au long du développement du riz.

Groupe 2 : 1995-1998

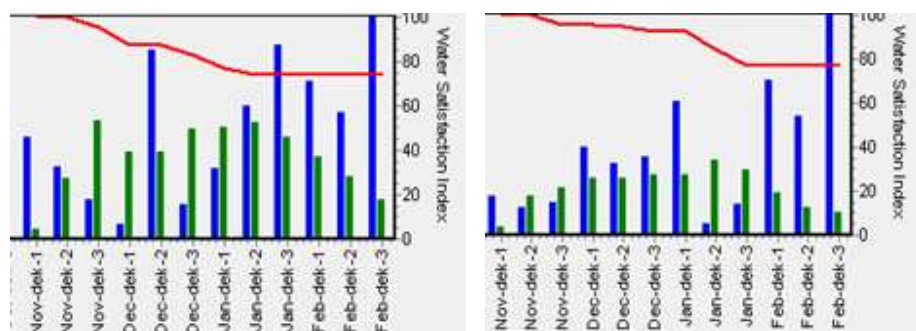
La courbe rouge des deux figures montre que l'indice de satisfaction en eau reste au voisinage de 95%, le déficit en eau est de 22mm tout au long du développement du riz.

Groupe 3 : 1995-1996-1997-2007

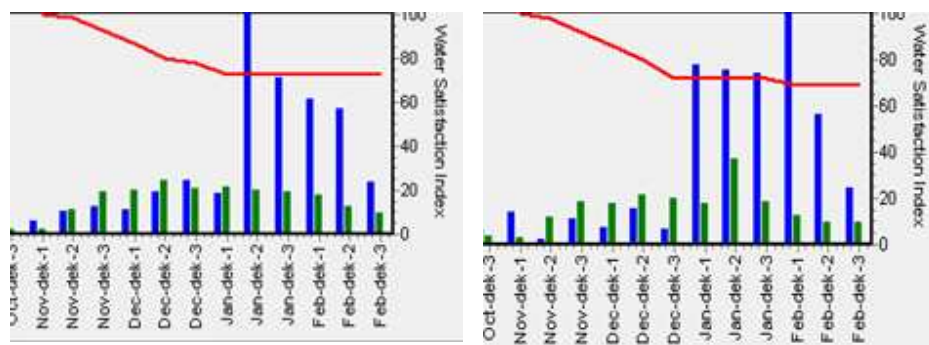
La courbe rouge des quatre figures montre que l'indice de satisfaction reste au voisinage de 90%, le déficit en eau est de 40.85mm tout au long du développement du riz.

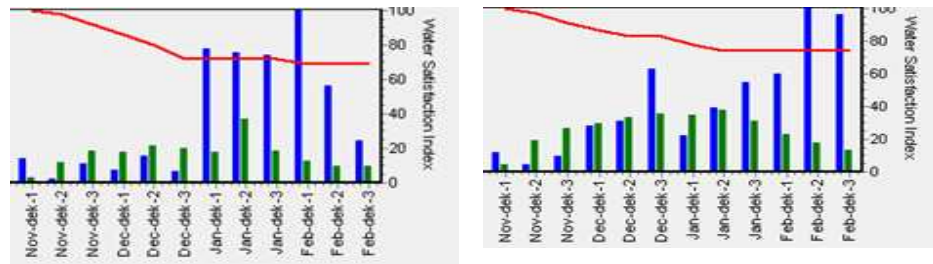
Groupe 4 : 1992-2005

La courbe rouge des deux figures montre que l'indice de satisfaction en eau reste au voisinage de 80%, le déficit en eau est de 88.5mm tout au long du développement du riz.

Groupe 5 : 1990-1999

La courbe rouge des deux figures montre que l'indice de satisfaction en eau reste au voisinage de 75%, le déficit en eau est de 109mm tout au long de développement du riz.

Groupe 6 : 1991-1993-1994-2001



La courbe rouge des quatre figures montre que l'indice de satisfaction reste au voisinage de 70%, le déficit en eau est de 115.5mm tout au long du développement du riz.

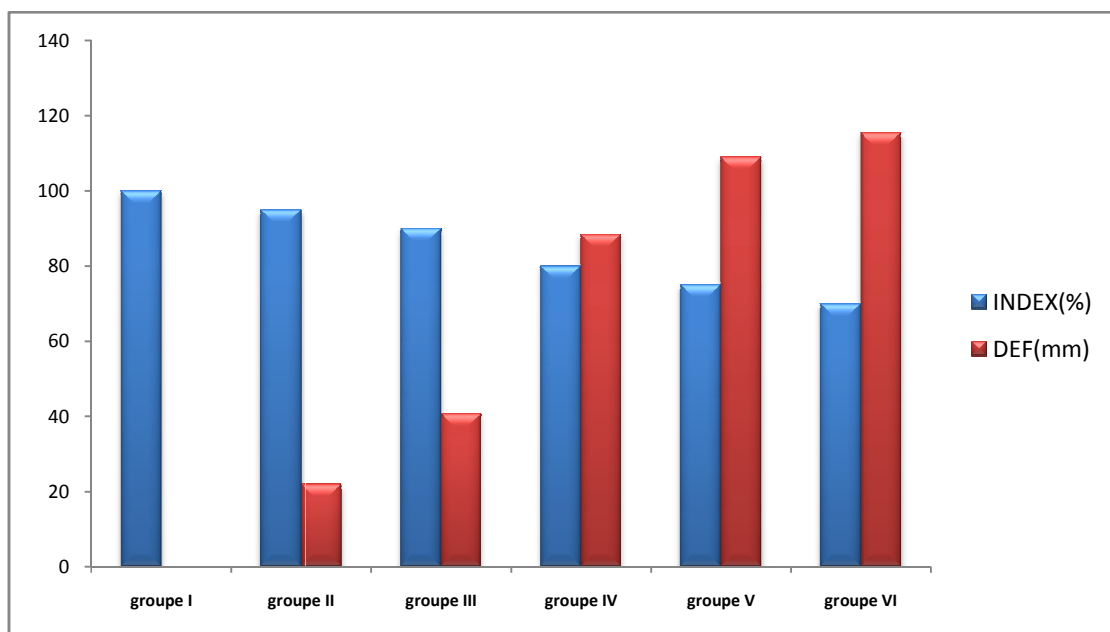


Figure 9: Comparaison de l'indice de satisfaction en eau avec le déficit en eau correspondant

La figure 8 de la page 45, et la figure 9 montrent bien la relation entre l'indice de satisfaction en eau et le déficit en eau et qui suit une variation inversement proportionnel. Ces valeurs de déficit d'eau ainsi que celles de l'indice de satisfaction en eau sont obtenues en effectuant la moyenne pour chaque groupe.

II.1.3. Prédiction de rendement à Tsiroanomandidy

Cette prévision prend en compte l'influence du climat sur le rendement avec l'utilisation des 18 rendements ainsi obtenus pour les 18 années des données. Les paramètres de sortie ayant la meilleure corrélation avec le rendement concernent l'évapotranspiration réelle et le déficit d'eau au stade végétatif. L'un de ces deux paramètres est suffisant pour faire la prévision de rendement des 5 dernières années de la série. Cette méthode consiste à une estimation directe de rendement en fonction de paramètres de sorties du modèle, ayant une étroite corrélation avec le rendement.

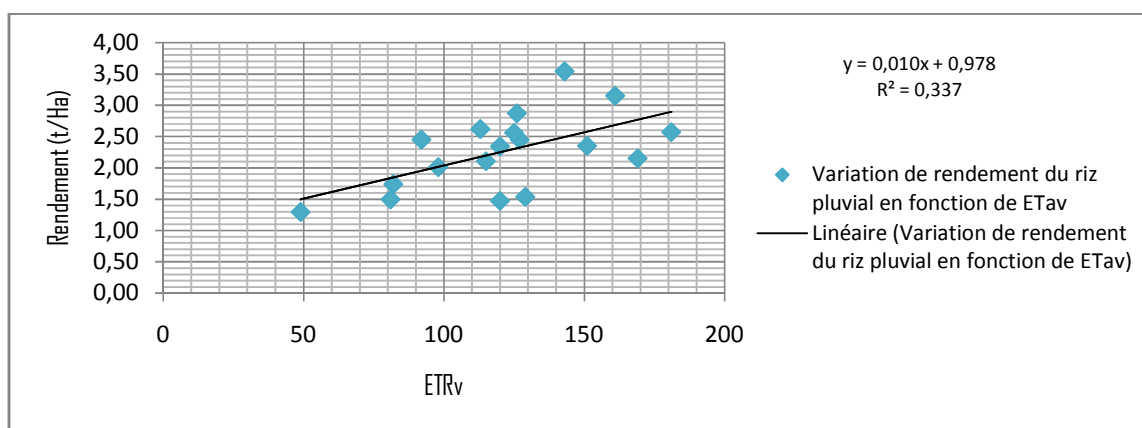


Figure 10 : Variation de rendement du riz pluvial en fonction de l'évapotranspiration potentielle (1990-2007)

La figure 10 montre une tendance croissante de rendement en fonction de l'évapotranspiration réelle. Une valeur plus élevée de l'évapotranspiration réelle au stade végétative explique une bonne production du riz pluvial dans la région Bongolava. De plus, d'après cette expression, on n'a pas besoin d'attendre la fin du cycle pour estimer le rendement à Tsiroanomandidy.

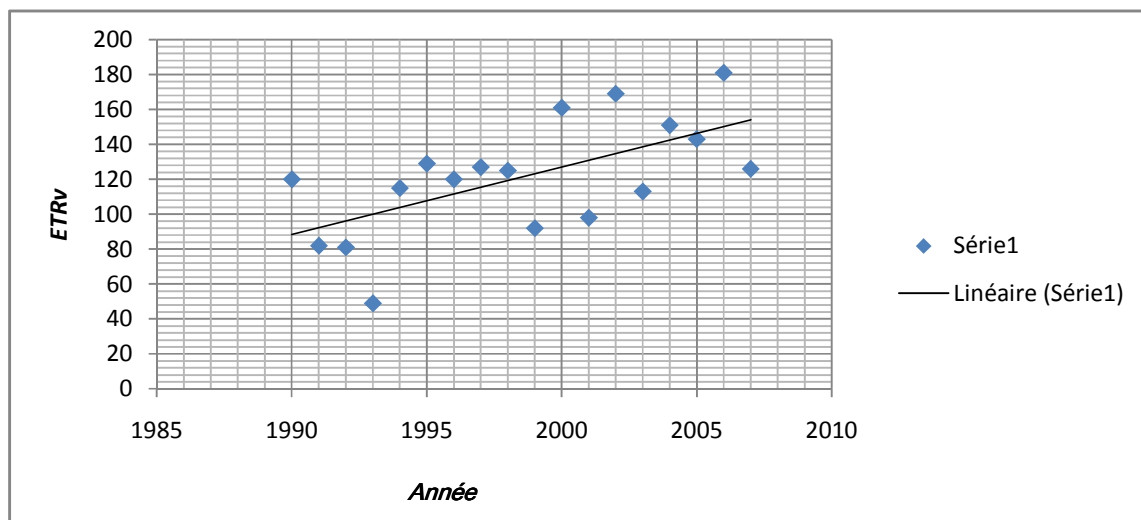


Figure 11: Tendance de l'évapotranspiration potentielle en fonction de l'année

Parmi les 18 ans, d'après la figure 11, l'année 1993 est marquée par une très faible valeur de l'évapotranspiration réelle (48 mm), et l'année 2006 par une forte valeur de cette l'évapotranspiration réelle (180 mm). Le faible rendement au cours de l'année 1993 peut s'expliquer par la chute de valeur de l'évapotranspiration réelle pendant la phase végétative du cycle cultural.

III.1.4. Prédiction de rendement du riz pluvial à Tsiroanomandidy : Prise en compte de l'effet de tendance

a. Détermination de la tendance

Dans le district de Tsiroanomandidy, une tendance à la hausse du rendement du riz pluvial durant les 18 ans s'observe (Figure 12). Mis à part le climat, plusieurs paramètres peuvent être intégrés ; notamment, l'amélioration des techniques culturales, l'utilisation des intrants etc. Pour simuler le rendement au niveau de cette région, cette tendance doit être prise en compte.

L'équation 18 de la page 30 donne l'expression de rendement en fonction du temps :

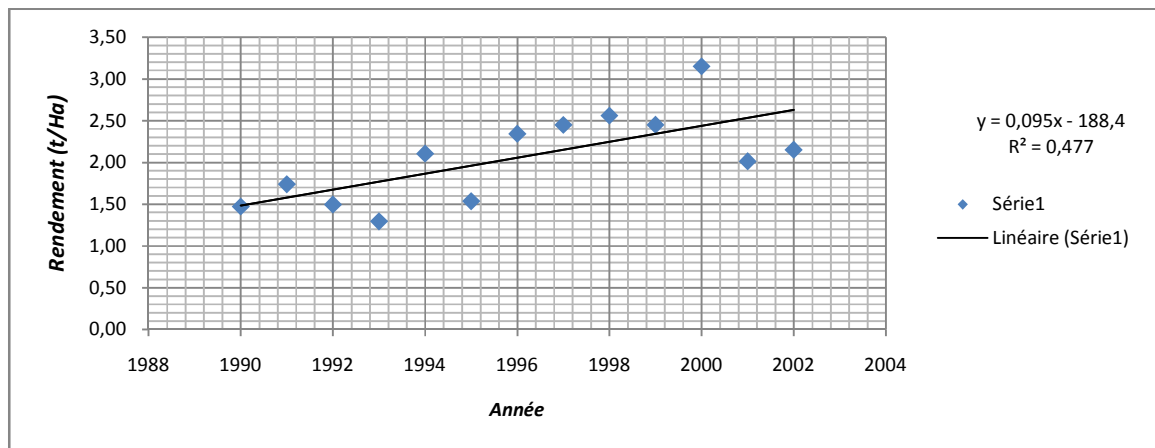


Figure 12: Tendance du rendement à Tsiroanomandidy pendant 13 ans (1990-2002)

b. Expression de rendement en fonction d'un paramètre de sortie

Le paramètre de sortie qui est retenu est le déficit d'eau au stade végétatif, car comparés à d'autres facteurs, il présente un coefficient R le plus significatif.

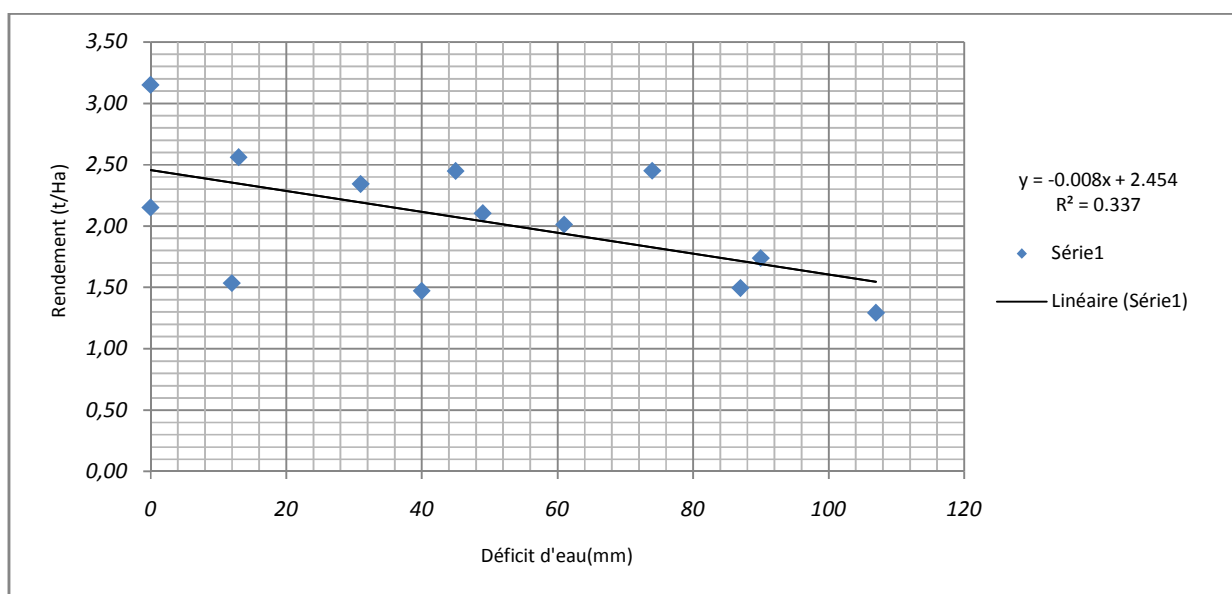


Figure 13: Rendement en fonction de déficit d'eau

c. Expression de rendement détendancé en fonction de Déficit d'eau

L'équation 20 de la page 31 donne l'expression de rendement détendancé en fonction de paramètre de sortie qui est le déficit en eau.

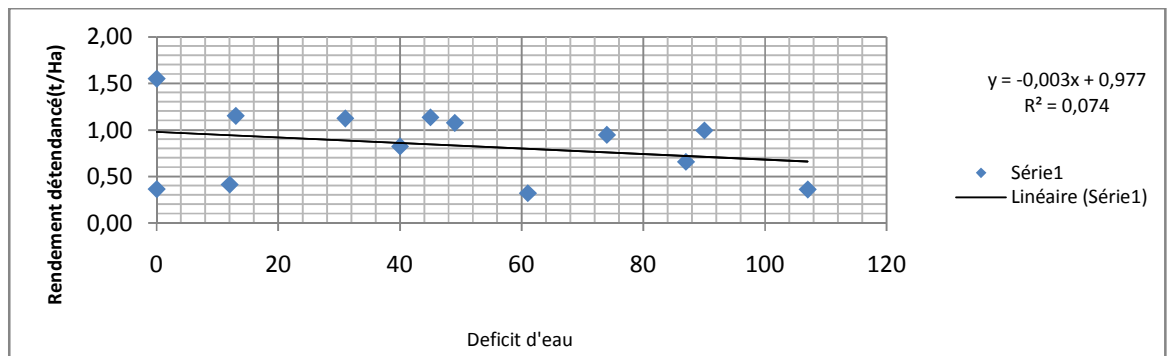


Figure 14 : Rendement détendancé en fonction de déficit d'eau

d. Comparaison entre le rendement réel et simulé

Le rendement simulé est obtenu en définissant une nouvelle expression du rendement à partir des équations (18) et (20) de la page 30, 31.

D'après l'équation 21 de la page 31, le rendement simulé (Rdt_{sim}) se calcule par la formule suivante :

$$(Rdt_{sim}) = 0.095 \text{ année} - 188.4 + (-0.003 \text{ Déficit d'eau} + 0.977) \quad (23)$$

La comparaison avec le rendement réel obtenu des 5 dernières années du 2003 à 2007 est donnée dans la figure 15. Les meilleures estimations sont obtenues en 2003 avec un pourcentage de réalité de 98%, et en 2007 avec un pourcentage de réalité de 95%.

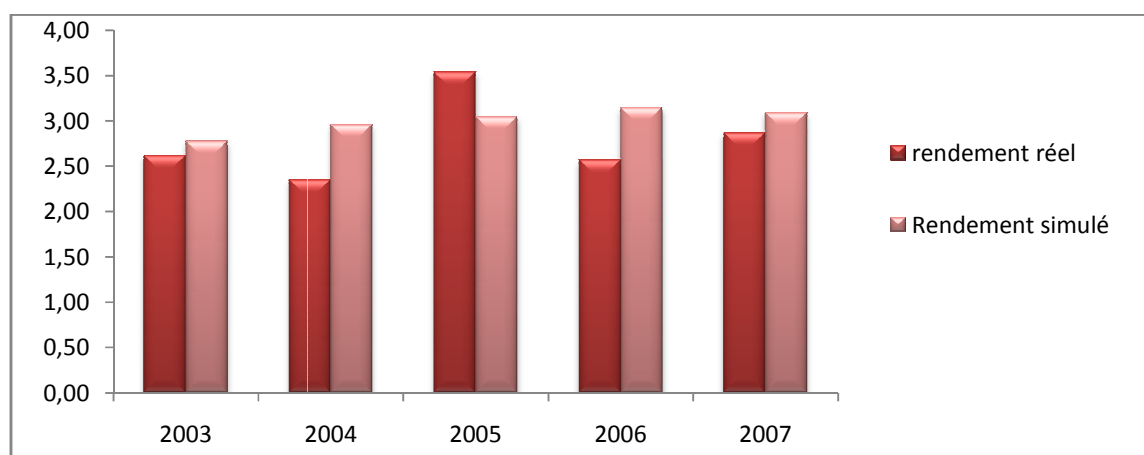


Figure 15 : Comparaison de rendement réel et simulé durant les 5 dernières années

III.2. Interprétation et discussions des résultats

Le déficit d'eau durant la période végétative du cycle du riz pluvial engendrait un faible rendement, exemple, de l'année 1993 où la quantité de pluie est de 85.5mm tout au long de la phase végétative du riz, le déficit en eau est de -107mm (cf. figure 8), avec un rendement très faible de 1.29 t/ha. L'eau constitue donc la principale contrainte de la riziculture pluviale.

La figure 10 montre que l'évapotranspiration réelle admet une corrélation étroite avec le rendement, surtout durant la phase végétative. Une valeur plus élevée de l'évapotranspiration réelle implique une plus grande activité physiologique potentielle de culture, et avec des possibilités de rendements plus élevés. Cet accroissement résulte de l'évolution des températures et des rayonnements. On peut prendre aussi comme exemple le cas de l'année 1993 : le faible rendement ne correspond qu'à une valeur de l'évapotranspiration réelle faible de 49mm. Le meilleur rendement de 3.54 t/ha est obtenu en 2005 avec une valeur de l'évapotranspiration réelle de 143mm (cf. A VII. p xx).

L'intérêt dans l'expression de rendement précédent ne nécessite pas l'attente de la fin du cycle pour estimer le rendement dans le district de Tsiroanomandidy. D'autres facteurs que l'eau peuvent influencer le rendement, mais ils sont difficilement modélisable. La présence des mauvaises herbes peut entrer en compétition avec le riz concernant l'épuisement de l'eau et des éléments nutritifs du sol. Les agents pathogènes, en s'attaquant aux cultures, réduisent la vigueur de la plante ; ce qui peut entraver un rendement optimum même si l'eau paraît suffisante lors de la saison. Ainsi, 2000 et 2005, détiennent une valeur plus élevée de rendement au cours des 18 années (cf. A IV, chap2, p.iv). Durant cette saison culturale, un déficit d'eau relativement faible et une valeur un peu plus élevée de l'évapotranspiration réelle ont été trouvés pendant la phase végétative du cycle phénologiques. En somme, cette augmentation de production ne dépend pas seulement des ces deux paramètres climatiques. Il y a d'autres facteurs responsables de cette croissance, qui ne sont pas intégrés dans le modèle.

Cette année 2005 était marquée par une sous estimation de rendement simulé par rapport au rendement réel parmi les 5 dernières années de simulation. (Figure 15). Cette diminution peut s'expliquer par une faible valeur de l'indice de satisfaction en eau de l'année 2005 par rapport aux autres années restantes (pas plus de 80%). (Cf. Figure 8). La valeur de l'indice de satisfaction en eau des 4 autres années est beaucoup satisfaisante et presque supérieure à 90%. (cf. A VII, p.xx).

L'eau en excès peut engendrer aussi un faible rendement même s'il existe une valeur plus élevée de l'évapotranspiration potentielle. Cet excès en eau gêne l'activité biologique dans le sol et réduit la disponibilité en éléments nutritifs. Exemple, les années : 2002, 2004 et 2006 subissent une forte valeur d'excès d'eau tout au long du développement du riz et avec un rendement faible de moins de 2.5 t/ha. (cf. A IV, p. iv)

CONCLUSION

Ce travail est destiné à une grande exploration du modèle AMS sur la prévision de rendement du riz pluvial dans la région Bongolava. AMS est un modèle potentiellement utilisable dans plusieurs domaines. C'est un modèle polyvalent et robuste qui est susceptible d'être utilisé dans des conditions environnementales variées.

Le modèle AMS fournit des informations détaillées sur les conditions hydriques des cultures, dès leur plantations jusqu'à la récolte. Pourtant, il ne tient pas compte des autres contraintes du milieu. Il est donc un modèle très performant pour le calcul de bilan hydrique des cultures et qui se fonde principalement sur l'influence des facteurs climatiques pour mieux déterminer la variation des rendements.

Ce modèle permet d'estimer le rendement sans attendre la fin du cycle végétatif du riz pluvial. Les deux paramètres de sorties du modèle AMS : déficit d'eau et évapotranspiration réelle, admettent une étroite corrélation avec la production annuelle du riz pluvial pendant 18 ans dans la région Bongolava.

Pour conclure, d'après les différents paramètres de sorties du modèle AMS, les conditions climatiques agissent sur le rendement. La quantité suffisante de l'eau et de l'évapotranspiration réelle, pendant la phase végétative du cycle, assurent un meilleur taux de production en riziculture pluviale. Une bonne production en riziculture pluviale dans la région Bongolava demande donc un autre apport d'eau durant la phase végétative. Il vaut mieux de faire une irrigation au niveau de la parcelle au cours de cette période pour augmenter le rendement du riz pluvial dans cette région.

ANNEXE

ANNEXE I

Méthode de calcul par corrélation et régression linéaires simple

Il s'agit de :

- Chercher s'il existe une corrélation entre deux variables
- Chercher une expression de la loi de variation moyenne de l'une de variable en fonction de l'autre : C'est le problème d'ajustement
- Prendre une décision sur l'estimation d'une variable connaissant l'autre.

La régression linéaire simple entre deux variables x et y aurait pour équation :

$$y = a + b x$$

avec a et b sont des coefficients à déterminer par la méthode de moindre carrée.

b est obtenu par l'expression

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}$$

et a par

$$a = m_y - b m_x$$

x_i : valeurs observées

y_i : valeurs observées correspond à x_i

n : nombre d'observation

m_y, m_x : moyenne des valeurs observées

L'évaluation d'intensité de la liaison est caractérisée par le coefficient de corrélation r dont l'expression est :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - m_y)^2}}$$

avec $-1 \leq r \leq +1$

ANNEXE II

Durée de phase de croissance du riz pluvial

Semis	Phase végétative	Phases de reproduction et de maturation	Durée totale de la croissance
(jours)			
0	40	60	100
0	55	65	120
0	65	65	130

Source : JACQUOT M. ET COURTOIS B. « Le riz pluvial »

a. Phase végétative

- Le nombre de talles, le nombre de feuilles et la surface foliaire augmentent au cours de la phase végétative.
- Des températures basses, des jours longs et des périodes sèches peuvent allonger la phase végétative. *D'après Jacquot M. et Courtois B.*

b. Phase de reproduction

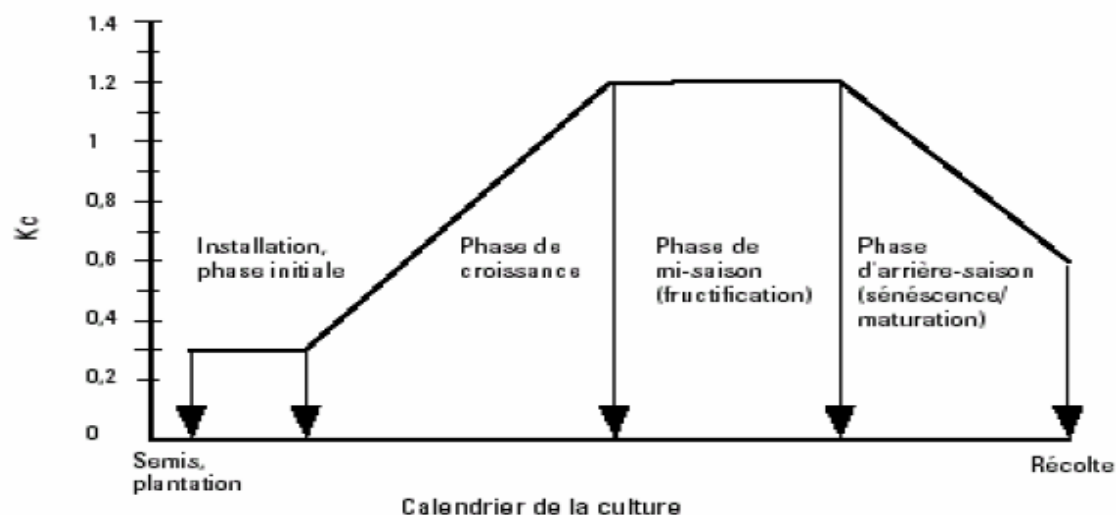
La phase de reproduction commence au début de la formation de panicule et se termine à la floraison. Elle dure normalement environ 35 jours. Des températures basses peuvent prolonger cette phase. *D'après Jacquot M. et Courtois B.*

c. Phase de maturation

- La phase de maturation débute à la floraison et dure environ 30 jours, pour les variétés précoces (100 jours au moins), elle dure 25 jours.
- Les jours pluvieux ou les basses températures peuvent allonger la phase de maturation.
- Les jours ensoleillés et chauds raccourcissent la phase de maturation. *D'après Jacquot M. et Courtois B.*

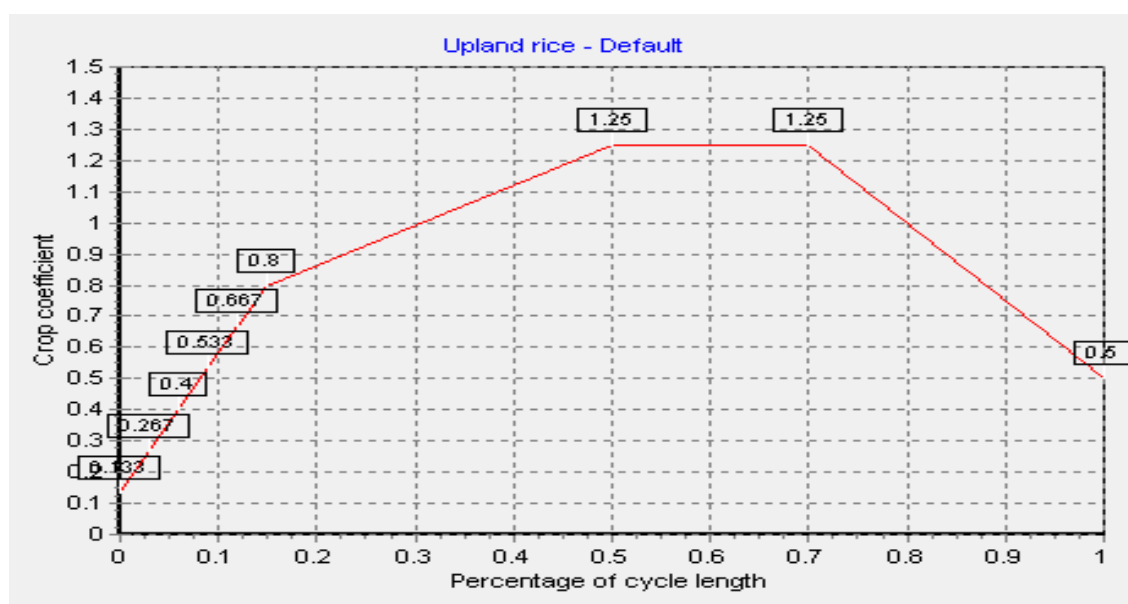
ANNEXE III

1- Coefficient cultural (K_c) en fonction du développement de la culture



Source : Mémento d'agronome 2002

2- Variation du coefficient cultural en fonction du cycle



ANNEXE IV

1- Données du rendement du riz pluvial dans la région Bongolava (1990-2007)

Année d'observation	Rendement (Tonne/Ha)
1990	1,47
1991	1,74
1992	1,49
1993	1,29
1994	2,10
1995	1,53
1996	2,34
1997	2,45
1998	2,56
1999	2,45
2000	3,15
2001	2,01
2002	2,15
2003	2,62
2004	2,35
2005	3,54
2006	2,57
2007	2,87

Source : DRDR Bongolava

2- Résultats de calcul de l'ETP dans la région Bongolava (1990-2007)

	JAN	FÉV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DÉC
1990												
dec 1	3.04	3.47	3.11	3.49	3.66	3.45	3.56	4.91	4.4	6.08	4.81	4.26
dec2	3.48	3.01	3.28	2.92	3.18	3.22	3.98	4.74	5.3	5.16	5.21	3.83
dec3	3.86	3.13	3.52	3.42	3.35	3.44	3.95	5.32	5.15	5.26	4.13	3.72
1991												
dec 1	3.47	3.26	3.63	2.79	2.94	3.32	3.48	4.04	5.16	5.27	4.04	4.34
dec2	4.28	2.66	3.48	3.14	2.72	2.78	3.5	4.84	5.37	5.37	4	4.7
dec3	3.95	3.12	3.61	3.07	3.55	3.47	3.64	5.19	5.53	4.11	4.59	3.46
1992												
dec 1	3.89	3.77	3.61	3.43	3.27	3.61	3.33	3.84	5.95	5.64	4.64	5.12
dec2	3.18	3.59	4.01	3.31	3.47	3.46	3.32	4.71	5.44	5.22	3.41	4.19
dec3	3.28	3.67	3.5	3.98	3.51	3.55	4.07	5.91	5.57	4.47	4.15	3.33
1993												
dec 1	3.59	3.83	2.42	3.46	3.37	3.16	3.22	3.98	5.6	5.46	4.84	3.79
dec2	2.49	2.88	3.46	3.67	4.27	3.66	4.18	5.03	5.54	5.69	4.49	4.05
dec3	3.52	2.67	3.04	3.47	4.29	3.06	4.36	4.94	5.67	5.29	4.43	3.44
	9.6	9.38	8.92	10.6	11.93	9.88	11.76	13.95	16.81	16.44	13.76	11.28
1994												
dec 1	2.87	2.65	3.48	2.95	3.66	2.92	3.56	4	5.6	4.78	5	4.03
dec2	5.9	2.75	3.31	2.98	3.12	3.77	3.42	4.34	5.1	5.11	6.82	4.28
dec3	3.22	3.79	3.23	3.17	2.88	3.14	3.86	4.75	5.94	5.15	4.4	3.59
1995												
dec 1	3.67	3.45	3.56	3.19	2.71	3	3.28	3.86	5.16	5.81	5.65	3.77
dec2	3.53	2.94	3.36	2.77	2.71	3.18	3.53	4.06	5.42	4.85	3.53	3.84
dec3	2.69	4.11	3.06	3.06	3.31	3.23	3.83	5.29	5.02	4.95	3.27	3.04
1996												
dec 1	3.97	3.12	2.96	3.31	3.75	3.38	3.67	4.49	4.88	5.43	4.07	3.68
dec2	3.82	3.87	3.54	3.25	3.18	3.52	3.4	4.63	5.65	4.68	4.17	3.89
dec3	2.97	3.23	3.06	2.98	3.22	3.06	3.84	4.62	5.18	4.48	3.73	3.53

1997												
dec 1	3.49	3.21	3.54	2.99	2.89	3.05	3.07	3.86	4.7	4.92	4.25	4.34
dec2	3.47	2.79	3.47	2.68	3.28	3.23	3.5	4.5	4.39	3.72	4.37	4.47
dec3	2.78	3.39	3.46	2.71	3.35	3.15	4.15	4.53	4.12	4.05	4.48	3.77
1998												
dec 1	3.84	2.57	3.67	3.39	3.48	3.79	4.05	4.88	5.47	5.56	4.2	3.11
dec2	4.37	2.86	3.46	3.37	3.66	3.96	4.46	5.11	4.94	5.41	4.25	3.37
dec3	3.4	2.43	3.69	3.37	3.74	3.95	4.72	5.16	5.58	3.95	3.87	3.3
1999												
dec 1	3.49	3.73	3.57	3.26	2.51	3.23	3.29	4.6	5.09	5.73	3.33	3.66
dec2	3.72	3.48	3.32	3.37	3.38	3.55	3.45	4.51	5.52	6.17	4.59	3.38
dec3	3.53	3.38	3.4	3.7	3.38	3.22	3.89	4.91	5.62	4.98	5.84	3.75
2000												
dec 1	3.71	3.61	3.1	3.44	3.58	3	3.26	4.49	5.06	5.68	4.79	3.74
dec2	2.75	3.49	3.54	3.02	3.14	3.15	3.84	4.8	5.75	5.08	4.04	4.77
dec3	3.58	3.16	3.45	3.05	3.06	3.54	3.66	4.94	6.22	4.2	3.58	3.67
	10.04	10.26	10.09	9.51	9.78	9.69	10.76	14.23	17.03	14.96	12.41	12.18
2001												
dec 1	3.57	3.14	3.49	3.97	3.56	3.37	3.56	3.91	4.87	6.09	4.86	3.37
dec2	2.8	4.25	3.8	3.16	3.52	3.37	3.69	4.74	4.44	4.81	4.43	3.91
dec3	2.73	3.92	3.6	3.65	3.53	3.3	4.05	5.09	5.5	4.3	4.08	3.81
2002												
dec 1	3.48	3.06	3.43	3.04	3.61	3.01	3.59	4.37	4.92	5.1	4.15	4.2
dec2	3.77	3.18	3.56	3.11	2.18	3.1	4.13	5.2	5.28	5.23	4.39	3.89
dec3	3.44	3.44	3.32	3.63	1.39	3.25	4.25	5.21	5.62	3.89	5.34	3.52
	10.69	9.68	10.31	9.78	7.18	9.36	11.97	14.78	15.82	14.22	13.88	11.61

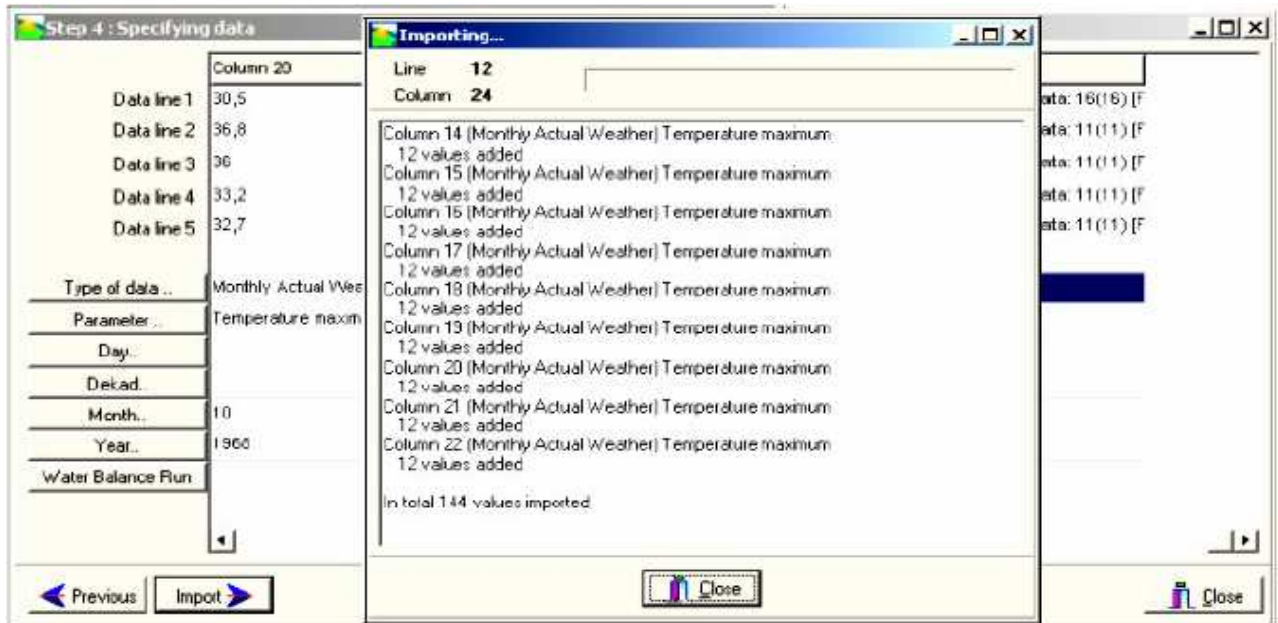
3- Précipitations décadaire du région Bongolava

	JANVIER			FÉVRIER			MARS			AVRIL			MAI			JUIN		
	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3
1990	101.5	62.5	25.5	42	90.5	109	14.5	14.5	24	14	34	39.5	6.5	6	1.5	2	1.5	1.5
1991	96.5	8.5	22.5	112.5	85.5	160	56.5	95.5	74.5	89.5	41.5	11	9.5	3	0.5	9	1	2.5
1992	38	203.5	144.5	125	116.5	48	82	14.5	60.5	24	24.5	8.5	7.5	2.5	1	5.5	2	2
1993	91	132	56	150.5	108	128	151	2	68	49.5	13	20	11.5	3.5	0.5	5	2.5	2
1994	200	152	150	203	113.5	49.5	111	86.5	27	60	2.5	2.5	6.5	12	2	1.5	2	5.5
1995	37	183.5	123.5	124.5	177	73.5	16.5	10.5	67	53.5	79	20.5	22	21	3	3	4.5	0.5
1996	123	124	183.5	190	19.5	63	91.5	170	49	5.5	2	9.5	5.5	4	1	1	1.5	10.5
1997	94.5	108.5	166	141.5	115.5	92	68	38	25	48.5	29	9.5	11.5	27.5	7	1.5	7	8
1998	87	112.5	157.5	232.5	120.5	79.5	92	30	38	40	10.5	16.5	9	5.5	9.5	1.5	13.5	4.5
1999	97	82.5	137.5	74.5	51	58	34	81	23.5	11.5	4	4	13.5	0.5	1.5	1.5	1	1.5
2000	29	55	80	65	52	92	140	8.5	2	4.5	4	11.5	7	0.5	0.5	3	2	8
2001	75	247	171.5	97.5	42	79.5	51.5	43	27.5	2	13	5	1	3.5	1	3.5	2	3
2002	28.5	50.5	70.5	76	128.5	122	76	36	20.5	9.5	40	5.5	37	75	2	5	3.5	3
2003	141.5	232	193.5	58.5	44.5	115.5	88.5	148.5	21	31.5	5	9.5	11	6.5	1	1.5	1.5	4
2004	55	29.5	164.5	151.5	38.5	122.5	138.5	17.5	9.5	17	18.5	1.5	25	2	3.5	1.5	2	9.5
2005	95	19.5	108.5	120.5	37	136	33.5	39	24	46.5	19	8.5	6	7	28.5	4	3.5	6.5
2006	17	20.5	127.5	57.5	57.5	33	142	23	2.5	23.5	17	13	16	1	1.5	5	3	4
2007	249	225	135.5	111.5	158	31.5	13.5	51	12.5	17	6	30	15.5	9.5	5.5	1	0.5	3

	JUILLET			AOÛT			SEPTEMBRE			OCTOBRE			NOVEMBRE			DÉCEMBRE		
	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3	dec1	dec2	dec3
1990	0.5	2	3	2	6	0.5	1	1	3.5	4.5	0	20.5	28	19.5	24	63	52.5	57
1991	5	4	1.5	1.5	0	1	0.5	0	1	3.5	6	10	12.5	21	25	22	39	50.5
1992	0	6.5	1	3	10	0	3.5	0.5	0.5	8.5	25	17.5	28	31.5	140.5	12.5	2.5	20
1993	3	3.5	2.5	1	1	2	1.5	0.5	1	4.5	2.5	13	28.5	4.5	22	15	31	13
1994	9.5	4.5	2	3.5	8	4	1.5	24.5	0	55.5	20.5	16	4.5	3	17	44.5	57	78.5
1995	0.5	2	1	1	1.5	1.5	1	2	2	0.5	1	0.5	5	19.5	27	70.5	64	110.5
1996	0.5	2	4	0.5	1	2	3.5	0.5	0.5	4	0.5	11	8	18	12	47.5	86	147
1997	11.5	10	2	10	13	4	1.5	17.5	15.5	4	10	11	24.5	21	82	42	43	47
1998	13	25	4	2.5	2.5	2	34	11.5	12.5	0.5	1	17.5	17.5	41	7.5	70	51	119
1999	2	1.5	7.5	1	5	5.5	3	1	7	1	0.5	19	55.5	30.5	15.5	5.5	94	14
2000	23.5	3	5.5	2.5	2	3	6.5	1	1.5	3.5	0	54	43	36.5	80.5	102	69	52
2001	2.5	1	6	19.5	1	0	0.5	1	0	0	10.5	17	15	6	12.5	36	40.5	79.5
2002	1	2	4	3	3.5	3.5	5.5	11.5	1.5	0	12	32	24.5	84	34	40.5	71.5	106
2003	4.5	2.5	1	3	2.5	1	1	5	21	0.5	14	1	27.5	22.5	10.5	82	81	73
2004	1.5	6.5	3	2.5	0.5	1	15.5	1.5	4	22.5	16.5	29	63	35	42.5	15.5	133	200.5
2005	5	20.5	2.5	4	4.5	2.5	4	2	2	17	0.5	2	1	1	98.5	67	136.5	70
2006	2.5	4	26	4.5	1.5	3	1	1.5	4	1	1.5	21	0.5	88	75.5	123.5	141.5	45.5
2007	0.1	0.2	7	7.5	3	1	0.5	6.5	2	1	11	37	9.5	33	43	58	19	109

ANNEXE V

1- Fenêtre montrant le processus d'importation des données



2- Intégration des informations de base d'un calcul de bilan en eau

Define a new risk analysis run

Specify a unique name for this run:

Select station:

First year:

Last year:

Crop and crop coefficients:

3- Choix d'une durée de cycle identique pour l'année

Assign a value to all stations

Column: CYL (Cycle Length (dekads))

Value: 12

4- Tableau à compléter avant le calcul de bilan hydrique

Risk Analysis Run: analyse_Tsididy

Station: BONGOLAVA Period: 1990 to 2007 Crop: Upland rice (Crop coefficients : Default)

Year	Planting Dekad	Cycle Length (dekads)	Water Holding Capacity (mm)	Percentage Effective Rainfall (0-100)	Pre-season KCR	Irrigation Application (0=
1990	31	12	100	61	0.13	0
1991	31	12	100	61	0.13	0
1992	31	12	100	61	0.13	0
1993	31	12	100	61	0.13	0
1994	31	12	100	61	0.13	0
1995	31	12	100	61	0.13	0
1996	31	12	100	61	0.13	0
1997	31	12	100	61	0.13	0
1998	31	12	100	61	0.13	0
1999	31	12	100	61	0.13	0
2000	31	12	100	61	0.13	0

5- Fenêtre donnant la possibilité d'enregistrer le bilan

Run a risk analysis water balance

Risk analysis run: analyse_Tsididy

Directory for output files: C:\Program Files\Agrometshell 1.57\Database

Time step: Dekad

Minimum percentage available data: 100

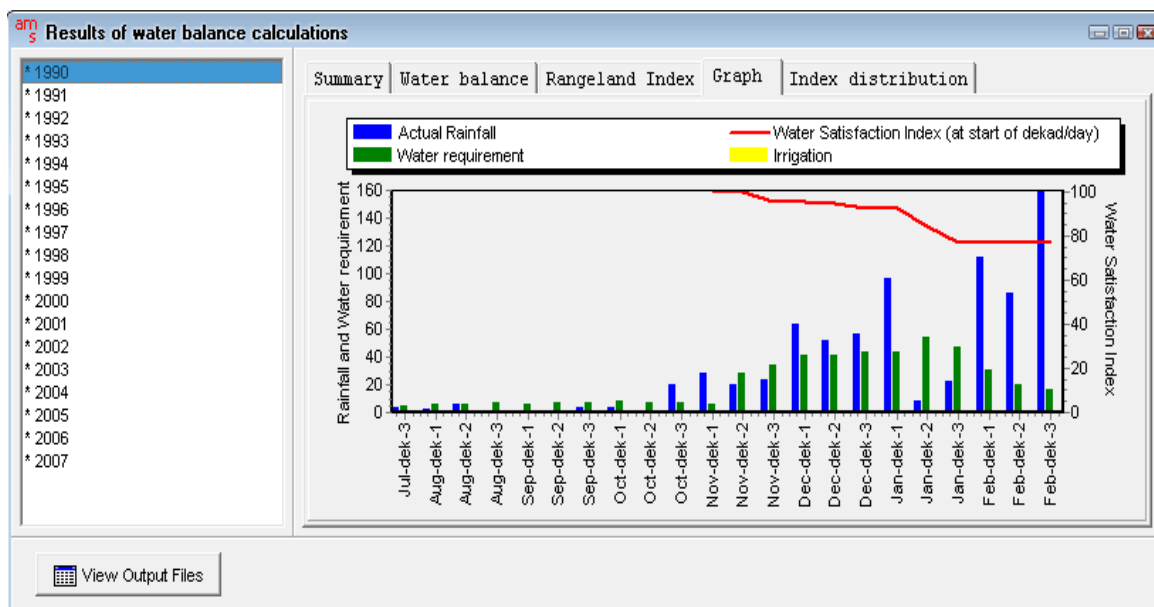
Make weather files from database? ☒

View results? ☒

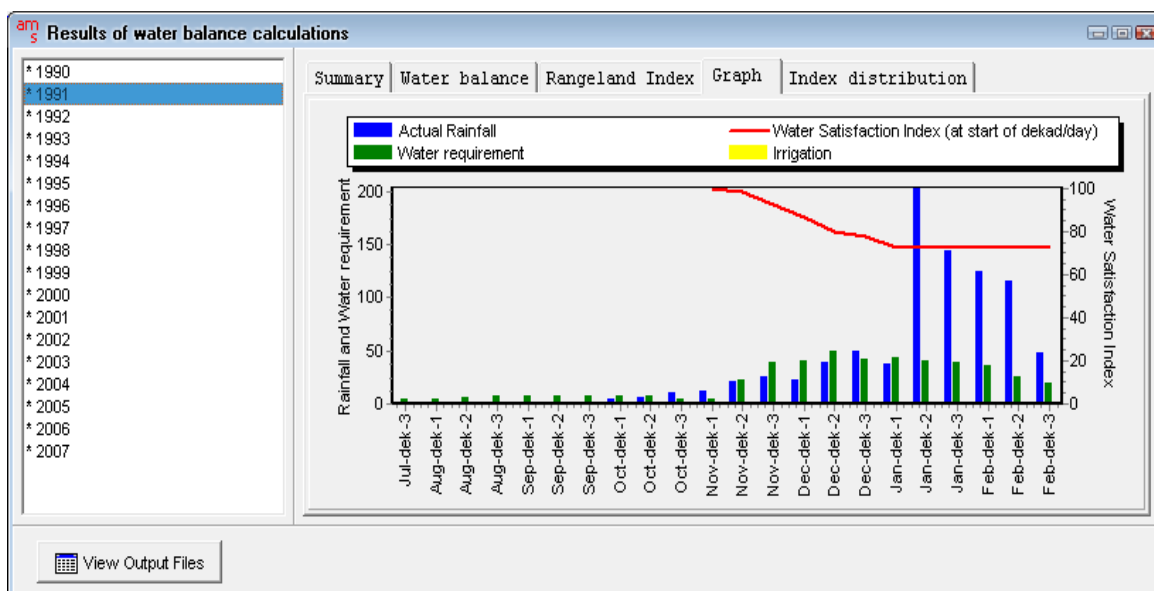
ANNEXE VI

1- Graphique de synthèse de bilan de 1990 à 2007 dans la région Bongolava

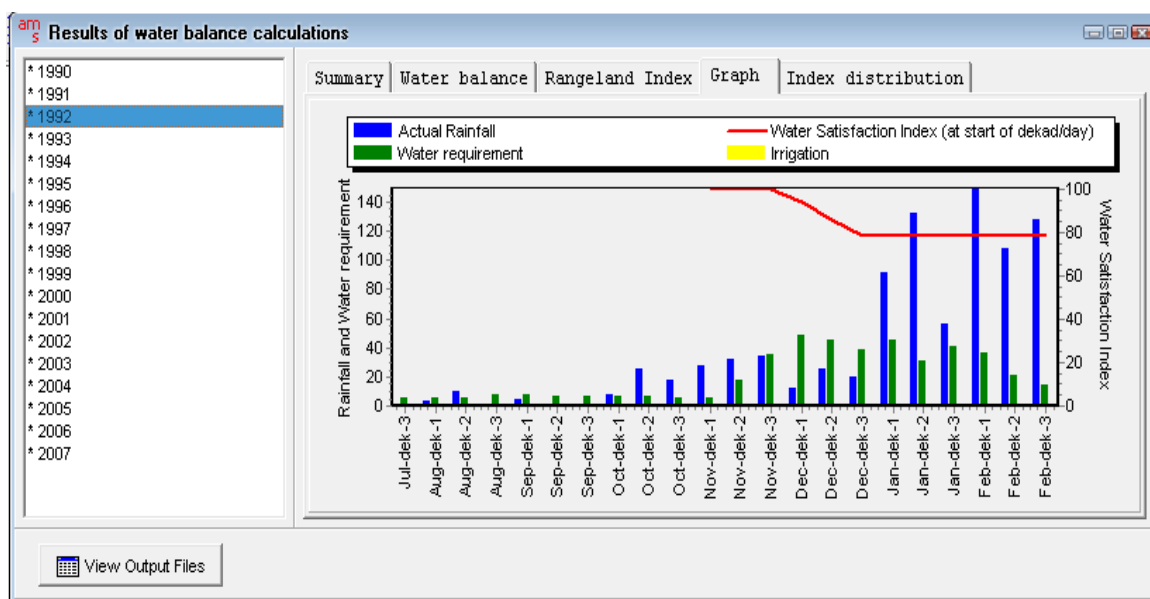
Année 1990



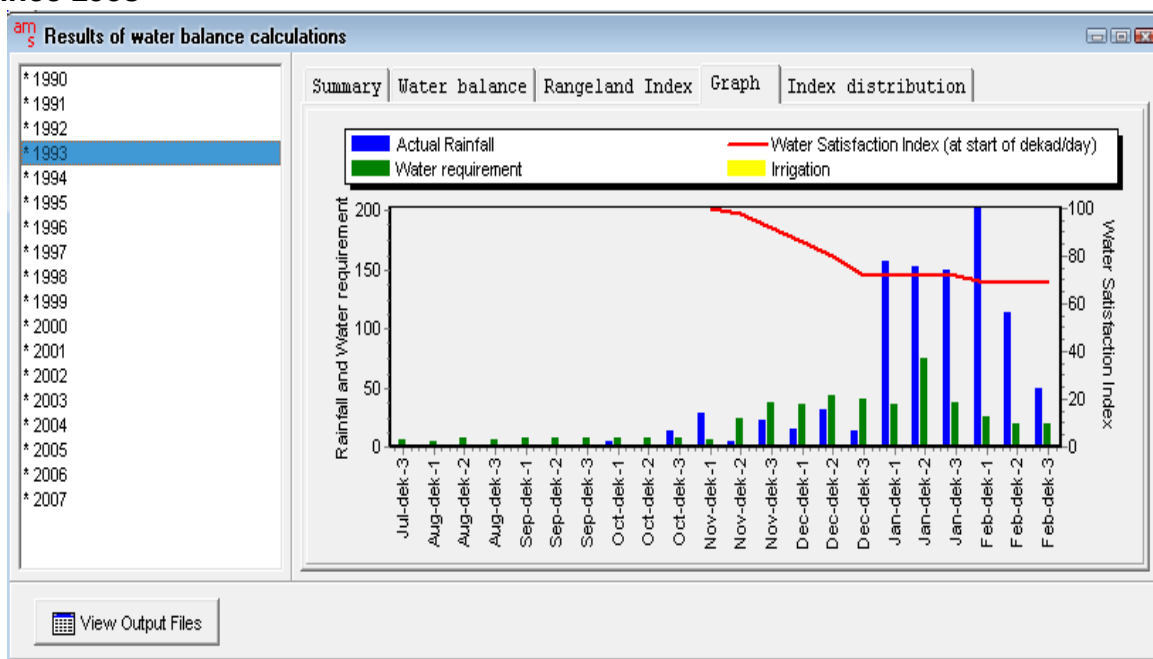
Année 1991



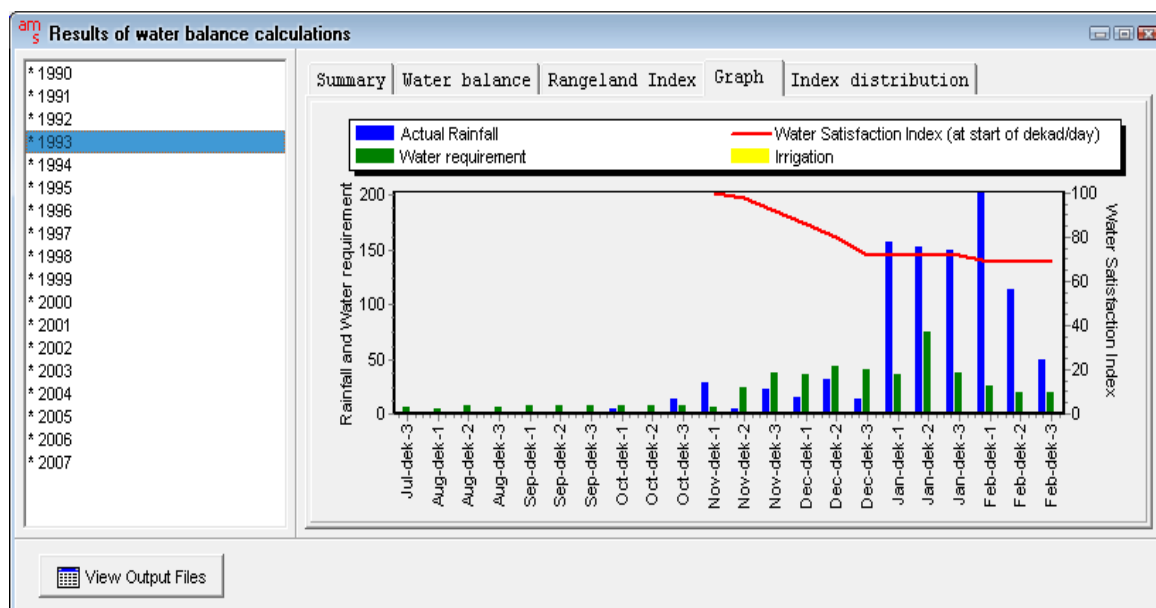
Année 1992



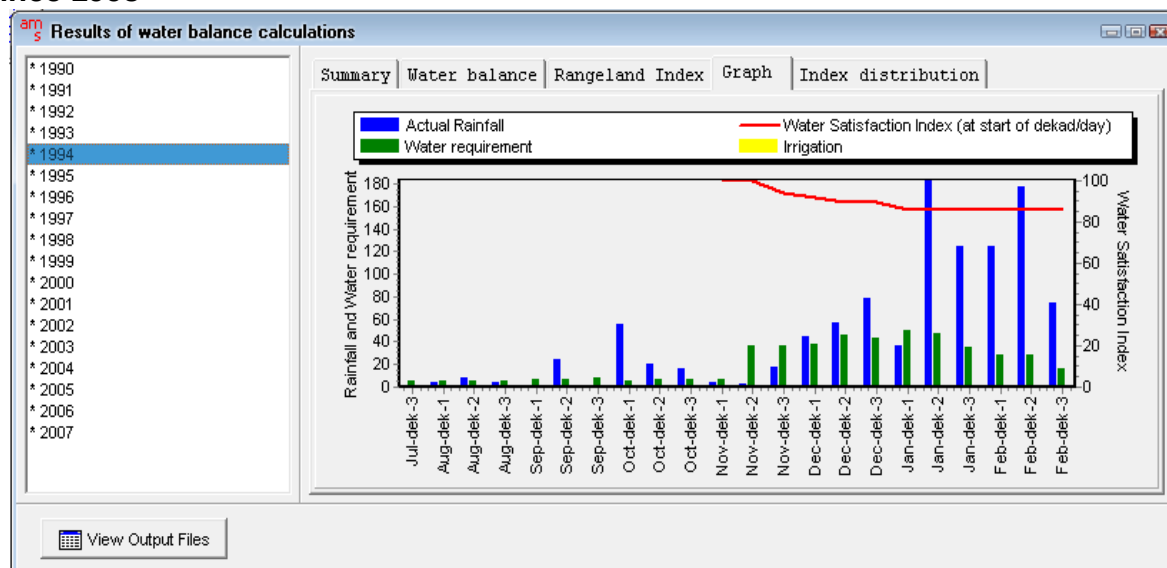
Année 1993



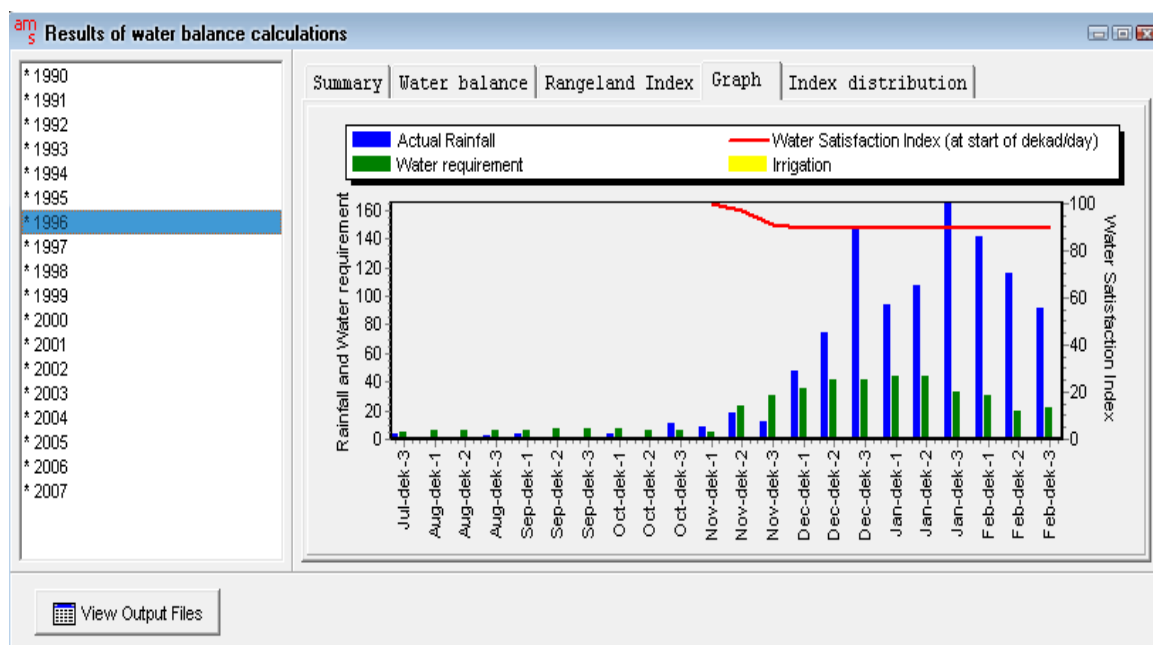
Année 1994



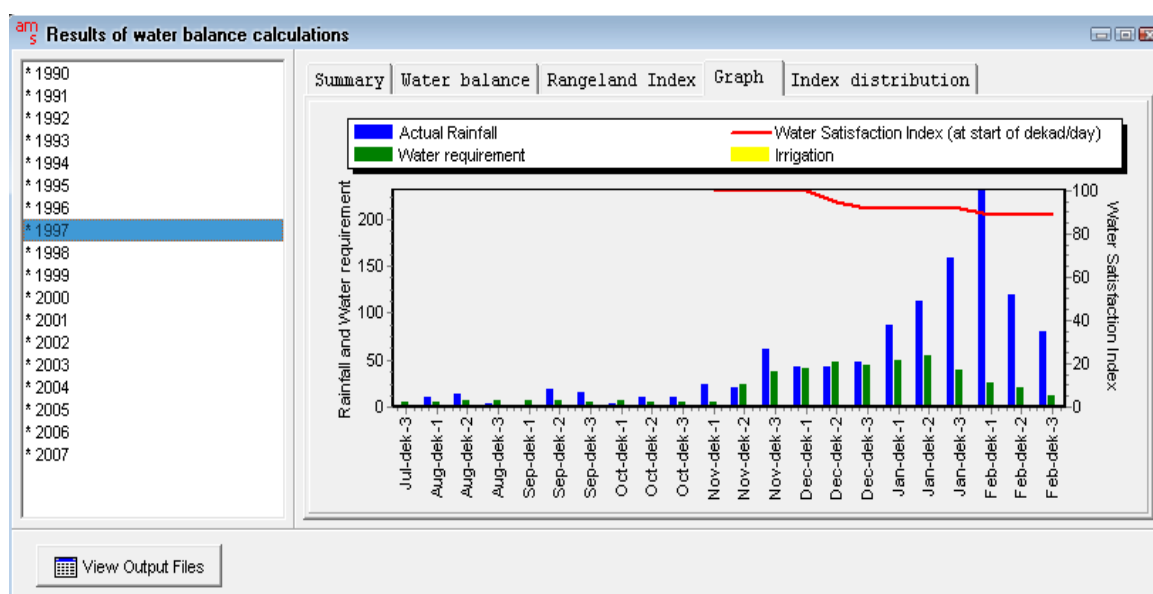
Année 1995



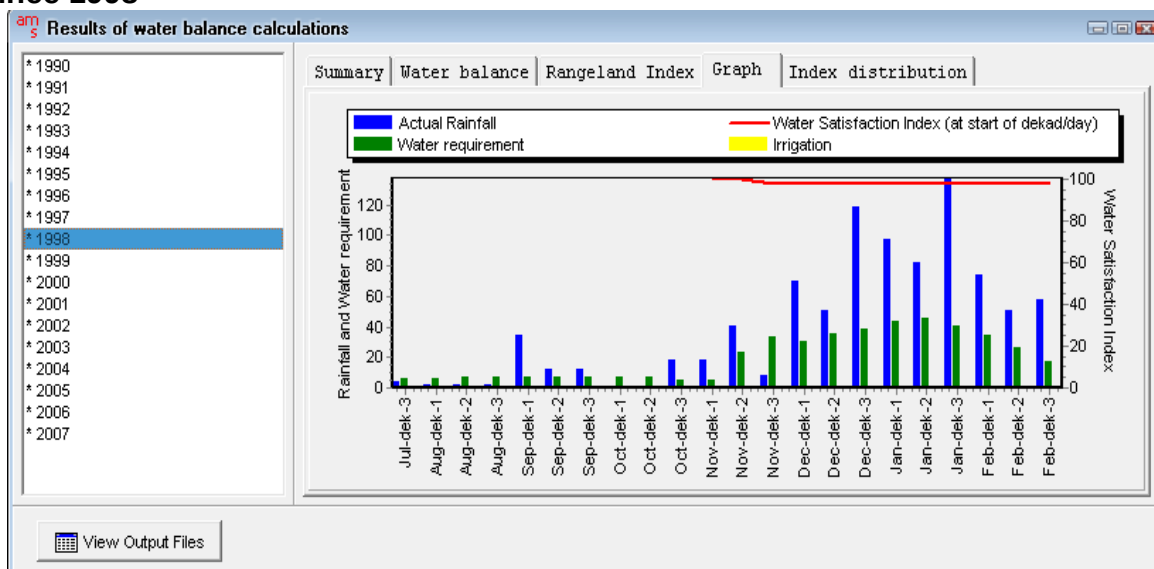
Année 1996



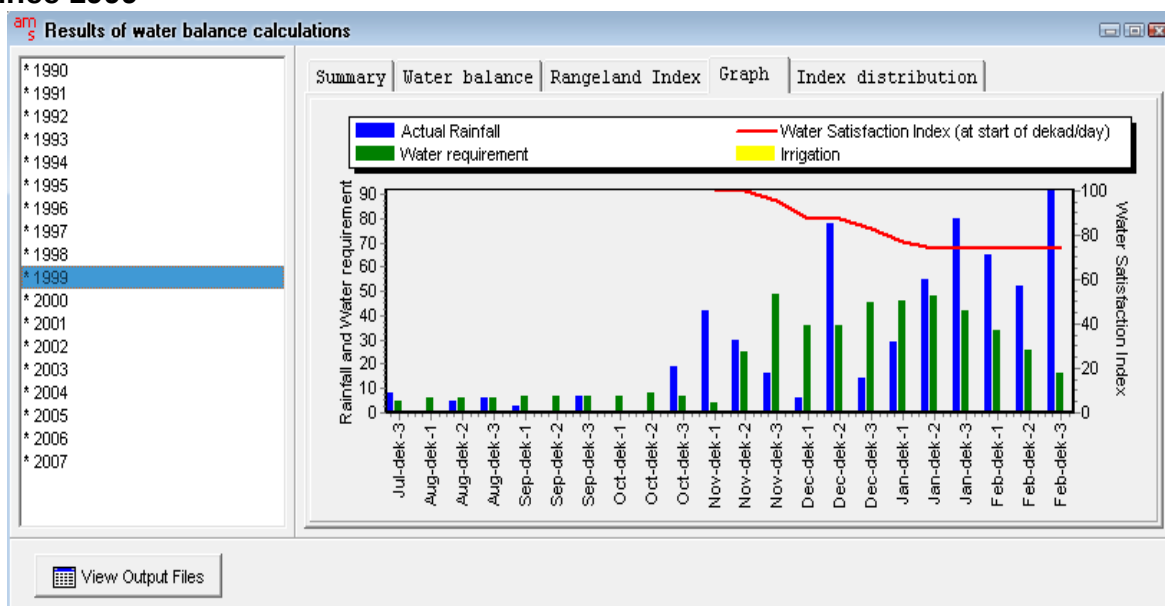
Année 1997



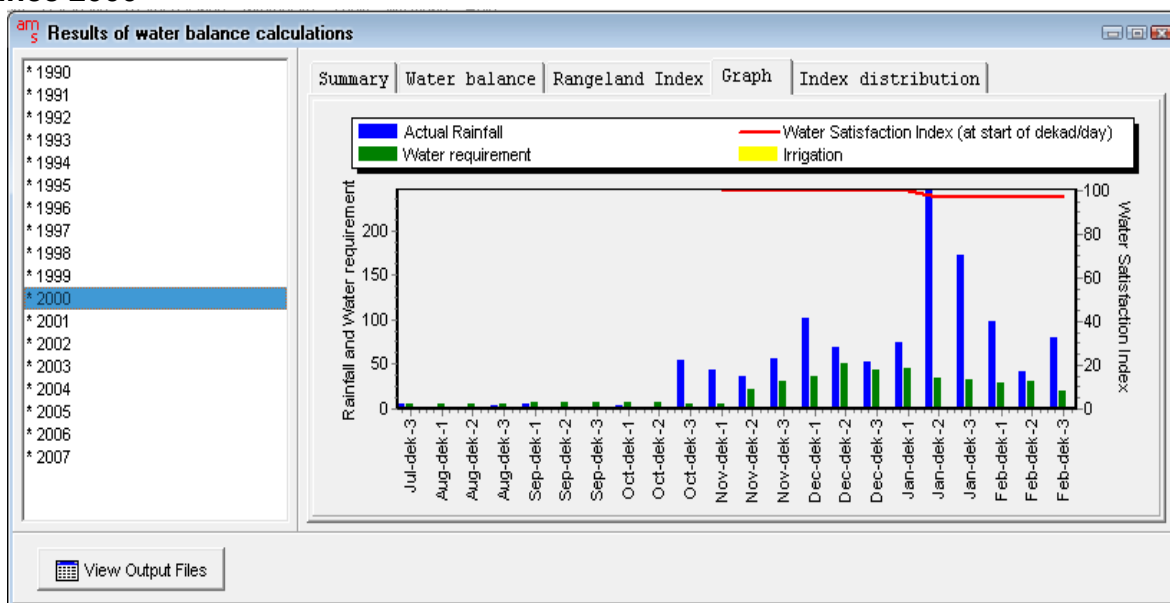
Année 1998



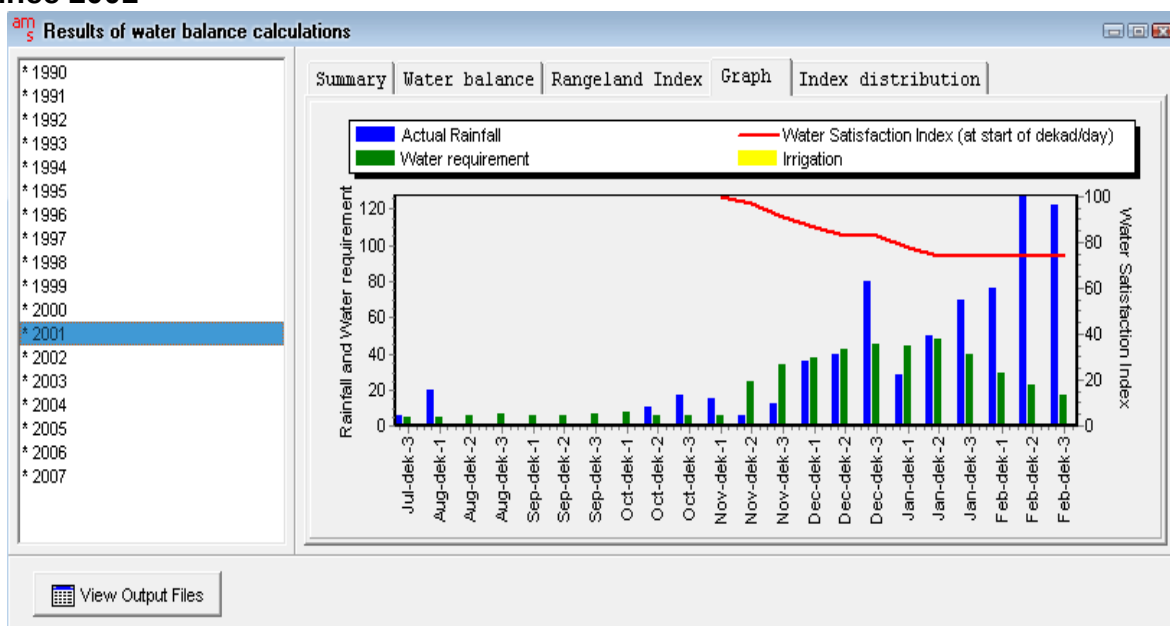
Année 1999



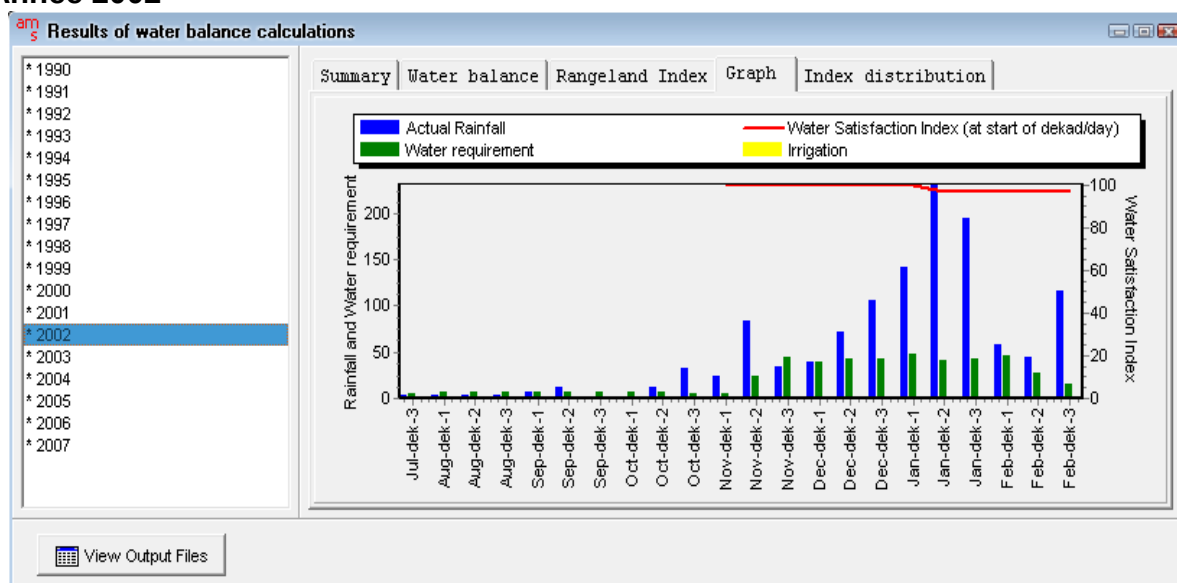
Année 2000



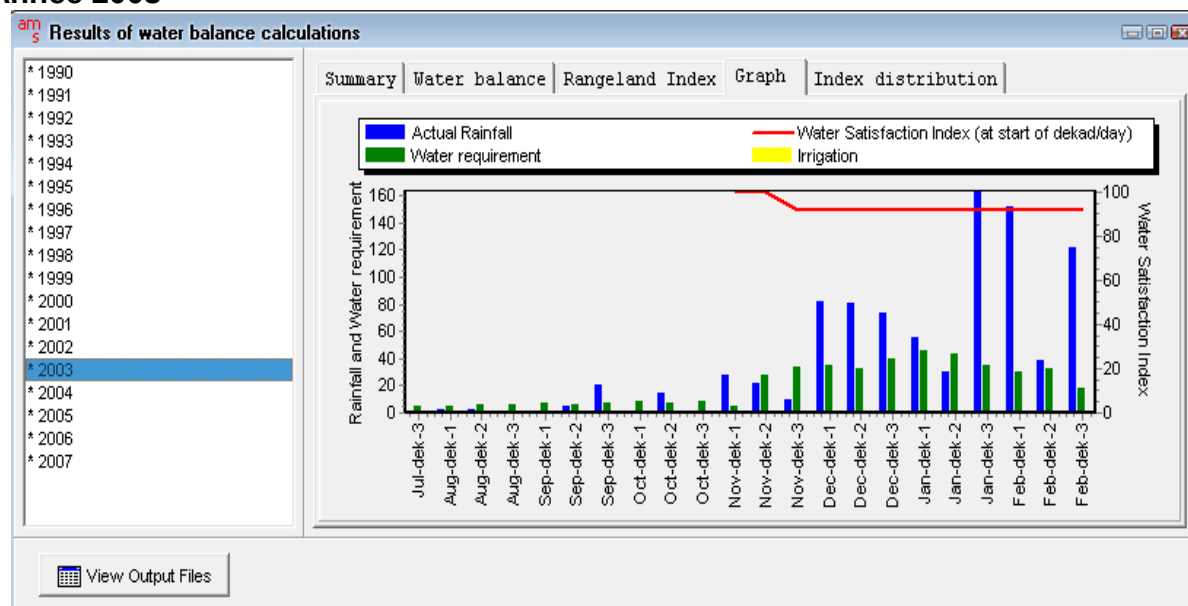
Année 2001



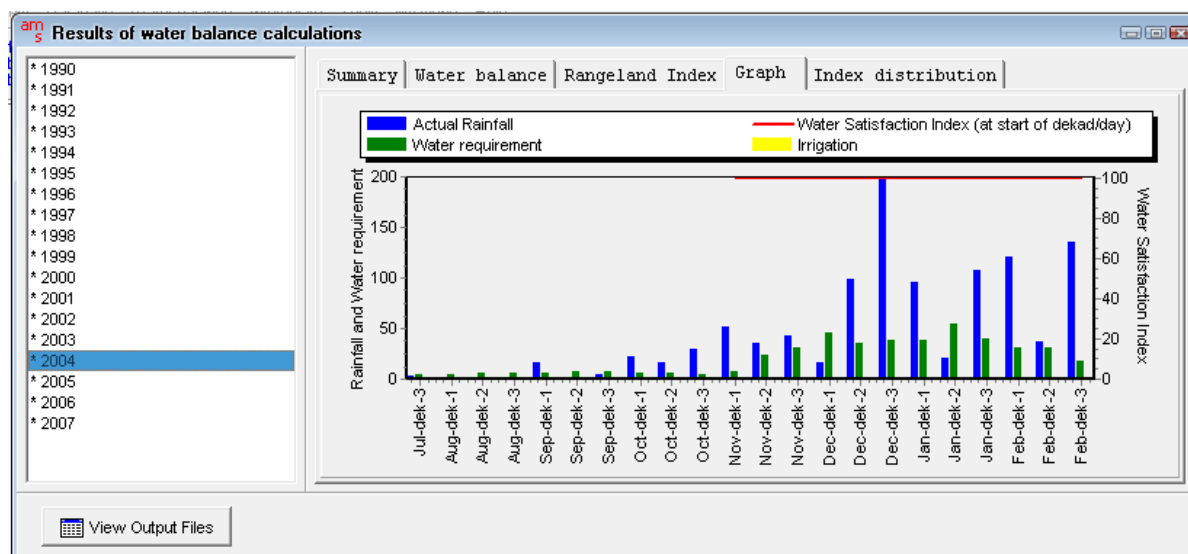
Année 2002



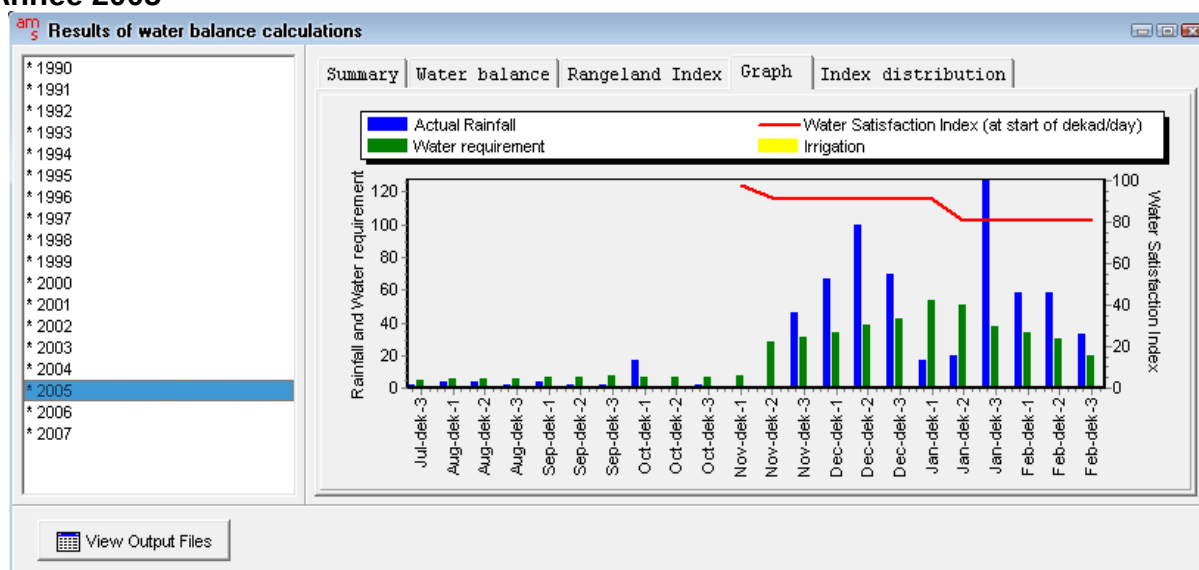
Année 2003



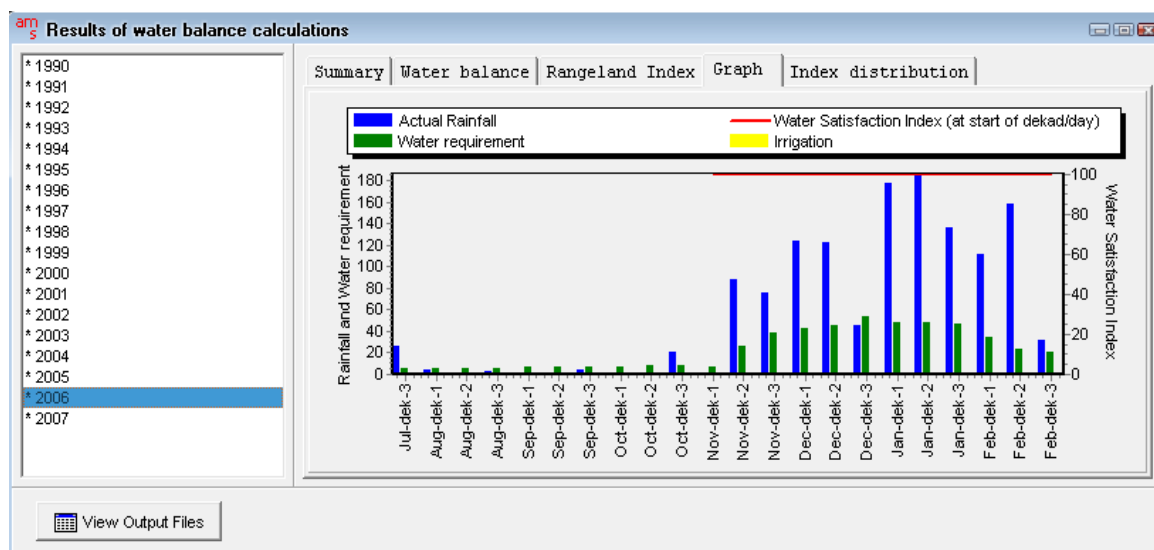
Année 2004



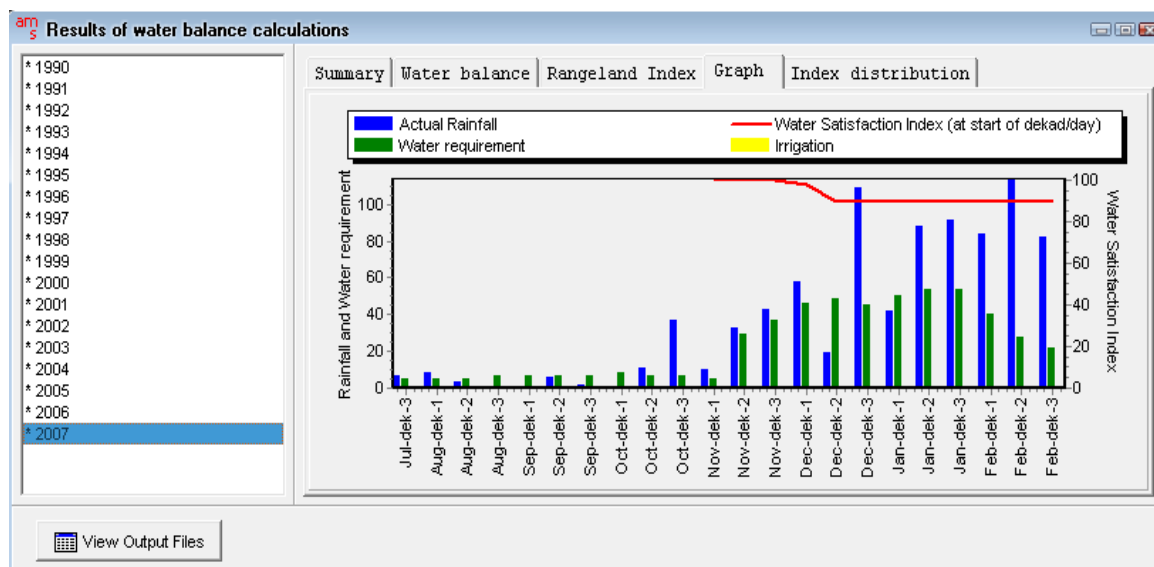
Année 2005



Année 2006

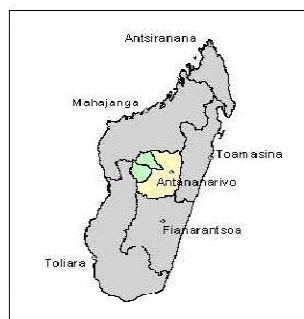


Année 2007



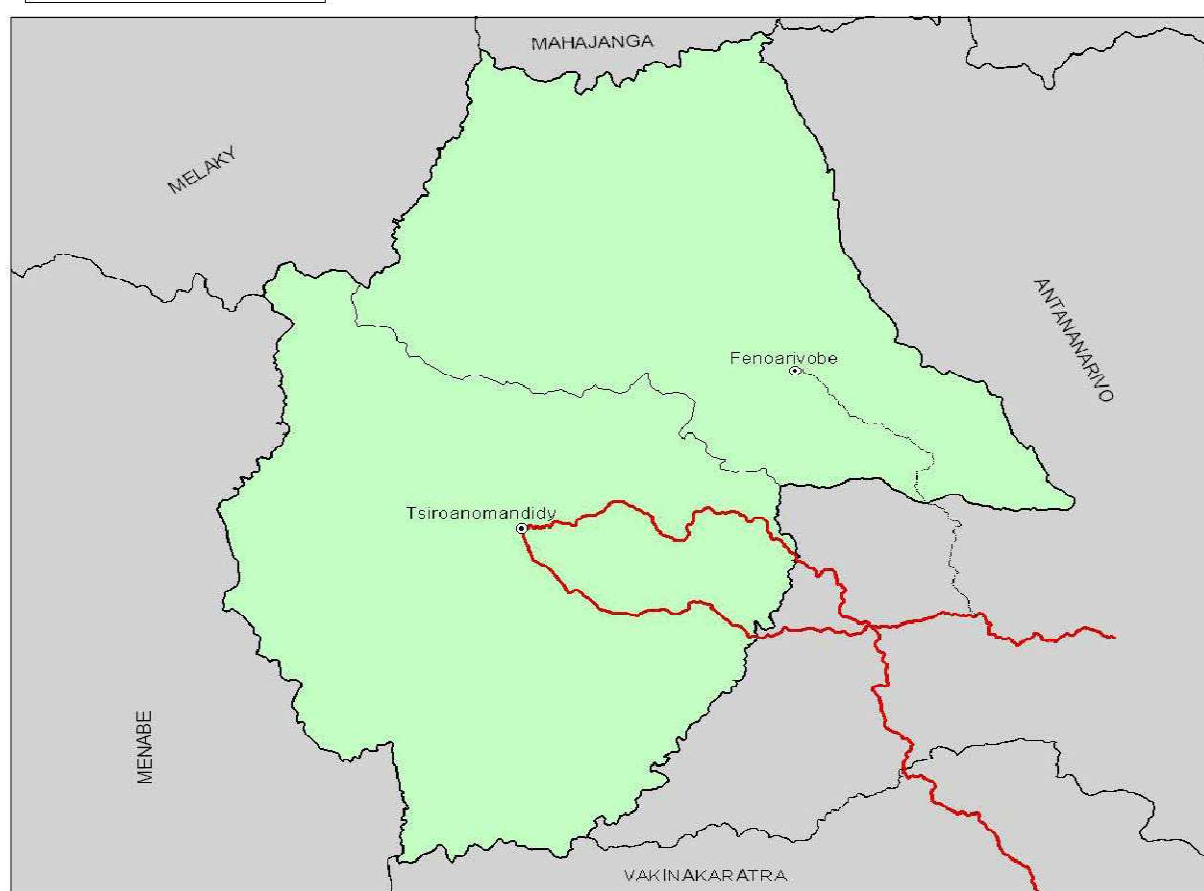
2- Carte de localisation de la région Bongolava

CARTE DE LOCALISATION DE LA REGION DE BONGOLAVA



DIRECTION REGIONALE de DEVELOPPEMENT RURAL DE BONGOLAVA

Code postal	Nom SSP
115	Fenoarivobe
119	Tsiroanomandidy



Source: BD 500 FTM / MAEP / SAGE

30 0 30 60 Km

Edition: Mars 2003

LEGENDE :	●	Chef lieu de Sous préfecture
	—	Route Nationale
	■	Délimitation des Sous préfectures
	■	Régions limitrophes

ANNEXE VII

TABLEAU RECAPITULATIF DE CALCUL DU BILAN HYDRIQUE

	X	Y	Z	H	Efr%	P	C	TWR	INDXLatest	WEXv	WEXf	WEXr	WEXt	WDEFi	WDEFV	WDEFf	WDEFr	WDEFt	ETAi	ETAv	ETAf	ETAr	ETAi	WEXi
1990	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	406	75	0	0	51	51	0	-40	-34	-34	-108	34	120	64	80	298	0
1991	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	402	71	0	0	128	128	-6	-90	-21	0	-117	21	82	63	120	286	0
1992	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	381	79	0	0	119	119	0	-87	0	0	-87	24	81	76	112	293	0
1993	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	399	71	0	0	193	193	-10	-107	0	0	-117	20	49	110	102	281	0
1994	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	414	70	0	0	161	161	-3	-49	-22	0	-113	41	115	76	108	340	0
1995	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	372	91	0	0	159	159	-10	-12	0	0	-22	15	129	98	108	350	0
1996	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	371	89	0	0	196	196	-11	-31	0	0	-42	17	120	88	105	330	0
1997	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	403	89	0	0	179	179	0	-45	0	0	-45	29	127	104	98	358	0
1998	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	375	96	0	0	37	37	0	-13	0	0	-13	28	125	90	119	362	0
1999	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	407	74	0	0	0	0	0	-74	-42	0	-110	29	92	52	118	291	0
2000	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	380	100	0	75	128	203	0	0	0	0	0	28	161	80	112	381	0
2001	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	391	71	0	0	32	32	-13	-61	-41	0	-115	17	98	51	109	275	0
2002	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	417	100	0	77	120	197	0	0	0	0	0	29	169	89	131	418	0
2003	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	379	94	0	0	75	75	-3	-28	0	0	-31	30	113	89	115	347	0
2004	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	392	100	13	20	84	117	0	0	0	0	0	30	151	93	118	392	0
2005	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	407	80	0	0	0	0	-34	-3	-53	0	-90	2	143	52	122	319	0
2006	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	434	100	0	99	142	241	-2	0	0	0	-2	31	181	96	125	433	0
2007	46.03	-18.4	900	100	61	31	12	460	89	0	0	0	0	0	-51	-3	0	-54	34	126	101	144	405	0

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. FAO(1987) : « Suivi agrométéorologique des cultures et prévisions des rendements ». Rome
2. FAO(1986) : « Les besoins en eau des cultures ». Rome
3. FAO (2002): « Training in crop monitoring and forecasting ». Rome
4. FAO(1998) : « Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements ». Irrigation and drainage paper 56
5. RABEZANAHARY Solofo Herimiandra: « Etude des bilans hydriques de systèmes de culture en labour et en SCV ». Mémoire d'ingénieur agronome à l'Ecole Supérieure de Science Agronomique ESSA.
6. JACQUOT M. COURTOIS B. (1983). « Le riz pluvial ». Le technicien d'agriculture tropicale. Collection dirigée par COSTE R. Editions G. – P. Maisonneuve et Larose. 134p
7. GRET (1990). « Manuel d'agronomie tropicale appliquée à l'agriculture haïtienne ».Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire d'Haïti Damien, Port au Prince, Haïti.490p
8. Elijah Mukhala et Peter Hoefsloot : « AgroMetShell Manual ».
9. BERNADI M.(2003). AgroMetShell Workshop: Other FAO software related to AgroMetShell. Rome,Italy
10. GUERILIS Pierre-Mary: « Contribution à la réflexion sur la manière de documentation de AgroMetshell(AMS) pour servir dans le suivi et la prévention ». - Diplôme d'Etude Spécialisée Interuniversitaire en Gestion des Risques naturelles, Université de Liège
11. <http://www.fao.org/sd/Eldirect/agroclim/concepts.htm>
12. Monsieur RANDRIANASOLO LEON ; « Cours Météorologie Agricole » (5^{ème} A – 2010)

Nom : RASANDIMALALA

Prénoms : Herilanto Marius

Contact : (261) 33.02.780.04

E-mail : sandmalalas@yahoo.fr

Adresse de l'Auteur : Lot 2 TA 24 Tsiroanomandidy Atsimo 119

Titre de mémoire: « CONTRIBUTION A LA PREVISION DE RENDEMENT DU RIZ PLUVIAL DANS LA REGION BONGOLAVA EN UTILISANT LE MODELE AGROMETSHELL (AMS) ».

Nombre de pages : 56

Nombre de figures : 15

Nombre de tableaux : 4

Mots-clés : AMS, Déficit en eau, Prévision, Rendement, Évapotranspiration potentielle.

Résumé

Ce travail est destiné à une grande exploration du modèle Agrometshell sur la prévision du rendement du riz pluvial dans la région Bongolava. On constate d'après les différents paramètres de sorties du modèle que les conditions climatiques agissent sur le rendement. L'irrigation pendant la phase végétative du cycle du riz pluvial est donc nécessaire pour améliorer le rendement. Une quantité suffisante de l'eau durant cette phase végétative assure un meilleur taux de production en riziculture pluviale dans la région Bongolava. De plus, il vaut mieux de faire une pluie provoquée au cours de cette période pour compenser le déficit en eau.

Directeur de mémoire : Madame RAHARIVELOARIMIZA Samuëline, Docteur Ingénieur en Chef.

