



**DIPLOME D'ETUDES SPECIALISEES INTERUNIVERSITAIRE
EN GESTION DES RISQUES NATURELS**

*Contribution à la réflexion sur la manière de
documentation de Agrometshell (AMS) pour servir
dans le suivi et la prévention*

GUÉRI LUS Pierre-Mary

**Mémoire de fin d'études
Année académique 2004-2005**

REMERCIEMENTS

Toutes mes gratitudee sont exprimées envers tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Cependant, il y a des personnes qui méritent un remerciement spécial. C'est le cas de :

Mon promoteur Bernard TYCHON, qui ma proposé le sujet et a pu m'encadrer du début à la fin malgré son emploi du temps toujours chargé ;

René GOMMES, mon co-promoteur qui m'a donné un encadrement à distance adéquat et m'a fait parvenir des données nécessaires pour le travail ;

Pierre OZER, mon coordonnateur à Arlon, toujours disposé à apporter son soutien à toutes les étapes de cette formation ;

André OZER, coordonnateur du programme, toujours déterminé malgré son age et qui a su se comporter comme un vrai père, un patriarche pendant l'année académique.

Mon organisme boursier, la CUD (Commission Universitaire pour le Développement) qui m'a donné l'opportunité de suivre cette formation ;

Enfin, mes parents et amis qui m'ont supporté moralement bien qu'ils soient éloignés de moi.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES ANNEXES.....	vi
RÉSUMÉ	vii
I. INTRODUCTION	1
1.1. Problématique	1
1.2. Objectifs.....	2
1.1.2. Objectifs généraux.....	2
1.2.2. Objectifs spécifiques	2
1.3. Les intérêts du travail	2
II. PRESENTATION DU MODELE	3
2.1. Objectifs du modèle.....	3
2.2. Description.....	3
2.3. Données d'entrées	4
2.4. Les sorties de AMS	5
2.5. Particularités de AMS.....	5
III. METHODOLOGIE.....	8
3.1. Documentation.....	8
3.2. Apprentissage de AMS.....	8
3.3. Données utilisées.....	8
3.4. Traitements des données.....	8
3.4.1. Au niveau d'une région agricole	9
3.4.2. Au niveau national	11
IV. ANALYSE DE AMS	12
4.1. Les points forts de AMS.....	12
4.1.1. Quant à la rapidité dans les prévisions	12
4.1.2. Quant à la gestion et au traitement des données	13
4.2. Les limites de l'outil AMS	14
4.3. Les bugs	16
4.4. Propositions d'amélioration	17
V. LES APPLICATIONS POSSIBLES DE AMS EN GESTION DES RISQUES NATURELS ET EN ENVIRONNEMENT	19
5.1. Réduction des risques en début de saison.....	19
5.2. Suivi de la sécheresse	20
5.3. Etude du changement climatique	21
5.4. Délimitation des zones potentielles pour une culture.....	21
5.5. Gestion de l'eau d'irrigation	21
5.6. Risque de pertes à la récolte	22
5.7. Zonage agro-écologique	22
5.8. Prédiction des productions agricoles.....	22
VI. UTILISATION DE AMS POUR LE SUIVI ET LA PREVISION DES RENDEMENTS DU MIL AU SENEGAL	23
6.1. Brève présentation du Sénégal.....	23
6.2. Simulations pour le suivi du mil dans une petite région	24
6.2.1. Préparation du bilan en eau.....	24
6.2.2. Calcul du bilan hydrique.....	26

6.2.3.	Enregistrement et visualisation des résultats	28
6.2.4.	Prévision du rendement à Bambey	31
6.2.5.	Prévision du rendement dans la province de Linguère : Prise en compte de l'effet tendance.....	32
6.3.	Suivi de la culture du mil au niveau national.....	34
6.3.1.	Sélection des stations.....	34
6.3.2.	Calcul du bilan pour l'ensemble des stations pendant une année	37
6.3.3.	Exploitation des résultats du bilan	39
6.3.4.	Interpolation des indices de satisfaction en eau	40
6.4.	Discussion.....	44
VII.	CONCLUSION.....	46
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	47
	ANNEXE	48

LISTE DES FIGURES

Fig. 1: Millet yield vs actual evapotranspiration Niger (1982-89).....	6
Fig. 2:Fenêtre montrant le processus d'importation des données	16
Fig. 3:Bug à l'ouverture de AMS.....	17
Fig. 4: En-tête de la fenêtre de la liste générale des stations	18
Fig. 5:Commencement de la procédure de calcul des dates de plantation	19
Fig. 6: Choix des critères pour le calcul des dates de plantation	20
Fig. 7:Résultats du calcul des dates de plantation.....	20
Fig. 8:Carte de localisation du Sénégal	23
Fig. 9: Début du processus de calcul du bilan en eau dans une station.....	24
Fig. 10:Intégration des informations de base d'un calcul de bilan en eau.....	25
Fig. 11:Vérification des coefficients culturaux dans AMS	25
Fig. 12:Variation du coefficient culturel du millet(bulrush) en fonction du cycle	26
Fig. 13:Variation du coefficient culturel du Finger millet en fonction du cycle	26
Fig. 14:Choix d'une durée de cycle identique pour toutes les années	27
Fig. 15: Tableau à compléter avant le calcul du bilan hydrique	27
Fig. 16:Fenêtre donnant la possibilité d'enregistrer le bilan	28
Fig. 17:Résultats du calcul du bilan montrant la distribution des indices de satisfaction en eau	29
Fig. 18:Graphique de synthèse du bilan de 1999 à Bambey.....	29
Fig. 19:Etape I de l'ouverture d'un fichier AMS dans Ms Excel	30
Fig. 20: Etape2 de l'ouverture d'un fichier AMS dans Ms Excel.....	30
Fig. 21:Etape 3 de l'ouverture d'un fichier AMS dans Ms Excel.....	31
Fig. 22: Variation du rendement du mil en fonction de ETAv à Bambey(1986-2000)	Error!
Bookmark not defined.	
Fig. 23:Tendance du rendement du mil à Linguère pendant 10 ans(1986-1995)	Error!
Bookmark not defined.	
Fig. 24:Rendement en fonction de ETAv	Error! Bookmark not defined.
Fig. 25:Rendement détendancé en fonction de ETAv.....	Error! Bookmark not defined.
Fig. 26:Comparaison des rendements réel et simulé.....	Error! Bookmark not defined.
Fig. 27:Corrélation entre rendements réel et simulé	Error! Bookmark not defined.
Fig. 28:Début du processus de sélection des station	35
Fig. 29:Dénomination du groupe de stations à sélectionner.....	35
Fig. 30:Nouvelle liste de stations	35
Fig. 31:Ajout de stations dans la nouvelle liste	36
Fig. 32:Tableau présentant la liste complète des stations sélectionnées	36
Fig. 33:Début de calcul du bilan pour un ensemble de stations.....	37
Fig. 34:Choix des paramètres de base pour le calcul du bilan.....	37
Fig. 35:Tableau servant à compléter les informations nécessaires pour le calcul du bilan.....	38
Fig. 36:Enregistrement du bilan et choix du pas de temps de la simulation	39
Fig. 37:Graphique de synthèse du bilan de la station de Bambey	39

Fig. 38:Début du processus d'interpolation des résultats	40
Fig. 39:Création du fichier de données pour l'interpolation.....	40
Fig. 40:Choix du paramètre à interpoler.....	40
Fig. 41:Affichage des valeurs du paramètre à interpoler pour chaque station.....	41
Fig. 42:Interpolation proprement dite.....	41
Fig. 43:Enregistrement du fichier résultant de l'interpolation.....	42
Fig. 44:Interpolation spatiale de l'indice de satisfaction du mil au Sénégal pour l'année 2000	42
Fig. 45:Distribution des valeurs ponctuelles utilisées dans l'interpolation spatiale	43

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Les données de rendement du mil pour les régions étudiées
- Annexe 2 : Résultats récapitulatifs du calcul bilan hydrique de la culture du mil à Bambey de 1986 à 2000
- Annexe 3 : Résultats récapitulatifs du calcul bilan hydrique de la culture du mil à Linguère de 1986 à 2000
- Annexe 4 : Résultats récapitulatifs du calcul bilan hydrique de la culture du mil au niveau du Sénégal en 2000

RÉSUMÉ

Avec la recrudescence des phénomènes climatiques défavorables pour les cultures et l'accroissement de la population, les communautés humaines deviennent de plus en plus vulnérables au problème alimentaire. Ce problème s'observe un peu partout dans le monde qui comptabilise actuellement près de 800 000 personnes sous-alimentées, les pays en développement étant les plus touchés. Dans le but de réduire cette insécurité alimentaire dans le monde, les organismes nationaux et internationaux oeuvrant dans ce domaine utilisent les systèmes d'alerte précoce.

Pour aboutir à cet objectif beaucoup de modèles de suivi de culture et de simulation de rendement ont vu le jour dont Agrometshell (AMS).

L'objectif de ce travail est de contribuer à rendre cet outil plus convivial afin de faciliter les tâches de ses utilisateurs et de les rendre plus efficaces.

Une analyse du modèle a été faite en vue de ressortir les points positifs et négatifs par rapport aux manipulations qu'on avait faites et de proposer des améliorations. Une exploration des utilisations de AMS dans des domaines autres que le suivi des cultures et la prévision de rendement a été envisagée.

En utilisant des données climatiques et de rendement, on a pu effectuer des simulations de 1986 à 2000 sur la culture du mil au Sénégal, l'une des céréales les plus importantes de ce pays. Il est montré qu'à partir des paramètres de sorties de AMS, on peut procéder au suivi du mil de sa date de plantation à la récolte ainsi qu'à la prévision de rendement. AMS peut aider dans ce travail tant au niveau local qu'au niveau national.

Mots clés : modèle, vulnérabilité, suivi de culture, besoin en eau, prévision, système d'alerte précoce

I. INTRODUCTION

1.1. Problématique

La population mondiale estimée actuellement à 6,5 milliards d'habitants peut atteindre la barre de 8,5 milliards d'ici 2050 selon le FNUAP(2004). Parmi tant d'autres implications que cela peut susciter, il va falloir qu'on produise pour répondre aux exigences alimentaires de cette population sans cesse grandissante et satisfaire l'attente des 800 millions de personnes actuellement sous-alimentées à travers le monde.

Ceci se révèle un grand défi pour l'agriculture vu que certains problèmes environnementaux (érosion, pluies acides, incendies, etc) contribuent à la dégradation des sols, base de la production agricole. A cela, s'ajoutent des phénomènes naturels tels inondation, sécheresse, cyclones et des maladies, spécialement le sida, qui rendent la sécurité alimentaire très précaire dans certains pays. Paradoxalement, les pays frappés par la famine sont ceux où règnent ces problèmes avec parfois une amplification par la guerre et le déplacement de population. De pareilles situations peuvent devenir chroniques en ce sens que la production déjà insuffisante pour combler les consommations risque d'être réduite par ces problèmes.

Ces phénomènes naturels sont difficilement maîtrisables par leur ampleur et leur récurrence, il convient d'agir de façon à réduire leurs conséquences quand ils font leur apparition.

Actuellement, pour réduire le risque de famine, la vulnérabilité des cultures au climat, améliorer la sécurité alimentaire, plusieurs organisations internationales et pays oeuvrent dans les systèmes d'alerte précoce dans le but d'atténuer les impacts notamment sur les populations vulnérables.

L'une des composantes d'un tel système est le suivi des cultures et la prévision des rendements agricoles. Plusieurs modèles destinés à ce travail ont vu le jour. L'un des avantages qu'ils offrent en agriculture est l'économie du temps car ils permettent de faire les prévisions et d'intervenir sans faire d'expérimentation sur le terrain. Agrometshell (AMS) en est un exemple. C'est un outil très intéressant pour un gestionnaire de risques naturels ; il permet de prévoir les impacts des conditions climatiques sur la production suivant qu'on est en situation de déficit ou d'excédent hydriques, suivant qu'il y a possibilité d'irriguer ou non dans un système de production. A l'échelle nationale, il peut aider, par exemple, à définir une date de plantation et évaluer la vulnérabilité des cultures à chaque stade phénologique.

Ce modèle est déjà expérimenté en Afrique australe, dans la corne africaine et en Afghanistan. Il présente l'avantage d'être argumenté et d'accès facile. Mais l'outil d'aide pour son utilisation n'est pas exhaustif. Cela peut constituer un handicap majeur pour un utilisateur

potentiel en ce sens qu'il ne soit pas aussi efficace par rapport à ce qu'on pourrait espérer ou que son emploi n'améliore pas la capacité de réponse du système d'alerte.

Ce travail vise à déboucher, à son terme, sur des propositions d'amélioration de AMS afin de le rendre plus convivial pour ses utilisateurs et d'aboutir aux objectifs pour lesquels il a été conçu. Préalablement, un apprentissage par l'utilisation de ses fonctions sera fait afin de révéler les atouts et les faiblesses du modèle pour finalement suggérer les points à améliorer ainsi que les différentes possibilités de sa valorisation dans le domaine de risques naturels.

1.2. Objectifs

1.1.2. Objectifs généraux

L'objectif principal du travail est de contribuer à l'apprentissage rapide et une utilisation efficace de AMS

1.2.2. Objectifs spécifiques

Ils se résument en :

- Déterminer les limites de AMS en terme de problème rencontré dans l'utilisation et de l'applicabilité de l'outil ;
- Apporter des compléments d'information visant à compléter l'outil d'aide existant ;
- Faire des propositions de solutions au problème de documentation de AMS ;
- Proposer des améliorations de certaines options afin de le rendre plus utile dans le domaine de suivi des cultures et la prévision des rendements ;
- Esquisser les diverses utilisations qui peuvent être effectuées avec AMS dans l'objectif de réduire l'insécurité alimentaire.

1.3. Les intérêts du travail

Outre l'intérêt académique, ce travail pourra permettre de

- Faciliter les tâches du gestionnaire de risques naturels qui utilise AMS ;
- Améliorer la performance des systèmes d'alerte ayant AMS comme composante ;
- Avoir un complément d'aide pour les futurs utilisateurs de AMS.

II. PRESENTATION DU MODELE

2.1. Objectifs du modèle

Les objectifs de AMS se situent principalement dans le suivi agrométéorologique 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, AMS se veut être :

- Un outil pouvant être intégré dans les systèmes d'alerte précoce tant nationaux, régionaux et 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*.



2.2. Description

Conçu par le hollandais Peter Hoefsloot pour le compte de la FAO, AMS est un modèle de suivi de culture qui utilise des données agrométéorologiques pour faire ses prévisions. Ces dernières peuvent être faites au pas de temps journalier mais étant donné que le plus souvent, on est confronté à un problème d'accessibilité de ces types de données, l'utilisation des pas de temps décennal et mensuel sont également possibles.

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. Les paramètres le plus souvent utilisés sont l'indice de satisfaction en eau et l'évapotranspiration actuelle.

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. 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 ; c'est comme s'il y a suffisamment d'eau pour effectuer une telle opération et la gestion de l'eau est supposée rationnelle, c'est-à-dire 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.

AMS fait aussi des simulations sans irrigation. Si on a des informations fiables qui prouvent qu'au niveau de la zone d'étude il n'y a pas moyens d'irriguer, alors, on choisira de tourner le modèle sans apport artificiel d'eau.

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

AMS présente la possibilité de travailler avec plusieurs stations sur une année de données ou avec une seule station sur plusieurs années, ce qui nécessite qu'il doit y avoir des observations sur plusieurs années. Le nombre d'années n'est pas défini, il doit être supérieur à deux.

2.3. Données d'entrées

Comme tout 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 fichier ASCII ou sous forme d'images. L'intégration de données se fait aussi de façon manuelle notamment quand on veut ajouter ou enlever une station à une liste déjà présente dans la base ou tout simplement compléter certaines informations concernant une station. Le modèle fait une agrégation des fichiers moyennant qu'on précise pour chaque importation une identité à la station, sa localisation en terme de latitude et de longitude puis son altitude. Quant aux types de données, elles peuvent être :

Des données agronomiques : elles concernent la date de plantation, la durée du cycle de culture (en décade) et la réserve en eau utile du sol. La première est exprimée en décade. Elle

peut être calculée par le modèle ou définie par l'utilisateur de AMS. La deuxième 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. Enfin le troisième paramètre peut, comme le deuxième, être entré manuellement.

Données climatiques : Normalement elles concernent tous les paramètres qu'on peut mesurer dans une station classique à savoir : les précipitations, la température, l'humidité relative, l'énergie radiative, la vitesse du vent et la pression atmosphérique. A part la précipitation et l'évapotranspiration potentielle, ces paramètres ne sont pas indispensables pour les simulations.

Données satellitaires et administratives : AMS utilise des images satellitaires traitées dans windisp. Des images relatives aux limites administratives peuvent être aussi importées et servir comme fond de carte déjà géoréférencé pour localiser spatialement la portion de territoire concernée par une situation particulière.

2.4. Les sorties de 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 MsWord. La plupart de ces sorties seront vues au chapitre qui traite des différentes utilisations du modèle.

2.5. Particularités de AMS

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

Bien que les deux modèles aient le même objectif, ils n'ont pas les mêmes perceptions en ce qui a trait aux facteurs qui peuvent affecter la production agricole. Wofost se base sur les conditions agroécologiques pour faire les prévisions à savoir : la teneur en eau du sol, la quantité d'éléments minéraux disponibles et la fraction assimilées par la culture, le type de sol, l'interception de la lumière solaire, l'assimilation de CO₂, etc. 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)

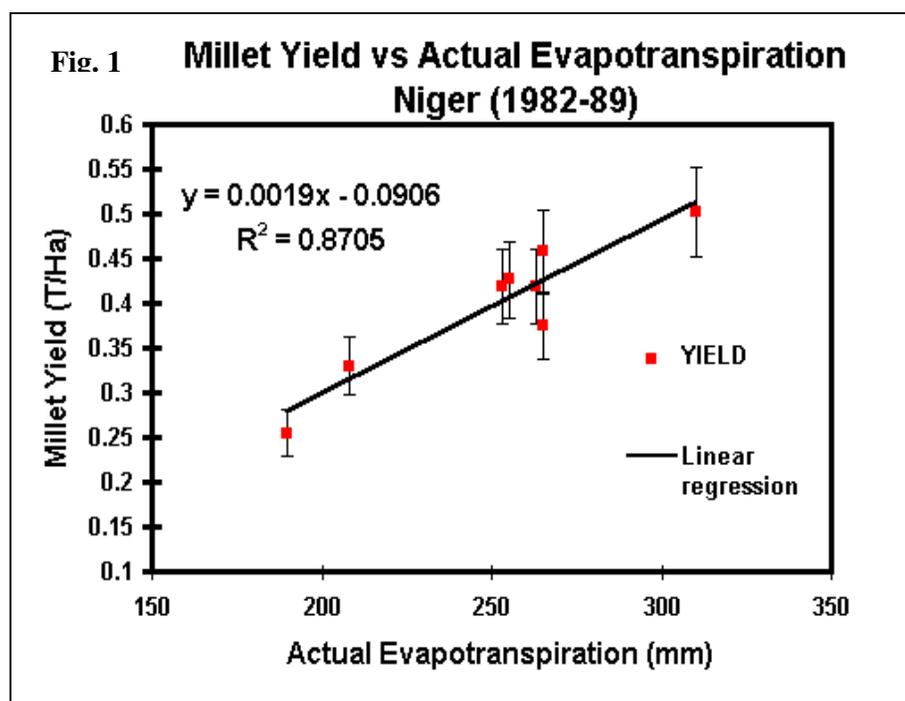
AMS se rapproche d'une boîte noire (black box) ; il fait allusion au développement de la plante en se référant à sa consommation d'eau à chaque stade mais, ne s'intéresse pas aux

échanges qui se font entre la plante et son milieu. Wofost, par contre, est un grey box ; il essaie de comprendre le mécanisme du système. C'est un modèle conceptuel.

En terme de hiérarchisation, Wofost peut 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. 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 : Wofost part avec l'idée que les conditions de fertilité sont les même 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.

À titre d'exemple, le rendement du millet au Niger sur la période de 1982 à 1989 est expliqué par l'évapotranspiration actuelle (Gommes, 2005), avec un R^2 de 0,8705, par la relation $Y = 0,0019X - 0,0906$ où X et Y représentent respectivement l'évapotranspiration actuelle et le rendement (fig1).



AMS est un modèle empirique en tant que tel, les prévisions les plus intéressantes sont obtenues sur une base de données expérimentales étendues, sans expliquer les relations de causes à effets sur les fluctuations du rendement. Wofost quand à lui est un modèle mécaniste

car il explique la croissance des plantes et le rendement par les processus fondamentaux de photosynthèse, de respiration et d'assimilation. Il essaie de voir l'impact des conditions environnementales sur ces processus et ressemble beaucoup plus à un modèle expérimental.

AMS est spatialisé et étend ses prévisions du niveau parcellaire au niveau national en passant par les niveaux communal, provincial, régional. Wofost est ponctuel, donc pour interpoler les résultats on est astreint à simuler en différents endroits et exporter les résultats vers un autre programme pour faire l'interpolation spatiale.

III.METHODOLOGIE

La démarche adoptée pour réaliser ce travail a été la suivante.

3.1. Documentation

Cette partie était portée sur la recherche et la consultation de travaux effectués sur AMS notamment. Ce sont des séances de présentations du modèle, des rapports traitant de l'utilisation de AMS dans le suivi agricole pour des pays ou des provinces

Ces documents ont servi de fait de manuel d'apprentissage et ont permis d'avoir une maîtrise plus rapide de AMS. Parfois pour certaines applications, il suffisait de faire une adaptation de ce qui a été fait en fonction des données disponibles

3.2. Apprentissage de AMS

C'est un des aspects très importants de la méthodologie. Pour commenter le logiciel il fallait l'apprendre afin de connaître son fonctionnement à tous les niveaux. Il faut donc savoir comment les données doivent être organisées avant d'être importées et utilisées pour faire tourner AMS. Les menus ont été utilisés par la pratique d'exercices pour la plupart. Pendant tout le travail on a utilisé la version *Agrometshell 1.00*.

3.3. Données utilisées

Les données utilisées concernent le Sénégal. Elles s'étendent sur une période de 15 ans allant de 1986 à 2000. Ce sont les données de précipitation, d'ETP, les températures minimum et maximum et les NDVI(Normalized Development Vegetation Index). Les précipitations et les NDVI sont de type décennaires. Les températures et l'ETP sont mensuelles. Les données sur le rendement de la culture du mil ont été aussi employées. Ces données proviennent de la cellule agrométéorologie de la FAO.

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 qui peut exister sur le terrain. Les dates de plantations sont extraites de la base de données SGBD du Comité Interétat pour la Lutte et le Suivi de la Sécheresse (CILSS)

3.4. Traitements des données

Les traitements que ces données ont subi concernent leur mise en forme afin qu'elles puissent être importées dans AMS. Celle-ci a été faite sur Ms Excel et les fichiers ont été enregistrés en format CSV(séparateur de virgule).

On a travaillé à deux niveaux : dans un premier temps on a travaillé au niveau des stations ; elles sont étudiées une par une afin de voir l'évolution du rendement sur une période par rapport à un facteur explicatif choisi. Ce dernier niveau nécessite une série la plus longue possible. Dans un second temps, on a pris en compte toutes les stations pour pouvoir faire l'interpolation spatiale et monter la possibilité de suivi d'une culture au niveau national.

3.4.1. Au niveau d'une région agricole

Étant donné que les caractéristiques agroclimatiques diffèrent d'une région à une autre au Sénégal, cela va influencer les activités agricoles, principalement les dates de semis et de récolte. On a décidé de travailler avec le mil à cycle court de 9 décades au niveau de toutes les stations. Ce choix a été justifié par le fait que les régions agricoles du pays subissent de plus en plus les agressions du climat et que pour pallier à ces effets on suppose que les agriculteurs utilisent le mil précoce. La date de plantation pour chaque station a été extraite de la banque de données SGBD du CILSS dont le Sénégal est un pays membre.

Elle varie d'une station à l'autre et pour une même station, elle varie d'une année à l'autre. L'écart interannuel au niveau des dates de plantation peut aller jusqu'à 5 décades dans une région. C'est le cas de la région de Matam dont la date de plantation est passée de la dix-huitième décade en 1988 à la vingt-troisième en 1989 en raison du retard du début des premières pluies. 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 100 mm à toutes les stations.

a) Méthode d'estimation directe du rendement

Cette prévision peut être faite pour une petite région agricole en utilisant les données moyennes.

Après avoir fait tourner AMS, on extrait les données 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), le surplus ou le manque d'eau aux phases initiale, végétative, de floraison, de remplissage ou de l'ensemble de la saison et en dernier lieu, l'évapotranspiration réelle à ces phases ou aussi sur l'ensemble.

b) Prise en compte des tendances

Une autre méthode consiste à prendre en compte la tendance qui existe au niveau de la série de rendements annuels. Pour ce faire, on exprime le rendement du mil en fonction du temps pour obtenir une tendance de type $y = ax + b$ (1),

où y est le rendement et x l'année ; a et b sont définis automatiquement dans Ms Excel. Pour obtenir cette expression, on utilise les 10 premières années. Les 5 dernières étant utilisées pour la validation.

Ensuite, on cherche le paramètre de sortie qui a la meilleure corrélation avec le rendement. On exprime le rendement en fonction de chaque paramètre et la corrélation qui donne le plus grand 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 :

$$R_{det} = R_{obs} - R_{dtten} \quad (2),$$

avec :

R_{det} : rendement détendancé ;

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

R_{ten} : rendement tendance. Il est obtenu en remplaçant x de l'équation (1) par l'année en question. Dans ce cas-ci, il varie de 1986 à 1995, soit les 10 années sur lesquelles on travaille.

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 : $R_{det} = ct + d$ (3)

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 a 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 ou suivant les stades phénologiques (initial, végétatif, floraison et récolte). Il peut arriver que le paramètre explicatif du rendement change suivant la région.

Un rendement simulé est obtenu en définissant une nouvelle expression du rendement à partir des équations (1) et (3), et en fonction des paramètres qui sont l'année et le facteur explicatif mentionné plus haut. Le rendement simulé utilise comme variable l'année et le st donc la somme du rendement tendance et de l'expression du rendement détendancé

$$R_{dt\ sim} = ax + b + (ct + d) \quad (4)$$

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 observés de chaque année. Elle est d'autant plus satisfaisante que le R^2 se rapproche de l'unité

Cette approche peut être reprise en utilisant les données de NDVI de la décade de récolte à la place des indices de satisfaction en eau à la récolte.

3.4.2. Au niveau national

A ce niveau, on travaille sur l'ensemble des stations pour lesquelles il existe des données nécessaires. Cela a permis de spatialiser les entrées et les sorties du modèle et aussi de faire les premières perspectives sur la campagne du mil à l'échelle nationale. Les calculs sont faits pour chaque année séparément avec toutes les stations. On utilise les mêmes types de données d'entrées mentionnés plus haut aux stations et on leur attribue les mêmes valeurs; la différence est que pour une même année, ces données varient d'un point à l'autre du pays vu que les régions ne sont pas soumises à un même et unique régime climatique. Il varie dans le temps et dans l'espace.

La prévision de rendement se réalise après la spatialisation des paramètres de sorties. Pour estimer le rendement dans une zone donnée, il suffit d'appliquer la relation qui peut exister entre le rendement et un de ces paramètres. Dans le cadre de ce travail, seulement la méthode simple d'interpolation a été utilisée. Mais AMS dispose plusieurs autres options d'interpolation regroupées dans la méthode de SEDI.

IV. ANALYSE DE AMS

En utilisant AMS on a pu révéler certains aspects intéressants qui peuvent pousser un gestionnaire de risques naturels à l'adopter pour le suivi des cultures et la prévision des rendements. Cependant, comme tout système il présente ses faiblesses.

4.1. Les points forts de AMS

4.1.1. Quant à la rapidité dans les prévisions

AMS est un outil qui présente plusieurs avantages : par son approche et ses options, il permet à un gestionnaire de risque naturel d'économiser du temps dans le suivi de culture et d'anticiper sur les prises de décision liées à une probable variation de rendement pendant une campagne agricole dans une zone donnée.

AMS est un modèle qui peut utiliser plusieurs types de données pour faire les analyses et celles-ci peuvent provenir de diverses sources. Il 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 qu'on maîtrise en détail les concepts de physiologie végétale, de nutrition minérale, etc.

AMS peut être utilisé dans le suivi de tout type de culture (cultures saisonnière, annuelle) pourvu que les données soient disponibles pendant tout le cycle. Il est aussi adapté tant pour les systèmes de production traditionnelle que moderne.

Etant donné que AMS se base sur le besoin en eau des cultures, il y a possibilité de simuler des rendements pour des cultures associées, à ce moment il faut de nouvelles données de rendement car ceux-ci ne sont pas nécessairement les mêmes qu'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 font la pratique de cultures associées. Cela pourrait aider à comptabiliser ces récoltes dans le bilan de la production.

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.

AMS est très synthétique et ses sorties cartographiques et graphiques, après interprétation, peuvent être aidées directement dans la prise de décision.

Combiné avec Windisp, AMS peut donner une localisation précise d'un phénomène avec coordonnées géographiques à l'appui. On est en mesure de circonscrire les zones vulnérables ou qui risquent de l'être. Cela peut apporter plus d'efficacité dans le cadre d'un système d'alerte national par exemple.

La phase du développement de la culture pendant laquelle un stress hydrique peut s'installer est déterminée à l'échelle temporelle d'une décennie. L'ampleur du phénomène sur le rendement sera donc évalué et n'aura pas la même considération selon le stade de la culture.

AMS peut reprendre une balance en eau avec les mêmes données agroclimatiques de base tout en imaginant d'autres scénarios possibles. Il donne les moyens de planifier les campagnes agricoles et de réduire les risques de perte de semences par le choix de bonnes dates de semis en fonction d'un seuil d'humidité décennaire fixé. Il offre aussi la possibilité de simuler la pratique d'une deuxième campagne pendant une année. Ce modèle peut aider à définir les situations exceptionnelles ou extrêmes en comparant les données actuelles aux valeurs normales.

AMS 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'elle. Cela facilite la reprise d'une même opération en un seul click sans reprendre le chemin normal.

4.1.2. Quant à la gestion et au traitement des données

AMS présente aussi de nombreux avantages pour ce qui concerne l'importation et l'exportation d'informations et constitue de ce fait une interface d'échange avec plusieurs systèmes d'exploitation (Windisp, Ms Excel, MS Word, Ms Access et Bloc notes). Ce qui fait qu'on peut directement récupérer à partir de ceux-ci les paramètres de sorties de AMS. En revanche, les données qui sont importées dans AMS sont préalablement traitées dans ces logiciels et enregistrées aux formats et extensions convenus tels : csv, dat, img, BNA; ce qui représente une très forte opportunité par le fait que ce sont des logiciels populaires et très utilisés.

La force de ce modèle c'est que, bien qu'il soit apte à intégrer diverses catégories de données, un minimum seulement est nécessaire pour faire les simulations. Cela facilite la tâche d'un gestionnaire de risques naturels AMS qui est appelé à travailler dans des conditions qui ne sont pas toujours idéales. Le fait que AMS n'est pas très exigeant et est adapté pour travailler

avec un minimum de données, cela paraît intéressant car le plus souvent l'acquisition à temps de la plupart de ces données météorologiques reste difficile.

AMS participe dans la gestion des fichiers agrometeo qui peuvent être parfois volumineux car une fois importée, ils y sont stockés et sont réutilisables pour d'autres simulations. Quand il est installé sur un poste informatique, il est donc une base de données à part entière qui s'agrandit à chaque sauvegarde de nouvelles données. Le calcul du bilan se fait à l'acquisition de nouvelles, ce qui fait que les cultures sont suivies pas à pas.

AMS permet de compléter les données manquantes au niveau d'une station. Il les remplace par des données normales. De ce fait, il peut faire les prévisions même si les données présentent des gaps. Cela facilite d'autres domaines d'activité utilisant des données climatiques autre que le domaine agricole. Ces données, une fois complétées, peuvent être soumises à des analyses statistiques pour d'autres fins.

AMS se veut 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.

AMS permet de créer de façon très conviviale les listes de stations à partir desquelles les calculs vont être effectués.

4.2. Les limites de l'outil AMS

Cet aspect est traité par rapport aux difficultés rencontrées lors de la manipulation de AMS et les bugs qui se sont produits.

Le plus grand problème de AMS est l'absence d'un menu d'aide complet. Pour surmonter les difficultés liées à son utilisation, on est tenu à rechercher des bribes d'informations disséminées dans plusieurs sources.

Un des grands inconvénients dans l'utilisation de AMS c'est le fait que le plus souvent les données ne seront pas disponibles à temps. Considérons qu'on veut faire une prévision de rendement du mil au Sénégal et que les conditions agrometeo de la dernière décade du mois d'octobre, considérée aussi comme la fin du cycle, l'influencent grandement, il va falloir accéder à ces données à temps afin de prévoir la situation alimentaire qui peut prévaloir après la récolte. Les données agrométéo peuvent prendre plusieurs mois avant d'être acheminées aux organismes oeuvrant dans le domaine de l'alerte rapide. Des fois aussi elles sont presque inaccessibles. Ceci représente une contrainte pour l'utilisation complète de AMS.

On n'a très peu de possibilités de jouer sur les intervalles et le nombre de classes affichées sur les cartes.

Quand on fait la copie d'une carte, on ne parvient pas à coller la légende par le même procédé. L'un des moyens de la coller à la carte est de copier la page de AMS sur laquelle celles-ci sont apparues (Ctrl + Prt Scr), de la coller dans une page vierge Ms Paint, puis de sélectionner la partie de l'image qui a la légende afin de la coller à côté de la carte. Une deuxième possibilité consiste à produire la carte dans Windisp.

AMS ne peut pas tourner le bilan si les données sont stockées sur un support amovible (cd, clé usb, disquette); autrement dit, il faut que les données soient dans la base de AMS avant de procéder aux calculs. L'inconvénient réside au fait que si son utilisateur change d'ordinateur, il est contraint à reprendre les importations pour continuer un suivi de culture.

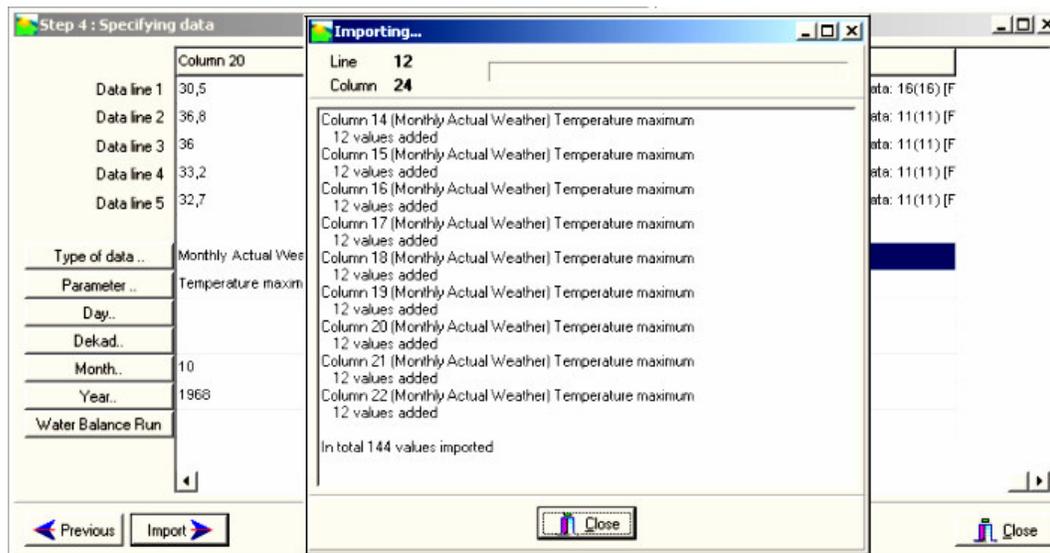
Après chaque nouvelle configuration générale (dans le menu *edit*) c'est-à-dire après avoir défini les limites et l'image qui doivent s'afficher à la visualisation d'un paramètre, on est obligé de fermer AMS puis de le relancer. Le fait de le fermer complètement pour que la nouvelle configuration puisse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

Etant donné qu'il y a échanges entre 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.

AMS présente aussi des faiblesses au niveau de l'aspect irrigation. D'abord la date de son application n'est pas spécifiée en décade qui est le pas de temps le plus souvent utilisé dans les simulations. Ensuite, la quantité d'eau n'est pas définie de façon détaillée sur la saison. Dans l'irrigation automatique par exemple, on se contente de définir la hauteur d'eau totale à apporter en millimètre (dans la colonne *Irrigation Bund Height*) sans pouvoir faire la distribution au niveau des décades déficitaires.

A la fin du processus correct d'importation de données, la fenêtre suivante apparaît :

Fig. 2: Fenêtre montrant le processus d'importation des données



Alors que l'opération est terminée avec succès, AMS donne l'impression qu'elle est encore entrain de se faire. A la tête de la fenêtre(fig. 2), on a *Importing...* et une seule option est possible (close) ; en cliquant dessus, on revient en arrière sur la fenêtre ayant pour entête *Step 4 Specifying data*. Mais si on ferme toutes les fenêtres et on va dans *data base/data inventory*, on vérifiera que les données ont été importées. Ceci représente un inconvénient dans la mesure qu'on a tendance à reprendre l'importation des mêmes données. Il serait mieux que cette étape se termine par un message indiquant le succès ou l'échec de l'opération avant de revenir en arrière. L'avantage de pouvoir accéder à la fenêtre précédente est qu'on peut continuer l'introduction d'autres types de données dans la base de AMS en court-circuitant les trois premières étapes. Il suffit de les enregistrer toutes sur une seule page en format csv.

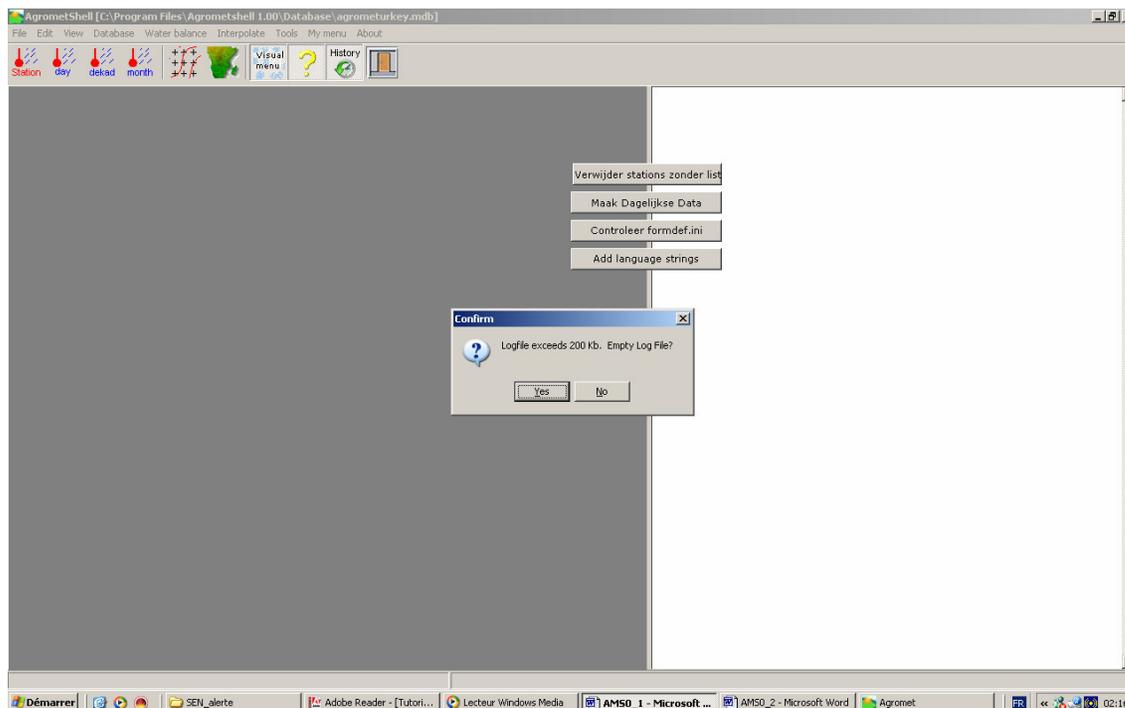
Les fait que AMS ne prend pas en compte certains facteurs comme la propriété des sols, la fertilité représente un manque. Il arrive souvent de trouver des rendements différents au niveau de deux zones où la même culture est suivie et les mêmes paramètres de sortie sont obtenus.

4.3. Les bugs

On a eu que deux bugs lors de l'utilisation de AMS. Dans les deux cas la solution appropriée était sa fermeture puis sa réouverture.

La première concerne la figure qui va suivre. C'est une fenêtre qui s'était affichée inhabituellement au démarrage de AMS(fig. 3).

Fig. 3: Bug à l'ouverture de AMS



La deuxième était survenue après avoir tourné un bilan en eau. En cliquant sur *View output files* pour visualiser les paramètres de sorties, une nouvelle fenêtre est apparue. Le bogue s'est produit quand on a voulu utiliser le menu *add graph* de cette fenêtre.

4.4. Propositions d'amélioration

A côté des améliorations à apporter aux aspects négatifs qui viennent d'être cités, d'autres propositions sont à faire :

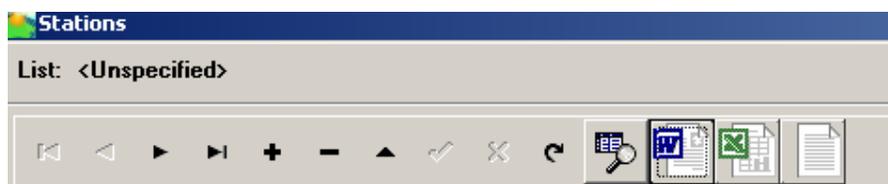
- Pour ce qui a trait au type de paramètres, il serait bon d'augmenter la hiérarchisation dans le choix des options, car si on veut entrer des données de rendements, il n'y a pas moyen de sélectionner une option sur la cultures par exemple. De plus, pendant l'importation, quand on sélectionne *weather actual values* en cliquant sur *Type of data*, il y a le *prix du maïs*, le *prix au kg* qui défilent comme des options au même titre que la température, la vitesse du vent, la précipitation, les températures min et max, etc. Ceci peut porter à confusion car ces deux paramètres ne sont pas des données climatiques. Ce problème ne se pose pas quand on choisit *Water balance* comme type de données ; les options au niveau du choix des paramètres sont clairement définies. Elles ne concernent que les éléments qui rentrent effectivement dans le calcul du bilan à savoir date de plantation, durée de plantation en décade, niveau de l'eau dans le sol, coefficient de pré-saison et l'irrigation.

- Au lieu de calculer le rendement à partir de l'indice final, il serait mieux que AMS calcule un indice global qui prend en compte la satisfaction en eau de l'ensemble de la saison car, le rendement est la résultante des conditions dans lesquelles la culture a évolué durant tout le cycle. Cela peut arriver que la pluviométrie équilibre les besoins à la dernière décade, mais si pendant la phase de remplissage des graines il ne pleut pas suffisamment, cela va fortement influencer le rendement. Généralement, au cours de la phase de croissance ou phase végétative, les cultures sont très exigeantes en eau, car c'est dans cette phase que le coefficient cultural est le plus élevé durant le cycle.

Une autre possibilité serait le calcul d'un indice de satisfaction en eau à chaque stade phénologique comme c'est le cas pour l'évapotranspiration réelle et le déficit. Ces indices pourraient aider à comprendre mieux les résultats acquis en fin de saison c'est-à-dire à la récolte. Un indice au remplissage par exemple présenterait un meilleur lien au rendement qu'un indice à la récolte car le remplissage est conditionné principalement par deux facteurs climatiques : l'insolation pour ce qui concerne la production de matière sèche et l'eau pour le transfert de cette matière aux organes.

- Une autre proposition consiste à améliorer l'interface de la fenêtre suivante :

Fig. 4: En-tête de la fenêtre de la liste générale des stations



Quand on pointe le curseur sur un des signes (fig.4), il n'y a pas de texte qui est affiché pour indiquer l'opération qu'il est possible d'effectuer. De même, il serait bon d'avoir comme dans Ms Word par exemple la flèche qui permet de revenir en arrière car en voulant éliminer une station, si le curseur n'est pas mis sur la ligne exacte, on risque d'éliminer une autre. Dans le cas où l'on souhaite annuler cette erreur, on risque de perdre toutes les opérations effectuées avant puisqu'il faut fermer la fenêtre.

- Pour pouvoir améliorer les analyses de risque, il est souhaitable que AMS soit muni d'une option permettant de caler les données réelles et normales lors des représentations graphiques. Quand on va dans *database/graph*, on n'a pas la possibilité de sortir des graphes avec les données normales ou même, de produire un seul graphe comprenant celles-ci et celles de la saison qu'on veut étudier afin de pouvoir les comparer.

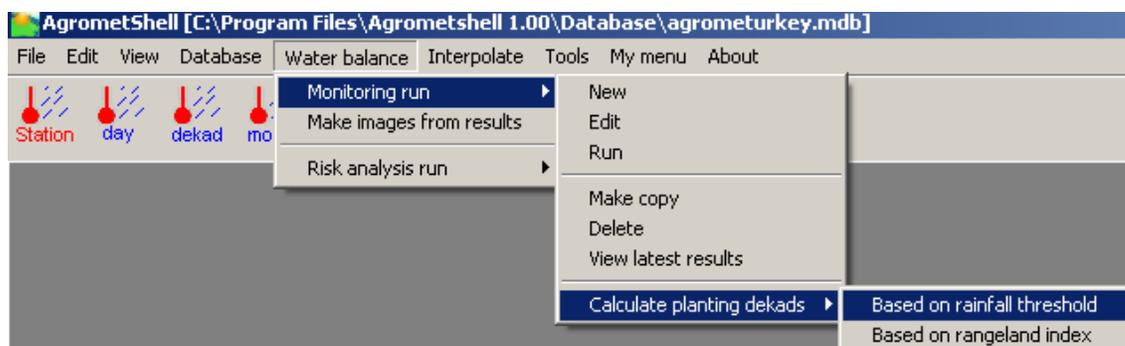
V. LES APPLICATIONS POSSIBLES DE AMS EN GESTION DES RISQUES NATURELS ET EN ENVIRONNEMENT

Pour le peu de manipulation effectuée dans AMS, on a pu voir qu'il est valorisable à d'autres points de vue dans les domaines de l'environnement et des risques naturels. Bien que AMS soit conçu pour le suivi des cultures et la prévision de rendement, il présente la potentialité d'être utilisé sous plusieurs angles.

5.1. Réduction des risques en début de saison

AMS peut aider dans le choix de la date de plantation (fig.5). Ceci se révèle important dans la mesure où une bonne date de semis réduit les risques de perte non seulement de semences mais aussi de capitaux. C'est le début du suivi des cultures. Cela se fait en fonction d'un niveau de précipitation décadaire fixée. La démarche est la suivante : on va dans *water balance/Monitoring run/ calculate planting dekads/ based on rainfall threshold*

Fig. 5: Commencement de la procédure de calcul des dates de plantation



On choisit le fichier qui contient les stations pour lesquelles on veut faire la simulation. Quand la fenêtre ci-après apparaît, il faut choisir la hauteur de précipitations qu'on veut avoir dans la décade qui sera choisie ainsi que l'intervalle de temps dans lequel on souhaiterait faire la plantation (fig. 6) ;

Fig. 6: Choix des critères pour le calcul des dates de plantation

La figure ci contre montre le critères du choix de la date de semis : la décade doit avoir une pluviométrie de 30mm et elle est comprise entre la première décade du mois de mai et la deuxième de juillet.

En cliquant sur Ok pour valider, une nouvelle fenêtre apparaît (fig. 7). Les stations au niveau desquelles ces critères ne sont pas respectés n'auront pas de date de plantation.

Fig. 7: Résultats du calcul des dates de plantation

Station Name	Planting Dekad	Cycle Length (dekads)	Water Holding Capacity (mm)	Percentage Effective Rainfall (0-100)	Pre-season KCR
BAMBEY-METEO		9	100	100	0.15
DAKAR-YOFF		9	100	100	0.15
DIOURBEL		9	100	100	0.15
GUJEDE		9	100	100	0.15
KAOLACK	19	9	100	100	0.15
KEDOUGOU	16	9	100	100	0.15
LINGUERE	19	9	100	100	0.15
MATAM	18	9	100	100	0.15
PODOR		9	100	100	0.15
SAINT-LOUIS		9	100	100	0.15
TAMBACOUNDA	18	9	100	100	0.15
THIES		9	100	100	0.15
ZIGUINCHOR	18	9	100	100	0.15

Cette fonction de AMS peut être utilisée pour conseiller les planteurs, pour établir des cartes et des stratégies de semis sur le plan national.

5.2. Suivi de la sécheresse

Le terme sécheresse varie suivant les sensibilités mais tout le monde s'accorde avec l'idée d'une réduction des précipitations dans une zone donnée. Ce phénomène peut être suivi à l'aide de AMS. Ceci peut se faire en comparant les précipitations normales avec les données pluviométriques actuelles recueillies pour une même zone. La comparaison doit se faire pour deux dates identiques afin de voir la différence. La durée de la sécheresse est déterminée en comptant le nombre de jours, de décades ou de mois durant lesquelles les précipitations

actuelles restent inférieures à la normale. Cependant, pour admettre qu'il y a sécheresse, il faut définir un seuil. On peut représenter cette comparaison sous forme graphique avec en abscisse le temps, sur un axe y les deux précipitations normale et actuelle et sur un autre axe y la différence en terme de pourcentage.

Au niveau national, pour pouvoir faire le suivi à partir de AMS, on prépare, par interpolation une carte de précipitation normale en fonction du pas de temps qu'on veut utiliser. Cette carte sert de référence pour comparer les nouvelles données. De-là, on peut définir des poches de sécheresse.

5.3. Etude du changement climatique

AMS peut apporter ses contributions dans l'étude du changement climatique. AMS donne la possibilité d'observer les conséquences de ce phénomène à partir d'un suivi des composantes climatiques de façon séparée. A cet effet, permet d'étudier l'impact des conditions climatiques, via des scénarios climatiques, sur les rendements des cultures, leur durée de cycle, etc.

5.4. Délimitation des zones potentielles pour une culture

Parfois certaines cultures présentent des contraintes au point de vue écologique. Elles peuvent exiger une tranche d'altitude particulière, une certaine gamme de température et un niveau de pluviométrie qui ne doit pas être en dessous d'un seuil et ayant une bonne distribution pour faciliter le développement. Cet aspect est à prendre en compte surtout lorsque l'agriculture se pratique en régime pluvial. AMS peut aider à déterminer l'aptitude d'une région pour une culture car avec ses sorties graphiques on est à même d'observer le niveau possible de chaque paramètres climatiques.

5.5. Gestion de l'eau d'irrigation

AMS convient parfaitement pour la gestion de l'eau d'irrigation dans les endroits où la pratique de cette technique est possible. En effet, le calcul du bilan hydrique donne les différentes périodes où la pluviométrie est inférieure aux besoins en eau des cultures. L'apport d'eau d'irrigation se fait à l'époque où le stress est déclaré et la hauteur d'eau est déterminée avec précision. Elle représente la différence entre les besoins réels et la disponibilité. Donc, quand les besoins sont satisfaits, on n'irrigue pas. Ceci est un véritable atout notamment dans

les régions arides et semi arides où la ressource en eau est limitée. AMS contribue à une plus grande efficacité dans l'utilisation de l'eau.

L'impact de l'application de l'irrigation est perceptible facilement. Ceci est vu par la différence qui existe entre la courbe de satisfaction en eau sans irrigation dans une première simulation, puis dans une seconde avec irrigation sur l'ensemble du cycle de la culture.

5.6. *Risque de pertes à la récolte*

AMS a la potentialité d'être utilisé dans l'analyse des risques de pertes au cours de la récolte. La fin de la saison une fois déterminée, on peut voir si elle coïncide avec les périodes pluvieuses. Si c'est le cas, le risque pour que la production chute est bien évident car le séchage sera perturbé et dépendamment du taux d'humidité des grains, ils se gonflent et germent; ce qui entraîne non seulement une perte de qualité des grains mais aussi une baisse au niveau de la quantité récoltée. L'humidité est aussi une condition nécessaire pour les attaques de champignons.

5.7. *Zonage agro-écologique*

La caractérisation des zones agro-écologiques résulte de la superposition des facteurs climatiques, édaphiques, topographiques et biologiques (végétation). AMS peut participer aux aspects de cette caractérisation liés aux indicateurs climatiques et topographiques. Il est en mesure de définir les zones aride, semi-aride, humide et subhumide en fonction des limites fixées. De la même façon, il peut aider dans l'identification des saisons. Ces informations couplées avec l'analyse de la végétation et des sols sont des clés capables de donner des indices intéressants dans le zonage.

5.8. *Prédiction des productions agricoles*

La production agricole pour une culture donnée est obtenue en faisant le produit du rendement par la surface occupée par celle-ci. Le rendement est établi par culture et si les données de surface sont disponibles, la production se détermine facilement pour chaque culture en présence. A l'échelle nationale, l'estimation de la production totale du pays se fait en convertissant les différentes productions en équivalent-céréales. Dans ce type de travail, AMS est utile dans la prévision des rendements et la précision dans la prédiction de la production en dépend.

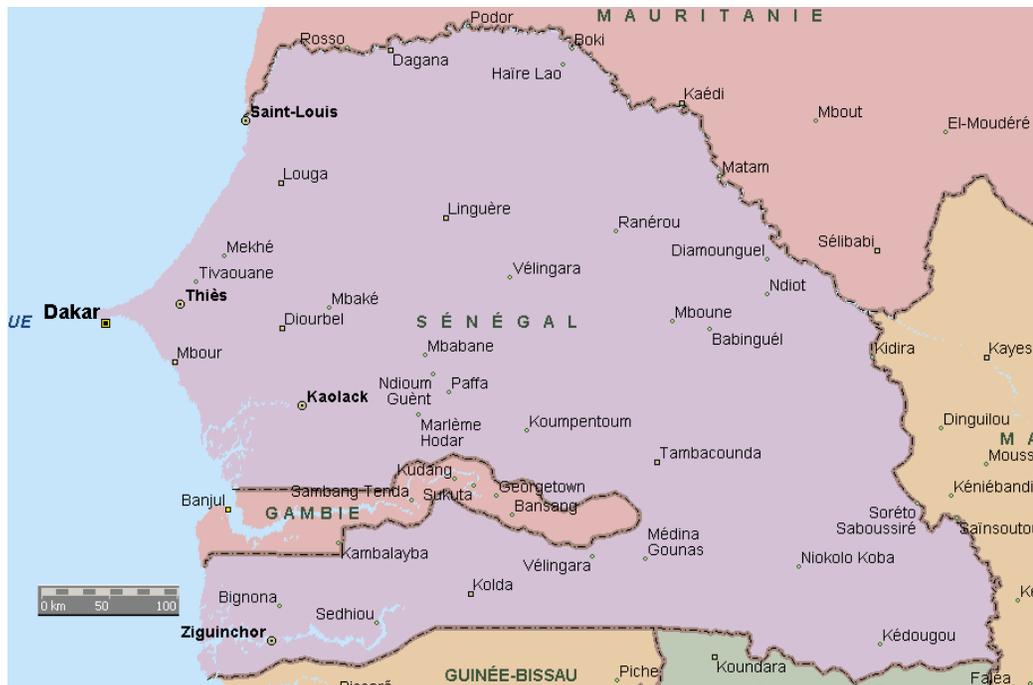
VI. UTILISATION DE AMS POUR LE SUIVI ET LA PREVISION DES RENDEMENTS DU MIL AU SENEGAL

Cette dernière partie est donnée comme une application concrète pouvant être mise en place avec AMS. C'est un exemple qui peut être intégré dans le tutorial qui devait accompagner le logiciel.

6.1. Brève présentation du Sénégal

Situé dans la partie ouest de l'Afrique entre les latitudes 12° et 16°30 Nord et les longitudes 11°30 et 17°30 Ouest, le Sénégal a une superficie de 196 722 km² pour une population de 10 580 307 habitants (estimation 2003). Plus de la moitié de la population soit 52% du total vit en milieu rural. Cette tranche de la population qui représente près de 74% de la population active vit principalement de l'agriculture et des activités pastorales. L'agriculture contribue dans le PIB à 20%. Le mil est l'une des principales cultures pratiquées au Sénégal. On le cultive sur tout le territoire dans un système pluvial. Ce qui fait qu'à cause de l'agressivité du climat de ce pays, le rendement connaît de sérieuses fluctuations.

Fig. 8: Carte de localisation du Sénégal



6.2. Simulations pour le suivi du mil dans une petite région

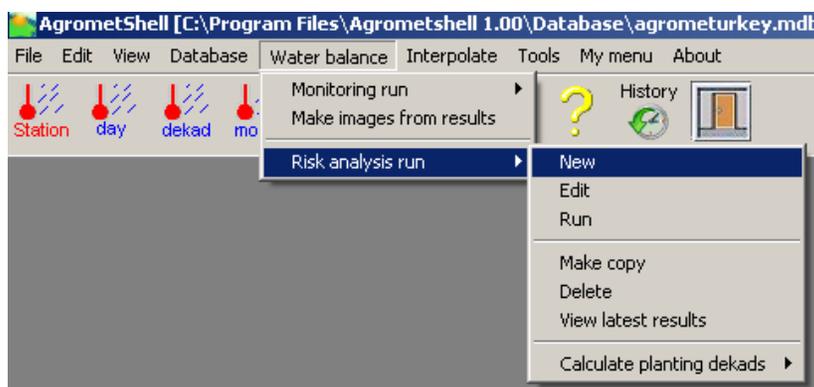
On suppose que les données sont déjà incorporées dans la base de AMS. Les simulations sont faites pour un total de 9 stations. Ce sont des stations pour lesquelles les données pluviométriques, d'évapotranspiration potentielle(ETP) et de rendement sont disponibles.

6.2.1. Préparation du bilan en eau

Pour pouvoir expliquer la variation du rendement en fonction des paramètres climatiques dans une petite région c'est-à-dire au niveau local, on fait le calcul du bilan hydrique à partir d'une station sur plusieurs années. Dans ce travail, seulement la démarche pour la station de Bambey sera présentée.

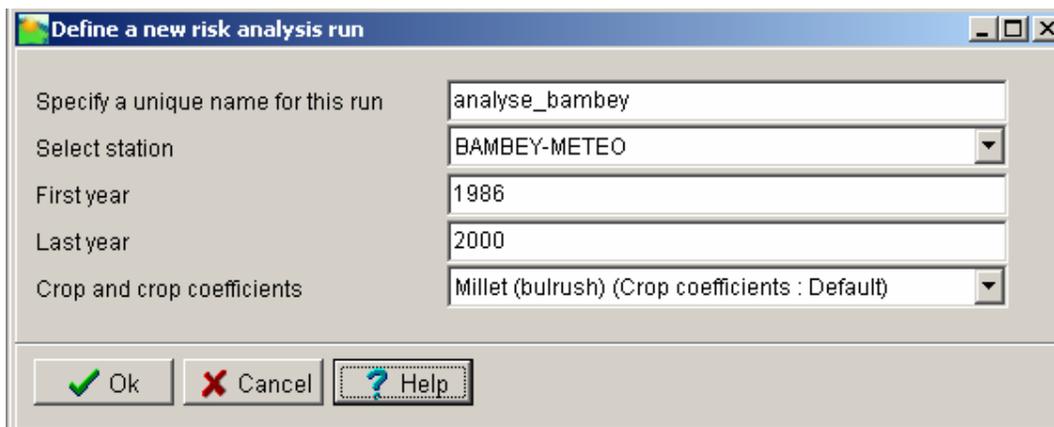
On va dans le menu *Water balance* et on choisit *Risk analysis run / New*

Fig. 9: Début du processus de calcul du bilan en eau dans une station



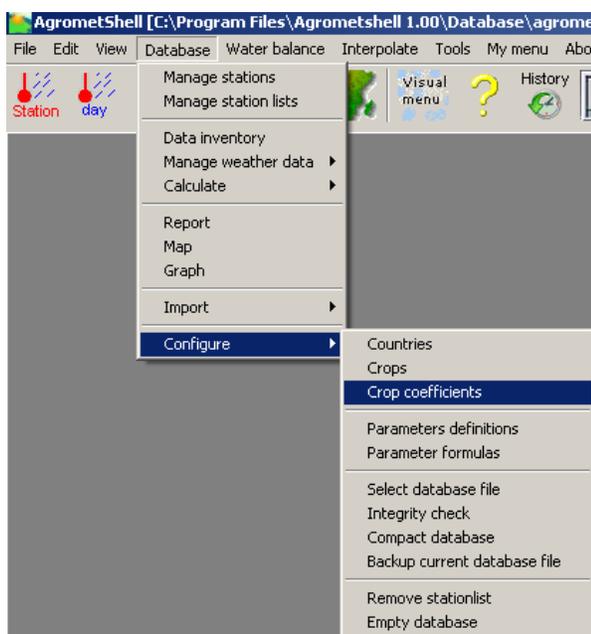
Dans la fenêtre qui s'affiche, on écrit dans la première ligne le nom de l'analyse(fig.10). Dans ce cas, le nom est analyse_bambey. A la deuxième ligne, on utilise le menu déroulant pour sélectionner la station qui va être utilisée : Bambey-Meteo pour ce cas. Les troisième et quatrième lignes servent à choisir l'intervalle sur lequel on veut travailler. Les années 1986 et 2000 ont été retenues respectivement pour les lignes trois et quatre car on travaille sur 15 ans. La cinquième ligne consiste au choix la culture qu'on veut étudier. Le choix a été porté sur le millet (bulrush).

Fig. 10: Intégration des informations de base d'un calcul de bilan en eau



A rappeler que dans le menu déroulant de la cinquième ligne, il y a deux type de mil : millet (bulrush) et figer millet. On a choisit le premier car il est moins exigeant en eau. Cette caractéristique est vérifiée en utilisant le menu *database/ configure/ crop coefficients*(fig. 11) :

Fig. 11: Vérification des coefficients culturaux dans AMS



Le millet (bulrush) a un coefficient cultural (K_c) plus faible durant son cycle comparativement au finger millet(fig 12 et 13). Les courbes de variation du coefficient par pourcentage du cycle sont présentées plus bas pour le millet bulrush et le finger millet respectivement :

Fig. 12: Variation du coefficient cultural du millet (bulrush) en fonction du cycle

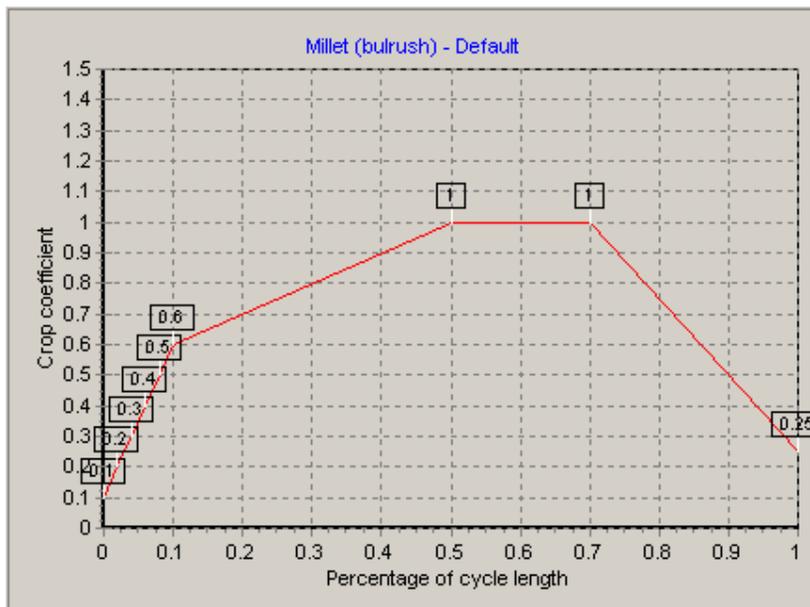
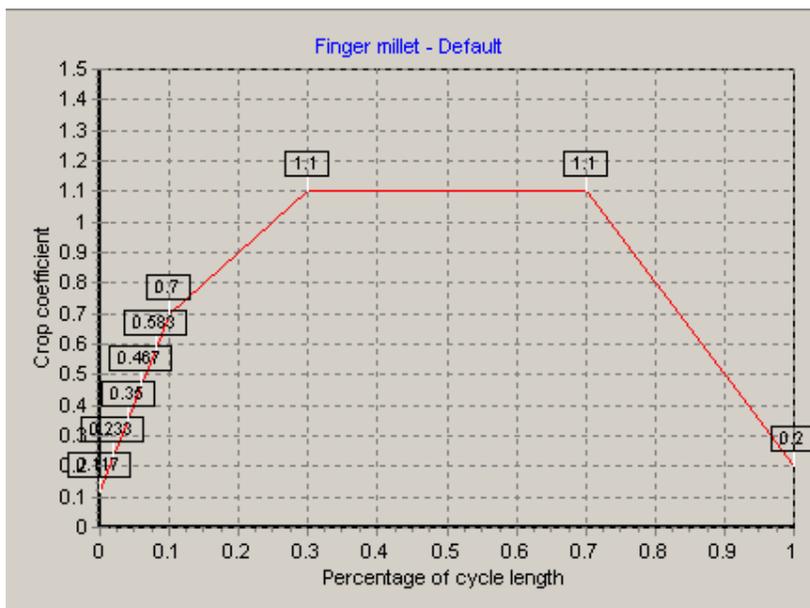


Fig. 13: Variation du coefficient cultural du Finger millet en fonction du cycle

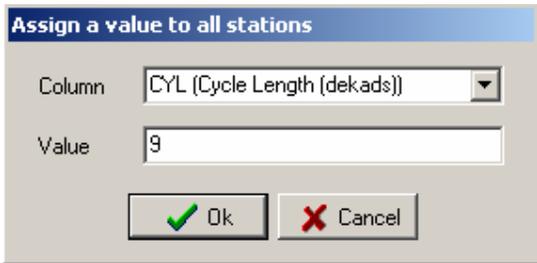


6.2.2. Calcul du bilan hydrique

Après la validation des choix effectués plus haut, il va falloir remplir les colonnes du tableur qui est affiché (fig 15.). Les dates de plantation à Bambey sont influencées par le début de la saison pluvieuse, on les rentre manuellement dans la première colonne. La durée du mil a été fixée à 90 jours soit 9 décades. Donc dans la deuxième colonne, on peut rentrer cette valeur automatiquement parce qu'elle sera la même sur toute la colonne. Pour se faire, on clique sur

le bouton  situé au haut de la fenêtre après avoir pointé le curseur dans l'une des cellules de la colonne. On tape 9 dans la deuxième ligne de la figure suivante, ce qui correspond à la durée de la saison pour cette culture (fig.14). On valide en cliquant sur OK.

Fig. 14: Choix d'une durée de cycle identique pour toutes les années



On fait la même démarche pour les autres colonnes. Les valeurs à attribuer sont les suivantes :

Water holding capacity of the soil (mm): 100

Percentage effective rainfall : 100

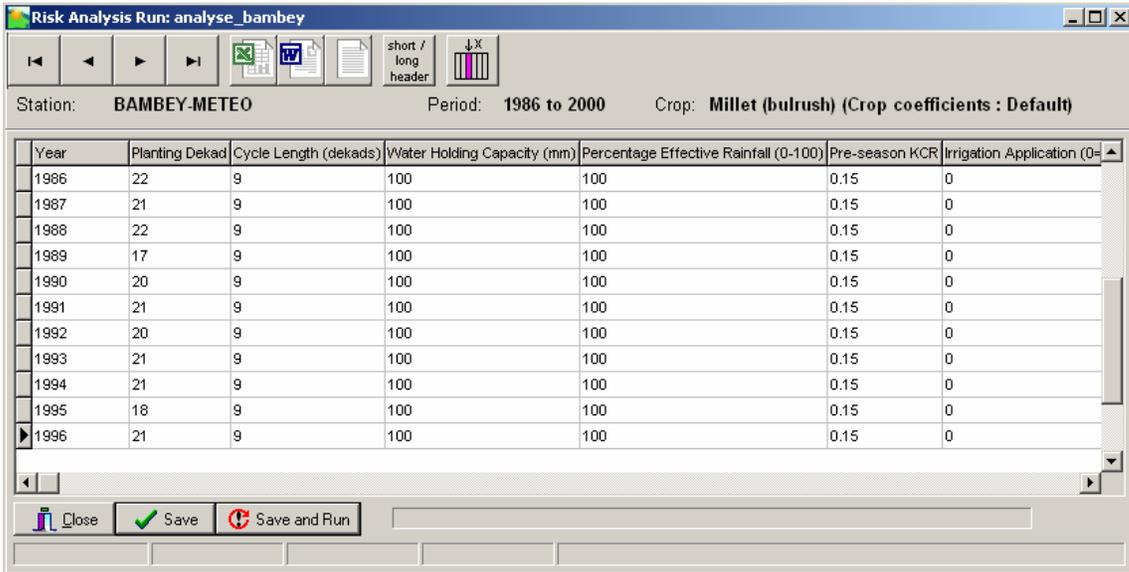
Pre-season Kcr: 0.15

Irrigation application : 0

Irrigation bund height : 0

Après le remplissage complet du tableau, il se présente comme suit :

Fig. 15: Tableau à compléter avant le calcul du bilan hydrique



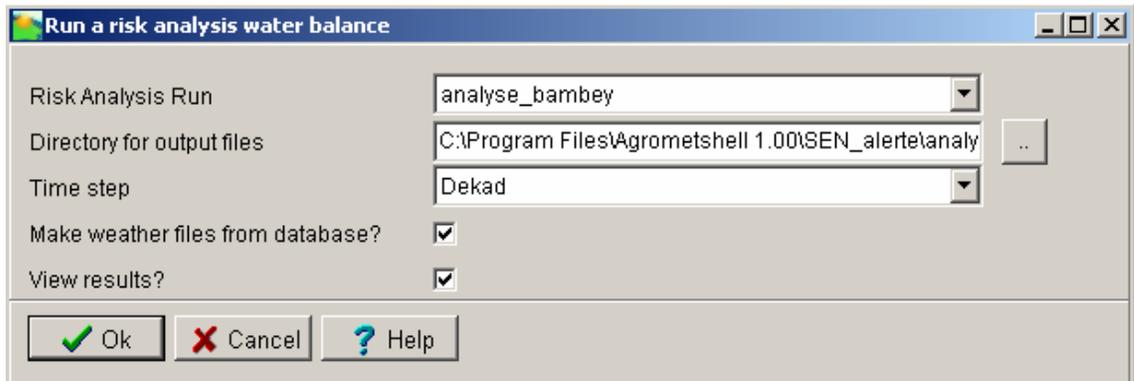
Year	Planting Dekad	Cycle Length (dekads)	Water Holding Capacity (mm)	Percentage Effective Rainfall (0-100)	Pre-season KCR	Irrigation Application (0-100)
1986	22	9	100	100	0.15	0
1987	21	9	100	100	0.15	0
1988	22	9	100	100	0.15	0
1989	17	9	100	100	0.15	0
1990	20	9	100	100	0.15	0
1991	21	9	100	100	0.15	0
1992	20	9	100	100	0.15	0
1993	21	9	100	100	0.15	0
1994	21	9	100	100	0.15	0
1995	18	9	100	100	0.15	0
1996	21	9	100	100	0.15	0

Et on clique sur *Save and Run* pour à la fois tourner le bilan et sauvegarder les fichiers qui en résulteront.

6.2.3. Enregistrement et visualisation des résultats

Dans la fenêtre qui suit l'opération précédente, on doit mentionner le nom de l'analyse dans la première ligne, le répertoire où les fichiers résultats seront enregistrés, et enfin le pas de temps dans lequel on travaille (Fig. 16). Si l'on veut que les résultats soient enregistrables aussi dans la base de AMS, il faut cocher la case en dessous de la troisième ligne. De même si on veut voir les résultats immédiatement après le calcul, il faut cocher la case *View results ?* :

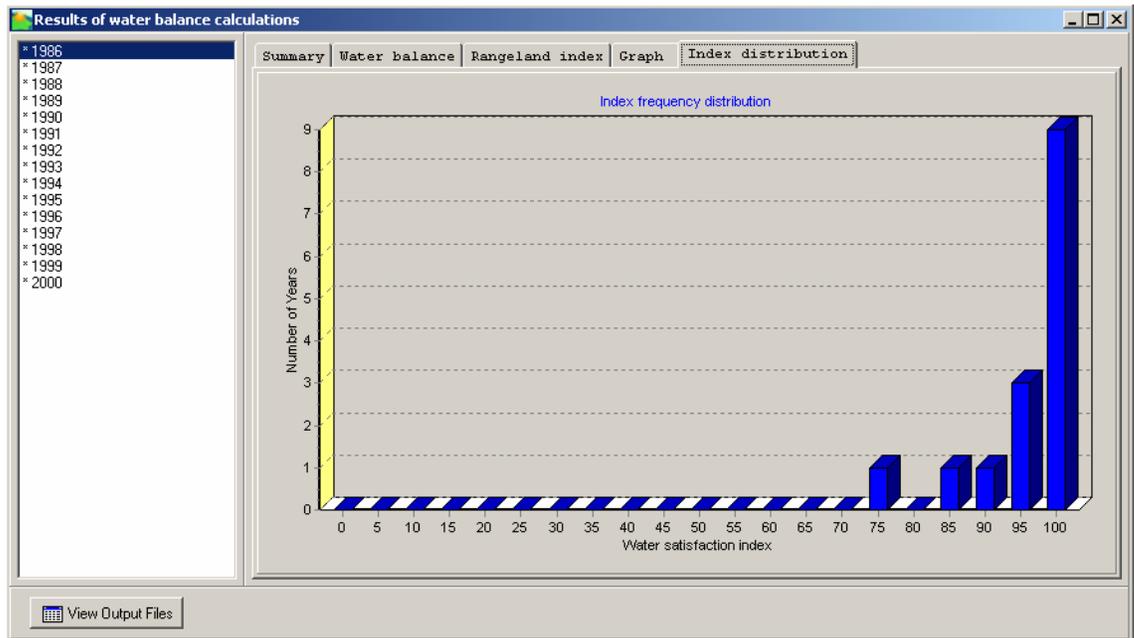
Fig. 16: Fenêtre donnant la possibilité d'enregistrer le bilan



Une fois cliqué sur OK, une fenêtre contenant six onglets se présente avec les résultats. Chacun d'eux donne une information particulière :

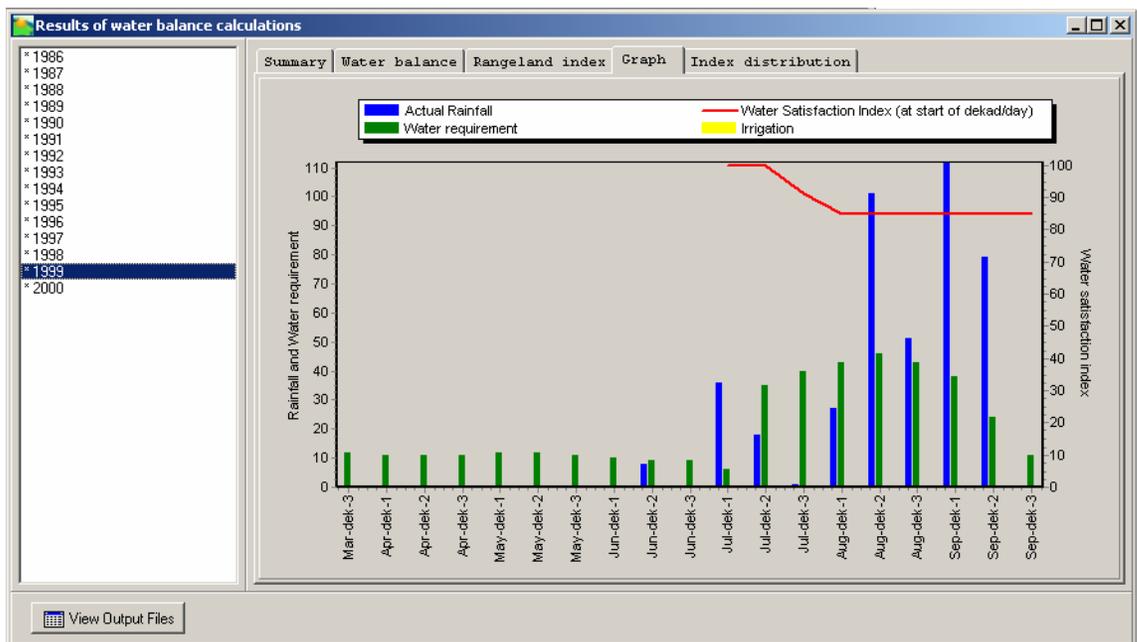
L'*Index distribution* donne la fréquence de distribution des indices de satisfactions en eau pour les 15 années. La figure 17 montre que pendant 9 années sur le mil a atteint un indice de satisfaction en eau de 100% à Bambey. Pendant 3 autres années cet indice était de 95%. Pour les 3 années qui restent il est de 75, 85, 90. Les années ne sont pas cependant précisées.

Fig. 17: Résultats du calcul du bilan montrant la distribution des indices de satisfaction en eau



Les autres onglets présentent les informations par année. En cliquant sur l'année 1999 puis sur *graph*, on visualisera la figure qui synthétise le bilan hydrique tout au long de la saison de cette année (fig. 18).

Fig. 18: Graphique de synthèse du bilan de 1999 à Bambej

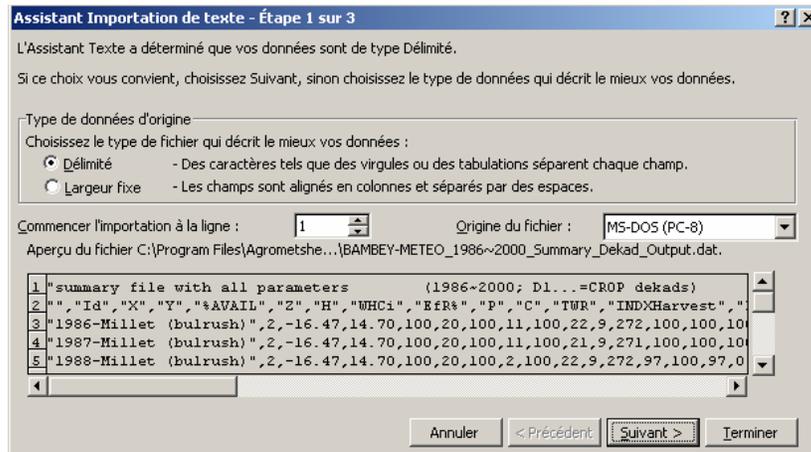


L'onglet *Summary* reprend les données d'entrées utilisées pour la simulation.

Le calcul du bilan étant terminé, on peut visualiser les résultats dans Ms Excel. On lance Ms Excel, on va dans le répertoire contenant les fichiers résultats, puis on ouvre le fichier récapitulatif du bilan hydrique : BAMBEY-METEO_1986~2000_Summary_Dekad_output.

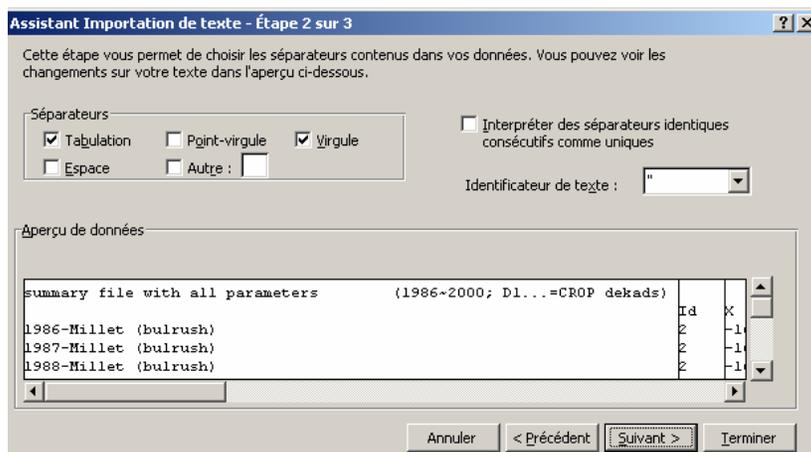
C'est un processus en trois étapes(fig.19 à 21) : en étape 1, on sélectionne *Délimité* et on fait *suivant* :

Fig. 19:Étape I de l'ouverture d'un fichier AMS dans Ms Excel



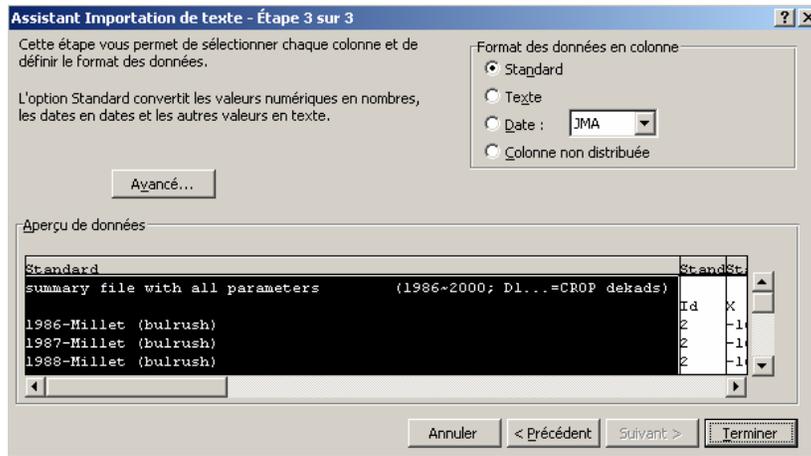
En étape 2, on choisit *Tabulation* et *Virgule*, puis clique sur *suivant*

Fig. 20: Etape2 de l'ouverture d'un fichier AMS dans Ms Excel



En étape 3, on pointe le curseur sur standard puis sur terminer :

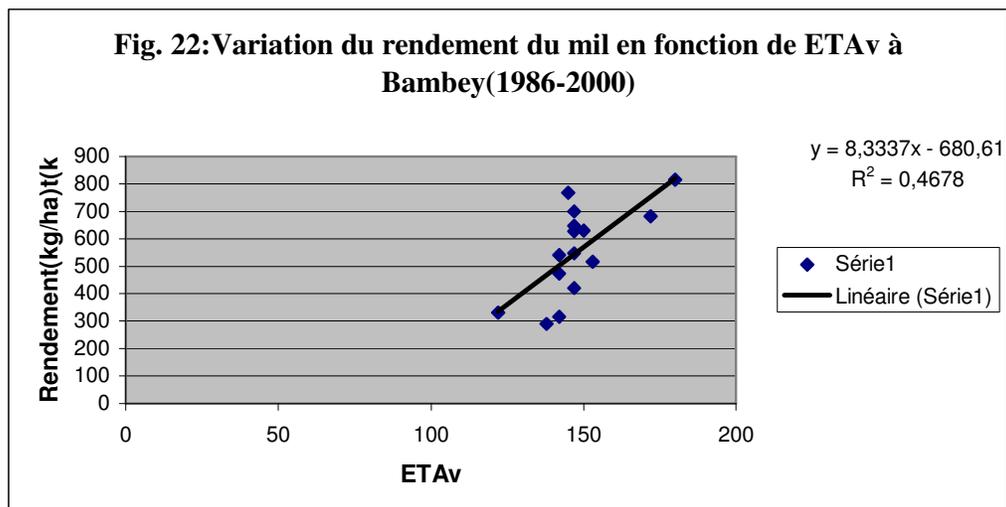
Fig. 21:Étape 3 de l'ouverture d'un fichier AMS dans Ms Excel



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 15 années.

6.2.4. Prédiction du rendement à Bambej

Pour cette prédiction, on prend en compte uniquement l'influence du climat sur le rendement. Les 15 rendements annuels du mil sont utilisés. Le paramètre de sortie ayant la meilleure corrélation avec le rendement est l'évapotranspiration réelle au stade de végétation.

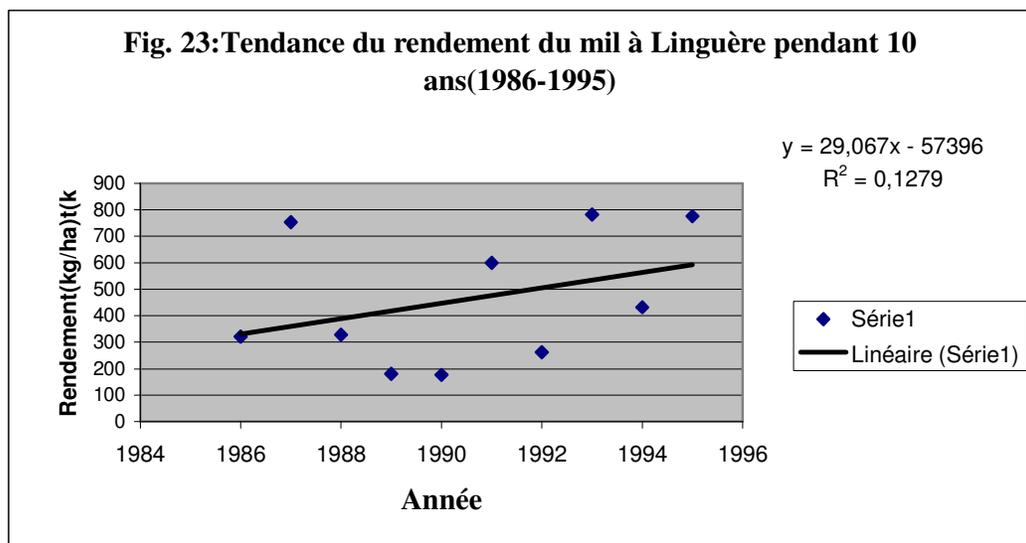


L'avantage de cette expression est qu'on n'a pas besoin d'attendre la fin du cycle pour estimer le rendement à Bambey tout en supposant que pour le reste de la saison les conditions climatiques resteront proches de la moyenne de la zone.

6.2.5. Prévision du rendement dans la province de Linguère : Prise en compte de l'effet tendance

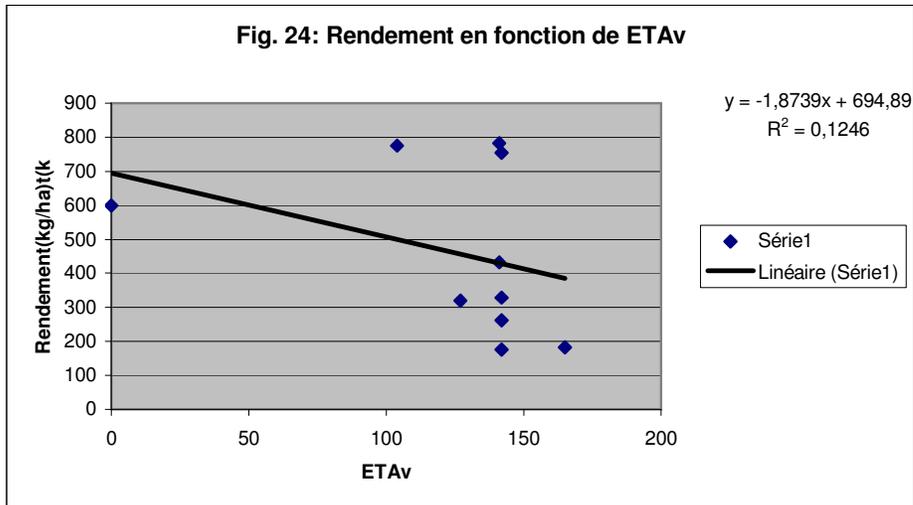
a) détermination de la tendance

A Linguère, province du département de Diourbel, on a observé une tendance à la hausse du rendement du mil (fig. 19). Mise à part le climat, plusieurs facteurs peuvent être à la base notamment la technologie, l'amélioration des techniques culturales, etc. Pour simuler le rendement au niveau de cette station on va prendre en compte cette tendance.

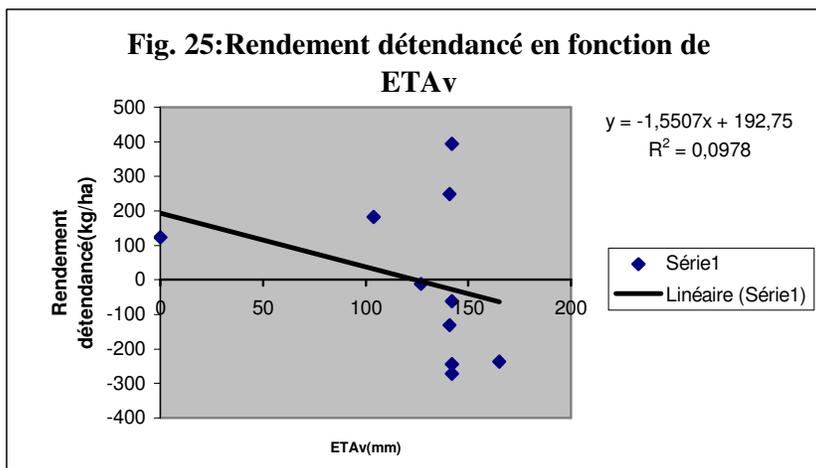


b) Expression du rendement en fonction d'un paramètre de sortie (fig. 24)

Le facteur climatique qui est retenu est l'évapotranspiration actuelle au stade végétatif car comparé autres facteurs, il présente un R^2 plus significatif.



c) Expression du rendement détehdancé en fonction de ETAv(fig. 25)

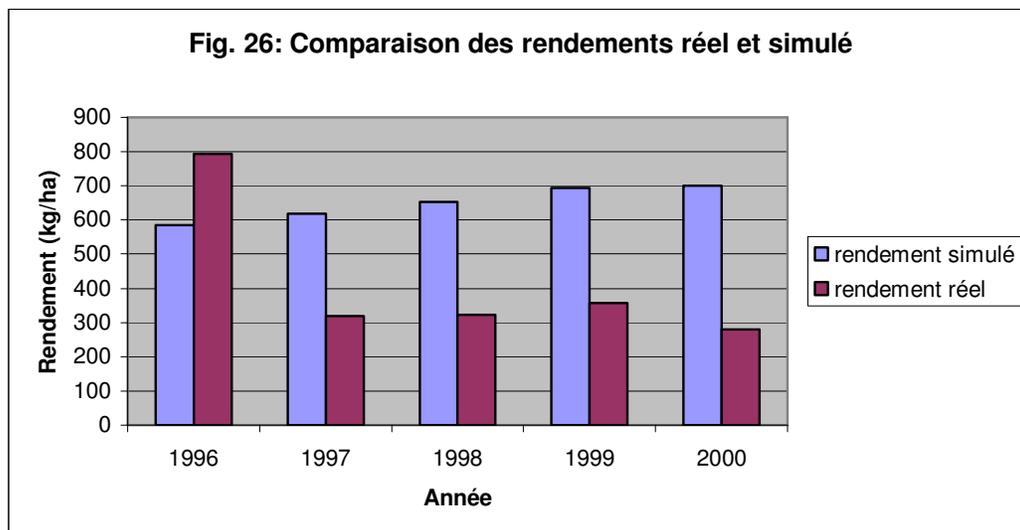


d) comparaison entre les rendements réel et simulé

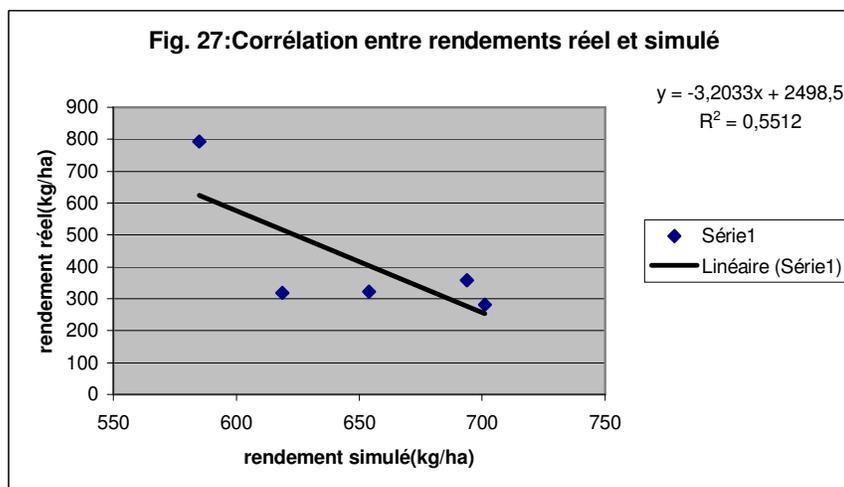
Le rendement simulé se calcule par la formule suivante :

$$\text{Rendement} = 29,067 \cdot \text{année} - 57396 + (-1,5507 \cdot \text{ETAv} + 192,75)$$

En le comparant avec le rendement réel pour le 5 dernières années (de 1996 à 2000), on a constaté une sous-estimation du rendement simulé pour l'année 1996 et une surestimation pour les 4 années qui suivent (fig. 26). Il est donc souhaitable définir le rendement réel en fonction du rendement simulé.



e) Corrélation entre les deux rendements(fig. 23)

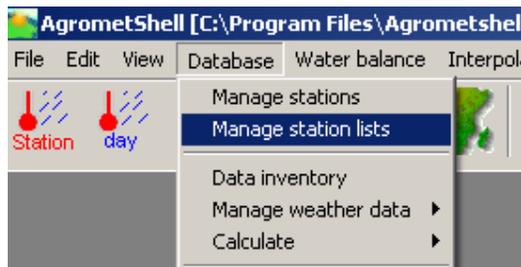


6.3. Suivi de la culture du mil au niveau national

6.3.1. Sélection des stations

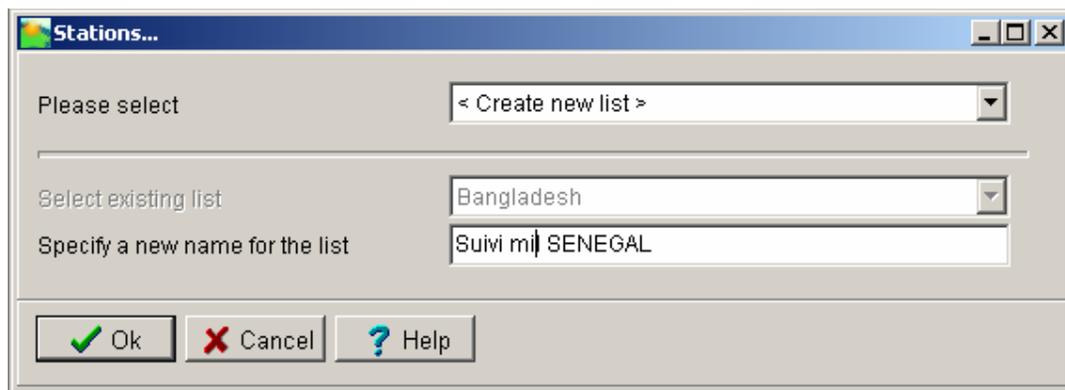
Ces stations font partie de la liste générale des stations dans AMS. La procédure de leur sélection(fig.28) est la suivante : on va dans le menu *data base/manage station list*

Fig. 22:Début du processus de sélection des station



Une nouvelle fenêtre s'affiche :

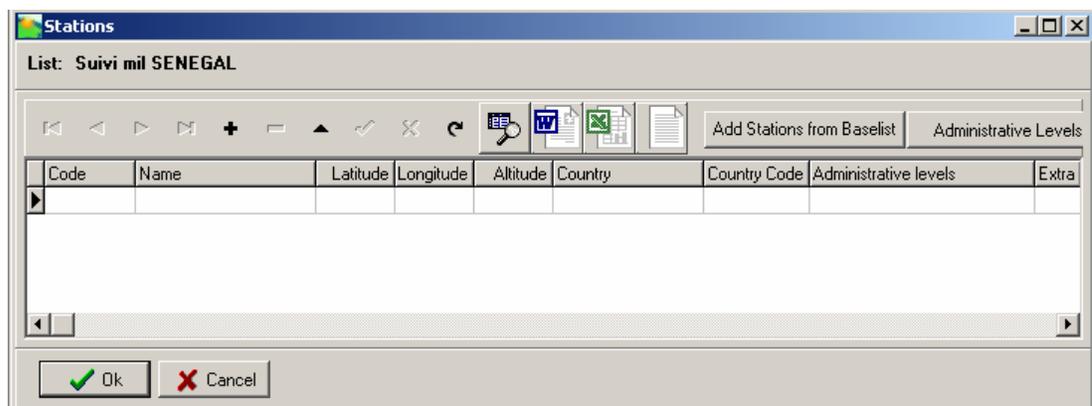
Fig. 23:Dénomination du groupe de stations à sélectionner



On sélectionne *create new list* dans la première ligne et dans la dernière ligne un nom est donné à ce groupe de stations qui sera sélectionné(fig. 29). Dans le cas de ce travail on a donné le nom de : Suivi mil SENEGAL. Pour valider, on clique sur OK.

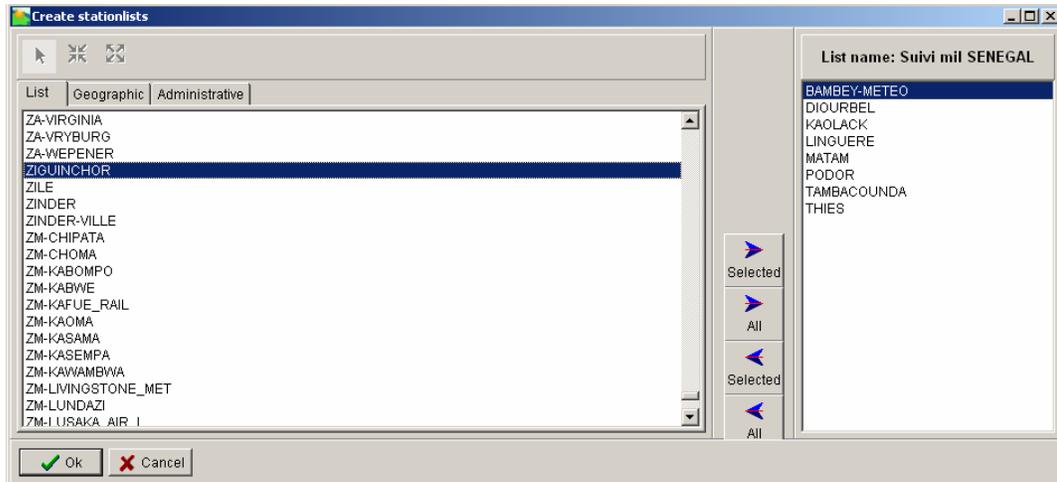
Une fenêtre (fig. 30)montrant la nouvelle liste vide de stations est apparue :

Fig. 24:Nouvelle liste de stations



Pour sélectionner les stations concernées on clique *Add Stations Baselist*. Quand la nouvelle fenêtre apparaît, on sélectionne à partir de la liste générale à droite chaque station qui en fera parti, puis on clique sur *select* pour transférer la station choisie dans la liste a droite(fig.31). On fait OK pour valider le choix des stations.

Fig. 25:Ajout de stations dans la nouvelle liste



La nouvelle liste *Suivi mil SENEGAL* qui s'affiche est maintenant complète(fig.32) :

Fig. 26:Tableau présentant la liste complète des stations sélectionnées

Code	Name	Latitude	Longitude	Altitude	Country	Country Code
SN46BMB1	BAMBÉY-METEO	14.70	-16.47		SENEGAL	SN
SN46DRBL	DIOURBEL	14.65	-16.23		SENEGAL	SN
SN46KLCK	KAOLACK	14.13	-16.07		SENEGAL	SN
SN55LNGR	LINGUERE	15.38	-15.12		SENEGAL	SN
SN53MTMO	MATAM	15.65	-13.25		SENEGAL	SN
SN64PDOR	PODOR	16.65	-14.97		SENEGAL	SN
SN33TMBC	TAMBACOUNDA	13.77	-13.68		SENEGAL	SN
SN46THSO	THIES	14.80	-16.95		SENEGAL	SN
SN26ZGNC	ZIGUINCHOR	12.55	-16.27		SENEGAL	SN

Les calculs de bilan hydrique au niveau des stations de cette liste sont donc possibles.

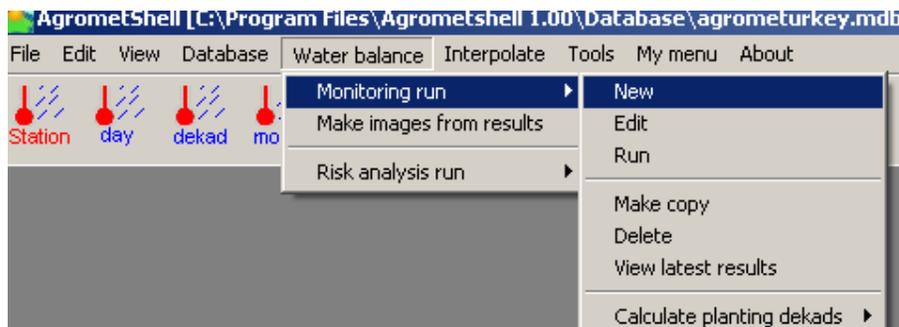
6.3.2. Calcul du bilan pour l'ensemble des stations pendant une année

Dans ce cas, on ne peut travailler qu'avec une seule année. On propose de faire le suivi pour l'année 2000.

a) Préparation du bilan

Pour commencer, on va dans le menu *water balance/Monotoring run/new* (fig. 33)

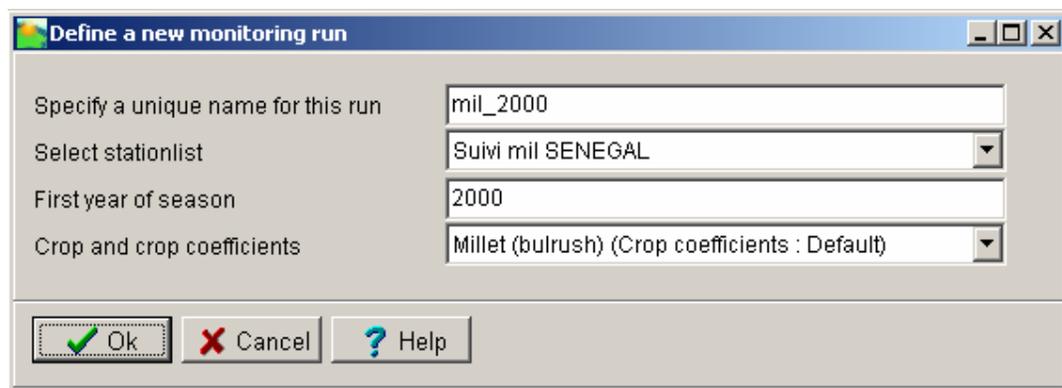
Fig. 27: Début de calcul du bilan pour un ensemble de stations



La fenêtre qui s'affiche (fig34) se remplit comme suit :

- dans la première ligne, on donne un nom de la simulation (mil_2000)
- dans la deuxième, on choisit la liste de station qui sera utilisée (Suivi mil Sénégal)
- en ligne trois, l'année (2000)
- en ligne quatre, la culture (millet bulrush) ; puis on valide en faisant OK.

Fig. 28: Choix des paramètres de base pour le calcul du bilan



b) Intégration des données et enregistrement du bilan

La fenêtre qui apparaît (fig.35) après la validation de l'étape précédente donne la possibilité d'intégrer les données suivantes : la date de plantation, la durée du cycle, capacité de stockage en eau du sol, la pluie effective, le coefficient de pré-saison, l'application ou non de l'irrigation et la quantité d'eau d'irrigation utilisée. La date de plantation va dépendre de la

station et les autres paramètres auront les mêmes valeurs que celles utilisées plus haut à savoir :

Cycle length (dekads) : 9

Water holding capacity of the soil (mm): 100

Percentage effective rainfall : 100

Pre-season Kcr: 0.15

Irrigation application : 0

Irrigation bund height : 0

Fig. 29: Tableau servant à compléter les informations nécessaires pour le calcul du bilan

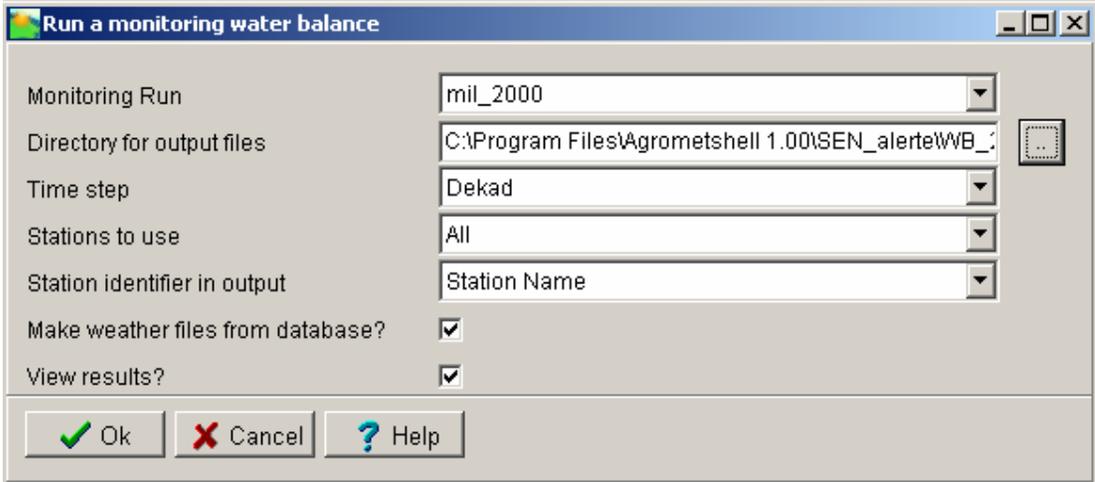
Station Name	Planting Dekad	Cycle Length (dekads)	Water Holding Capacity (mm)	Percentage Effective Re
BAMBEY-METEO	19	9	100	100
DIOURBEL	19	9	100	100
KAOLACK	19	9	100	100
LINGUERE	19	9	100	100
MATAM	18	9	100	100
PODOR	21	9	100	100
TAMBACOUNDA	18	9	100	100
THIES	19	9	100	100
ZIGUINCHOR	18	9	100	100

En cliquant sur le bouton *Save and Run* situé au bas de cette fenêtre, on lance l'enregistrement de la simulation. Quand la fenêtre suivante s'affiche, on la remplit comme suit :

- dans la première ligne, nom de la simulation(fig.36)
- dans la deuxième, le répertoire d'enregistrement des fichiers
- dans la troisième, le pas de temps en décade. On pourrait choisir journalier de préférence si on disposait des données journalières pour toutes les stations.
- dans la quatrième, le nombre de stations dans la liste
- la cinquième, identification des stations à la sortie des résultats. On a le choix entre leur nom ou leur code.

Il faut cocher la dernière case si on veut voir les résultats après la validation de cette étape.

Fig. 30: Enregistrement du bilan et choix du pas de temps de la simulation



Run a monitoring water balance

Monitoring Run: mil_2000

Directory for output files: C:\Program Files\Agrometshell 1.00\SEN_alerte\WB_

Time step: Dekad

Stations to use: All

Station identifier in output: Station Name

Make weather files from database?

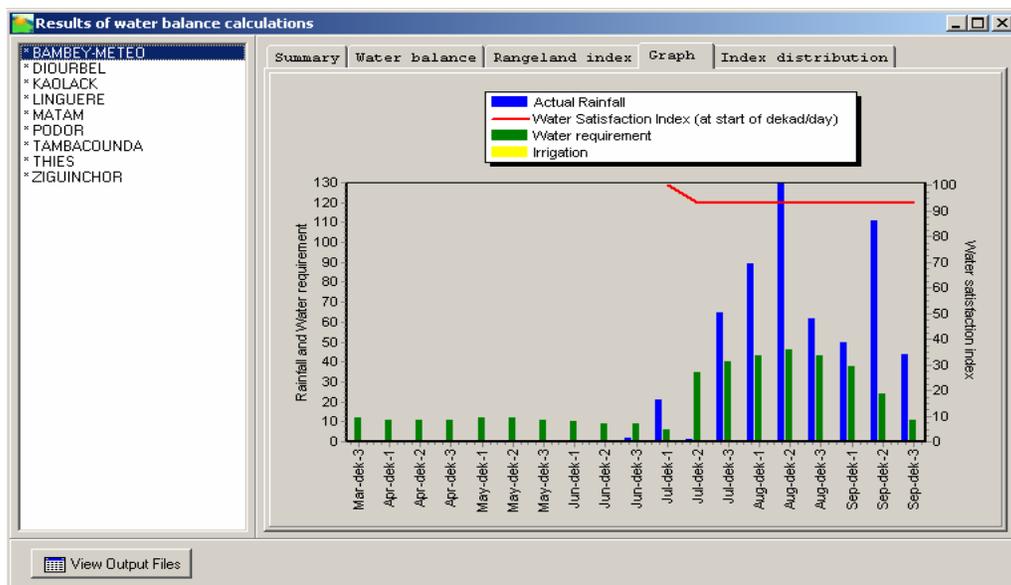
View results?

Ok Cancel Help

6.3.3. Exploitation des résultats du bilan

Les résultats sont donnés par station (fig.37). On peut faire une première idée sur l'évolution de la culture du mil au niveau de chaque région du pays. On va admettre que l'indice de satisfaction en eau à une influence sur le rendement au niveau du Sénégal. Pour cela on va essayer de voir la répartition de cet indice au niveau national et d'exprimer le rendement en fonction des indices obtenus.

Fig. 31: Graphique de synthèse du bilan de la station de Bambe



6.3.4. Interpolation des indices de satisfaction en eau

Les données obtenues jusque là sont ponctuelles. L'objectif de l'interpolation est de spatialiser ces résultats.

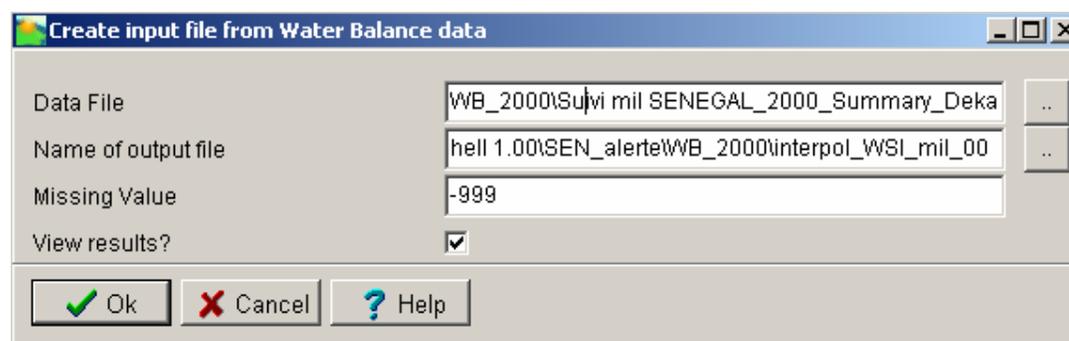
On clique sur *Interpolate/Make input file /Water balance file*(fig.38)

Fig. 32:Début du processus d'interpolation des résultats



La fenêtre qui apparaît permet de choisir le fichier contenant les données pour l'interpolation et un nom au fichier à la sortie(fig.39). Dans ce cas on a choisi le fichier récapitulatif qui contient la synthèse des paramètres de sortie : *Suivi mil SENEGAL_2000_Summary_Dekad_Output.dat*. Dans la deuxième ligne, on doit donner un nom au fichier ayant le paramètre qui sera extrait pour l'interpolation.

Fig. 33:Création du fichier de données pour l'interpolation



Ce dernier fichier comme les autres se présente sous forme de tableur quand on les ouvre dans Ms Excel. La fenêtre ci-après permet de choisir la colonne appropriée. Celle-ci se rapportant à l'indice de satisfaction à la récolte(fig. 40) est sélectionnée dans ce cas(INDXHarvest).

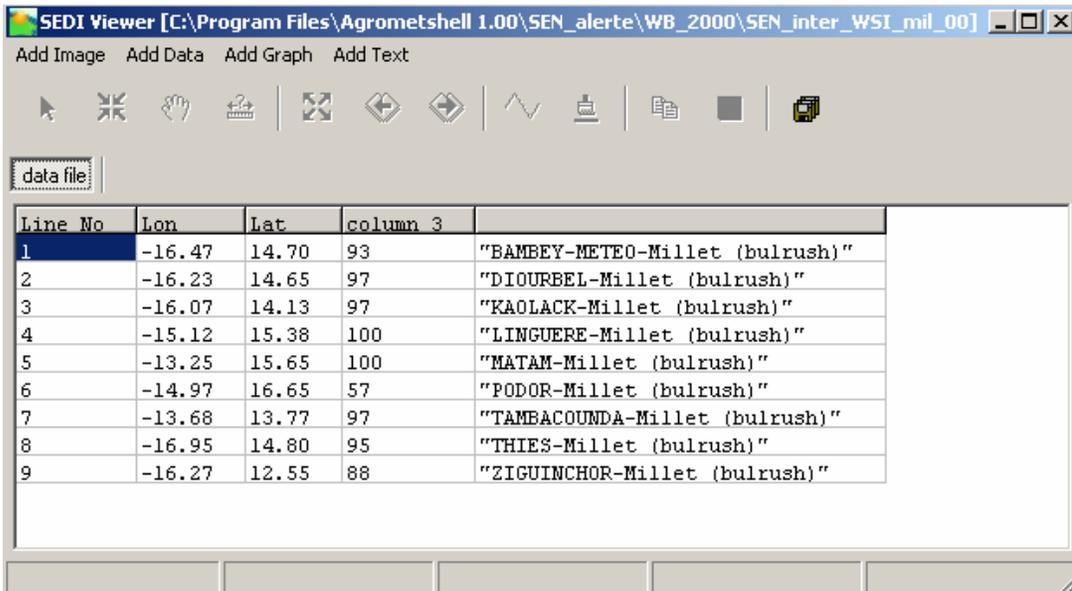
Fig. 34:Choix du paramètre à interpoler



Une nouvelle fenêtre est apparue pour montrer l'indice de chaque station en colonne 3(fig.41).

A l'entête figure la localisation du fichier.

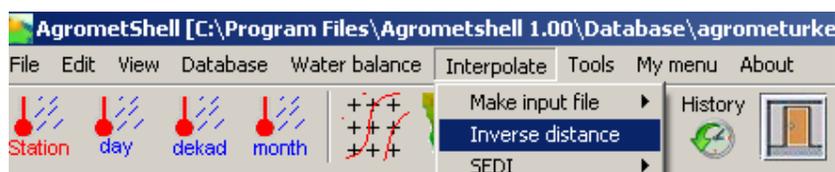
Fig. 35:Affichage des valeurs du paramètre à interpoler pour chaque station



Line No	Lon	Lat	column 3	
1	-16.47	14.70	93	"BAMBEY-METEO-Millet (bulrush)"
2	-16.23	14.65	97	"DIOURBEL-Millet (bulrush)"
3	-16.07	14.13	97	"KAOLACK-Millet (bulrush)"
4	-15.12	15.38	100	"LINGUERE-Millet (bulrush)"
5	-13.25	15.65	100	"MATAM-Millet (bulrush)"
6	-14.97	16.65	57	"PODOR-Millet (bulrush)"
7	-13.68	13.77	97	"TAMBACOUNDA-Millet (bulrush)"
8	-16.95	14.80	95	"THIES-Millet (bulrush)"
9	-16.27	12.55	88	"ZIGUINCHOR-Millet (bulrush)"

Ces démarches préalables constituent une sorte de préparation à l'interpolation. Pour procéder à l'interpolation proprement dite(fig.42), on ferme d'abord cette fenêtre et on va dans *Interpolate/ Inverse distance*

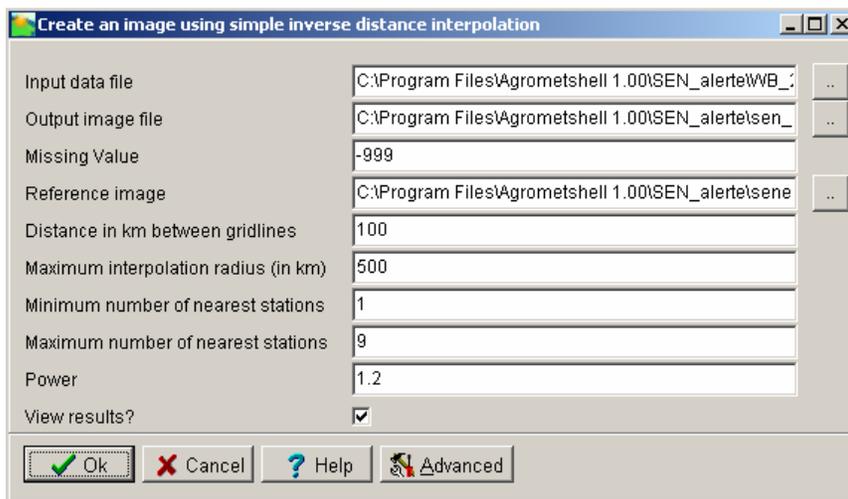
Fig. 36:Interpolation proprement dite



Dans la fenêtre qui apparaît, on fait les opérations suivantes :

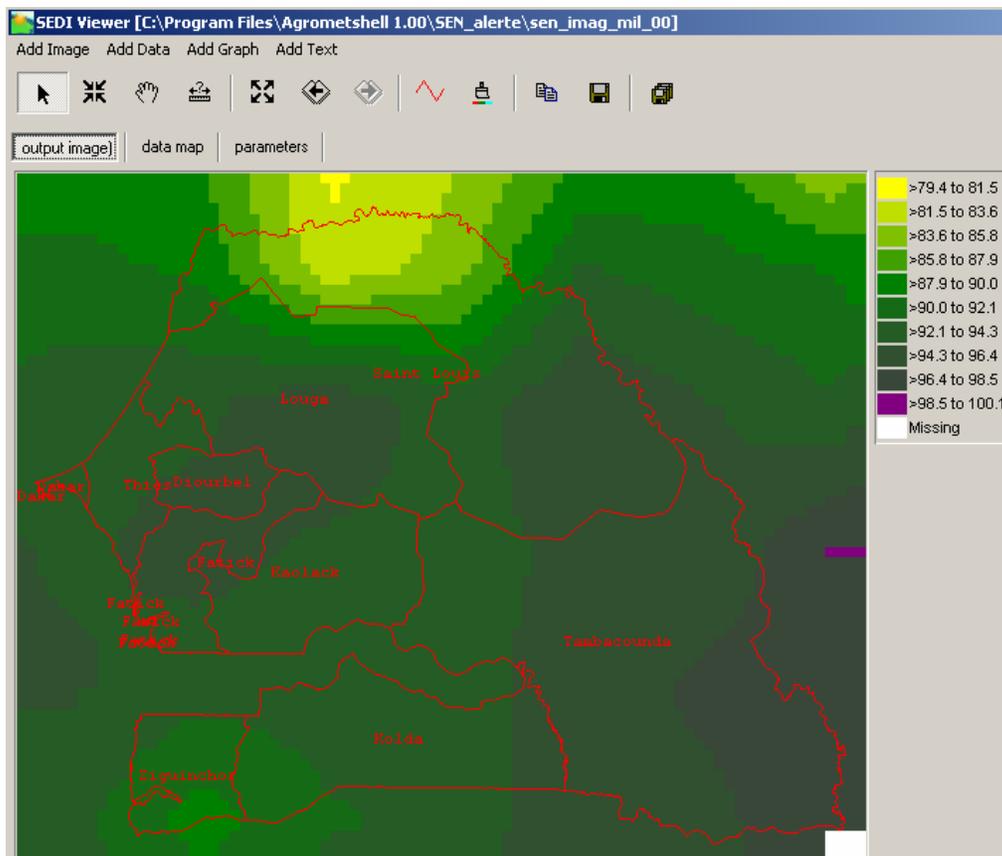
- en première ligne, le fichier qu'on vient d'enregistrer sert de fichier d'entrée(fig.43) ;
- en ligne 2, on enregistre sous un nom donné l'image qui résultera du processus d'interpolation ;
- en ligne 4, on indique l'image de base ; il est question du tracé des limites du Sénégal dans ce cas.

Fig. 37: Enregistrement du fichier résultant de l'interpolation



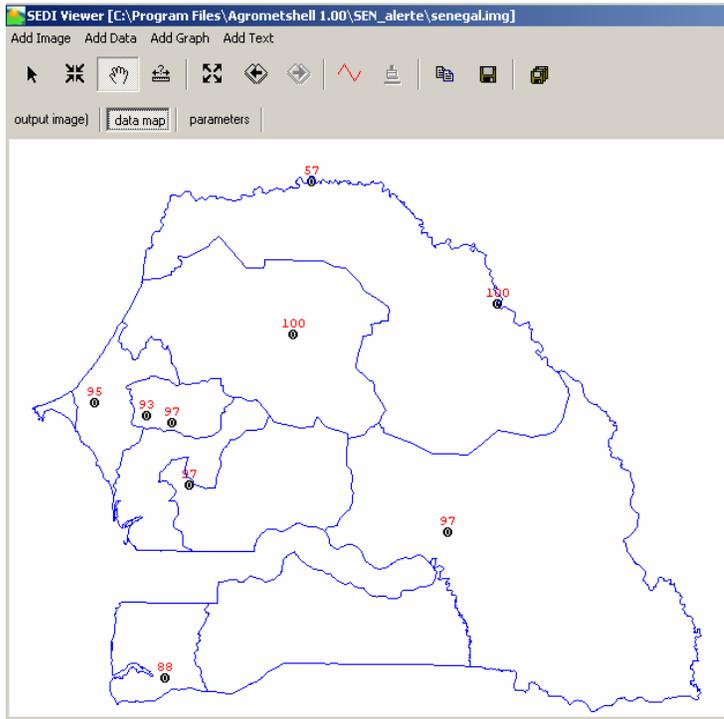
- La figure affichée après validation de cette dernière étape est la répartition de l'indice de satisfaction en eau du au niveau du Sénégal pour l'année 2000 (fig.44). La prévision de rendement peut être effectuée pour tous les endroits dont le rendement varie en fonction l'indice de satisfaction en eau. Une autre manière est d'extraire à partir de l'image ci-dessous un indice par région dans Windisp.

Fig. 38: Interpolation spatiale de l'indice de satisfaction du mil au Sénégal pour l'année 2000



A partir de cette même fenêtre, on peut visualiser la répartition des données ponctuelles utilisées dans l'interpolation en cliquant sur *data map*(fig. 45).

Fig. 39: Distribution des valeurs ponctuelles utilisées dans l'interpolation spatiale



6.4. Discussion

Les démonstrations ont montré l'importance que peut avoir ce modèle dans un système d'alerte précoce. On a vu que les conditions climatiques agissent sur le rendement. Comme on évolue en conditions aride et semi-aride, on pourrait s'attendre à des valeurs plus élevées de R^2 car dans ces régions où la principale contrainte de l'agriculture est l'eau. Cependant, il semblerait que le rendement a été aussi influencé par d'autres facteurs autres que l'eau. Parmi ces facteurs, on peut citer les mauvaises herbes, la fertilité des sols et les pestes. Leur influence est reconnue mais, ils sont par contre difficilement modélisables. Les mauvaises herbes, quand elles sont présentes, peuvent rentrer en compétition avec le mil pour l'eau et les éléments nutritifs, deux facteurs déjà limitants. Les agents pathogènes en s'attaquant aux cultures, réduisent la vigueur de la culture ; ce qui peut réduire la possibilité d'avoir un rendement optimum même si l'eau est suffisante lors de la saison. Le modèle ne prend donc pas en compte l'ensemble des facteurs qui peuvent intervenir dans l'élaboration du rendement.

Une autre interprétation réside dans le choix des paramètres d'entrées. Pendant les simulations, la valeur de certains paramètres était fixée au départ à savoir : une durée du cycle de 9 décades, une teneur en eau du sol de 100mm et un pourcentage de pluie efficace de 100% pour tous les sites. Les conditions locales de drainage et de fertilité des sols peuvent influencer le rendement et être à la base ces écarts. Ceci paraît cependant sensé, car il arrive lors des simulations, de trouver des régions avec un faible rendement accusant une bonne évapotranspiration au stade de végétation ou un indice de satisfaction en eau de 100% en fin de cycle. Dans les simulations, le modèle considère que toute la précipitation est valorisée par la culture alors que dans la réalité seulement une partie de celle-ci peut être effectivement mobilisée ; le reste étant parti par ruissellement, infiltration et évaporation.

La spatialisation ne reproduit pas fidèlement les valeurs ponctuelles des indices de satisfaction. A Podor par exemple, une station du nord du Sénégal, la valeur de cet indice est de 57%, la plus faible des neuf indices. Les résultats de l'interpolation ont montré que c'est dans cette zone que la satisfaction en eau du mil est la plus faible mais surestime la valeur réelle.

Dans les deux cas précédant, à Bambey et à Linguere, le rendement a été influencé par l'évapotranspiration réelle à la phase de végétation. Mais cependant, au cours des manipulations, on a pu remarquer que le paramètre de sortie qui corrèle le mieux avec le rendement varie d'une région à l'autre : à Matam, c'est le déficit hydrique au remplissage ; à

Podor, c'est le déficit à la floraison ; à Ziguinchor, c'est l'excédent à la floraison et à Kaolack, il s'agit de l'indice à la récolte.

VII. CONCLUSION

Ce travail a permis de faire une grande exploration de AMS. A part les objectifs de suivi des cultures pour lesquels il a été conçu, AMS est potentiellement utilisable dans plusieurs domaines. C'est un modèle polyvalent et robuste qui est susceptible d'être utilisé dans des conditions environnementales variées.

Il donne la possibilité de suivre une campagne agricole sur l'ensemble de territoire. A partir de ses fonctions d'interpolation, les zones vulnérables ou les zones à déficit hydrique où la saison n'est pas garantie peuvent être détectées. Il se révèle donc un outil dont l'utilisation peut contribuer à réduire la vulnérabilité liée à la production agricole quand la saison s'annonce mauvaise sur le plan pluviométrique car il peut être utilisé dans la prévision et pour la prise de décision en la matière.

AMS fournit des informations détaillées sur les conditions hydriques de la plante de sa plantation à la récolte mais, ignore cependant les autres contraintes du milieu qui peuvent empêcher une bonne performance de la machine végétale.

Tout compte fait, AMS est loin d'être un outil complet pour constituer à lui seul un outil de prédilection pour le suivi des cultures et la prévision des rendements. Il doit faire partie d'un paquet incluant plusieurs composantes. Il intègre cependant un grand nombre de fonctionnalités à travers lesquelles il obéit aux cinq critères de bases d'un Système d'Information Global et d'Alerte Précoce selon Minamiguchi(2005) à savoir :

- informations provenant de sources variées
- système flexible
- uniformité dans les types d'informations et base de données structurées identiquement partout
- outil d'analyse et de gestion d'information pouvant améliorer l'efficacité
- système d'échange rapide au niveau international par les moyens électroniques et traditionnels.

Enfin, les pays dans lesquels AMS sera utilisé se verront dans la nécessité d'œuvrer dans le domaine de la collecte de données climatiques et des statistiques agricoles, deux aspects très importants qui constituent parfois un handicap au travail du gestionnaire de risques naturels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERNADI M. (2003): Other FAO software related to AgroMetShell. Rome
- DIALLO A.A. (2003): Sécheresse, Systèmes d'alerte précoce et de Gestion des crises alimentaires dans la stratégie de alimentaires dans la stratégie de l'ISDR-Cas du SAHEL
- FAO (2002) : Training in crop monitoring and forecasting. Rome
- Fond des Nations Unies pour la Population-FNUAP (2004) : Etat de la population mondiale. Le consensus de Caire, dix ans après : la population, la santé en matière de reproduction et l'effort mondial pour éliminer la pauvreté. Résumé de presse.
- GOMMES R. (1999) : Système d'alerte précoce. Notes de cours. DES Interuniversitaire en gestion des Risques Naturels. ULG/Liège
- GOMMES R. (2005) : Special: Agroclimatic concepts- Risk definitions.
<http://www.fao.org/sd/EIdirect/agroclim/concepts.htm>, consulté le 3 juin 2005
- HOEFSLOOT P., LEKHAL R. et ZAHEER F.(2004):Database management for the analysis of crop conditions in Afghanistan; Kabul
- MENARD S.(2002) :Impact des variations climatiques sur la production agricole. Travail de fin d'études. Fondation Universitaire de Luxembourg. Arlon
- MINAMIGUCHI N. (2005): The application of Geospatial and Disaster Information for Food Insecurity and Agricultural Drought Monitoring and assessment by the FAO GIEWS and Asia FIVIMS. Bangkok
- Ministère de la Coopération française, (1991): Memento de l'agronome. Collection « Techniques rurales en Afrique »4e ed.
- MUKHALA E. et HOEFSLOOT P. (2004): AgroMetShell Manual. Harare.
- TYCHON B. (2004) : Analyse des Systèmes et Modélisation. Notes de cours. DES InterUniversitaire en gestion des Risques Naturels. ULG/ site d'arlon

ANNEXE

Annexe 1 : Les données de rendement du mil pour les régions étudiées (en kg/ha)

Régions	Années														
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
BAMBEY	473	627	540	816	516	700	630	647	546	682	420	289	315	331	768
DIORBEL	338	751	193	701	414	740	596	748	480	751	250	140	383	349	872
KAOLACK	739	850	765	811	763	898	746	771	808	752	808	801	706	720	911
LINGUERE	320	754	328	182	176	600	262	783	433	776	793	319	322	358	281
MATAM	421	565	551	232	184	220	177	500	493	157	63	242	337	450	367
PODOR	343	357	455	369	36	110	17	150	182	66	166	126	330	295	330
TAMBACOUNDA	792	604	912	985	762	700	839	720	760	715	732	713	761	769	1133
THIES	490	692	117	779	505	620	566	500	317	638	442	237	331	650	466
ZIGUINCHOR	650	793	917	945	938	1200	550	181	577	380	467	432	-999	400	610

Annexe 2 : Résultats récapitulatifs du calcul bilan hydrique de la culture du mil à Bambej de 1986 à 2000

	Id	X	Y	%AVAIL	Z	H	WHCi	EfR%	P	C	TWR	INDXHarvest	INDXNormal	INDXLatest	WEXi	WEXv	WEXf	WEXr	WEXt
1986-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	11	100	22	9	272	100	100	100	0	83	23	0	106
1987-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	11	100	21	9	271	100	100	100	0	0	0	0	0
1988-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	2	100	22	9	272	97	100	97	0	228	0	0	228
1989-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	17	9	310	94	88	94	0	0	0	351	351
1990-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	20	9	276	100	100	100	0	0	0	1	1
1991-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	21	9	271	100	100	100	0	36	0	0	36
1992-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	20	9	276	99	100	99	0	0	18	0	18
1993-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	10	100	21	9	271	77	100	77	7	128	0	0	135
1994-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	21	9	271	100	100	100	43	98	0	0	141
1995-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	18	9	297	100	100	100	0	0	0	103	103
1996-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	9	100	21	9	271	100	100	100	2	0	0	0	2
1997-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	10	100	19	9	285	91	100	91	0	0	0	0	0
1998-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	22	9	272	98	100	98	0	54	0	0	54
1999-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	19	9	285	85	100	85	0	0	0	92	92
2000-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	19	9	285	93	100	93	0	55	19	132	206

	WDEFi	WDEFv	WDEFf	WDEFr	WDEFt	ETAi	ETAv	ETAf	ETAr	ETAt	Cr1a	Cr2a	Cr3a	Cr4a	Cr1n	Cr2n	Cr3n	Cr4n	
1986-Millet (bulrush)																			
1987-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	142	44	80	271	23	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1988-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	147	43	77	272	22	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1989-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	142	44	80	271	22	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1990-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	6	180	49	75	310	18	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1991-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	6	153	43	75	277	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1992-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	147	43	77	272	22	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1993-Millet (bulrush)	0	-3	0	0	-3	6	150	43	75	274	22	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1994-Millet (bulrush)	0	0	0	-62	-62	5	147	43	15	210	20	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1995-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	147	43	77	272	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1996-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	6	172	46	73	297	20	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1997-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	147	43	77	272	20	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1998-Millet (bulrush)	0	-26	0	0	-26	6	138	43	73	260	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
1999-Millet (bulrush)	0	0	0	-6	-6	5	142	44	74	265	22	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
2000-Millet (bulrush)	0	-42	0	0	-42	6	122	43	73	244	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	
	0	-19	0	0	-19	6	145	43	73	267	20	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999	

Annexe 3 : Résultats récapitulatifs du calcul bilan hydrique de la culture du mil à Linguère de 1986 à 2000

	Id	X	Y	%AVAIL	Z	H	WHCI	EfR%	P	C	TWR	INDXHarvest	INDXNormal	INDXLatest	WEXi	WEXv	WEXf	WEXr	WEXt
1986-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	19	9	270	92	100	92	0	0	0	0	0
1987-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	20	9	267	100	100	100	0	61	14	57	132
1988-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	3	100	22	9	267	100	94	100	0	144	0	0	144
1989-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	17	9	286	100	87	100	5	9	0	173	187
1990-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	20	9	267	98	100	98	0	0	0	0	0
1991-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	19	9	270	28	100	28	0	0	0	10	10
1992-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	7	100	20	9	267	89	100	89	0	0	0	0	0
1993-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	7	100	21	9	267	100	100	100	0	0	0	0	0
1994-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	21	9	267	88	100	88	0	40	0	0	40
1995-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	18	9	277	76	100	76	0	0	0	6	6
1996-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	46	100	19	9	270	100	100	100	0	0	0	0	0
1997-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	23	9	265	81	77	85	0	20	0	0	20
1998-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	21	9	267	97	100	97	0	148	9	0	157
1999-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	0	100	19	9	270	95	100	95	0	0	0	4	4
2000-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	5	100	19	9	270	100	100	100	0	0	0	7	7

	WDEFi	WDEFv	WDEFf	WDEFr	WDEFt	ETAi	ETAv	ETAf	ETAr	ETAt	Cr1a	Cr2a	Cr3a	Cr4a	Cr1n	Cr2n	Cr3n	Cr4n
1986-Millet (bulrush)	0	-21	0	0	-21	5	127	42	76	#	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1987-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	142	44	77	#	19	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1988-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	4	142	46	75	#	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1989-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	165	44	72	#	16	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1990-Millet (bulrush)	0	0	-6	0	-6	5	142	38	77	#	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1991-Millet (bulrush)	-5	-148	-42	0	-195	0	0	0	76	#	24	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1992-Millet (bulrush)	0	0	-6	-24	-30	5	142	38	53	#	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1993-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	141	45	76	#	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1994-Millet (bulrush)	0	0	0	-33	-33	5	141	45	43	#	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1995-Millet (bulrush)	0	-52	-15	0	-67	5	104	27	73	#	22	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1996-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	148	42	76	#	22	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1997-Millet (bulrush)	0	0	0	-50	-50	4	145	45	22	#	23	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1998-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	141	45	76	#	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
1999-Millet (bulrush)	0	-14	0	0	-14	5	134	42	76	#	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
2000-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	148	42	76	#	20	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999

Annexe 4 : Résultats récapitulatifs du calcul bilan hydrique de la culture du mil au niveau du Sénégal en 2000

	ld	X	Y	%AVAIL	Z	H	WHCi	EfR%	P	C	TWR	INDXHarvest	INDXNormal	INDXLatest	WEXi	WEXv	WEXf	WEXr	WEXt
BAMBEY-METEO-Millet (bulrush)	2	-16.47	14.70	100	20	100	0	100	19	9	285	93	100	93	0	55	19	132	206
DIORBEL-Millet (bulrush)	2	-16.23	14.65	100	9	100	0	100	19	9	261	97	100	97	0	0	27	35	62
KAOLACK-Millet (bulrush)	2	-16.07	14.13	100	7	100	14	100	19	9	277	97	100	97	0	58	25	197	280
LINGUERE-Millet (bulrush)	2	-15.12	15.38	100	21	100	5	100	19	9	270	100	100	100	0	0	0	7	7
MATAM-Millet (bulrush)	2	-13.25	15.65	100	17	100	0	100	18	9	313	100	90	100	0	0	0	29	29
PODOR-Millet (bulrush)	2	-14.97	16.65	100	7	100	0	100	21	9	305	57	57	57	0	0	0	0	0
TAMBACOUNDA-Millet (bulrush)	2	-13.68	13.77	100	50	100	0	100	18	9	261	97	100	97	0	130	97	30	257
THIES-Millet (bulrush)	2	-16.95	14.80	100	76	100	0	100	19	9	258	95	100	95	0	53	16	33	102
ZIGUINCHOR-Millet (bulrush)	2	-16.27	12.55	100	23	100	7	100	18	9	230	88	100	88	0	387	92	287	766

	WDEFi	WDEFv	WDEFf	WDEFr	WDEFt	ETAi	ETAv	ETAf	ETAr	ETAt	Cr1a	Cr2a	Cr3a	Cr4a	Cr1n	Cr2n	Cr3n	Cr4n
BAMBEY-METEO-Millet (bulrush)	0	-19	0	0	-19	6	145	43	73	267	20	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
DIORBEL-Millet (bulrush)	0	-8	0	0	-8	5	138	42	69	254	20	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
KAOLACK-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	155	42	75	277	20	-999	-999	-999	18	-999	-999	-999
LINGUERE-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	148	42	76	271	20	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
MATAM-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	183	48	78	314	17	-999	-999	-999	20	-999	-999	-999
PODOR-Millet (bulrush)	0	-63	-29	-39	-131	6	105	21	41	173	-999	-999	-999	-999	24	-999	-999	-999
TAMBACOUNDA-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	5	147	40	69	261	18	-999	-999	-999	17	-999	-999	-999
THIES-Millet (bulrush)	0	-12	0	0	-12	5	130	40	72	247	21	-999	-999	-999	19	-999	-999	-999
ZIGUINCHOR-Millet (bulrush)	0	0	0	0	0	4	126	36	63	229	17	-999	-999	-999	16	-999	-999	-999