

1346

COMITÉ PERMANENT
INTER-ÉTATS DE LUTTE
CONTRE LA SÉCHERESSE
DANS LE SAHEL



PERMANENT INTER-STATE
COMMITTEE FOR
DROUGHT CONTROL
IN THE SAHEL

CILSS

CENTRE REGIONAL AGRHYMET

Programme Majeur Formation

*« Gestion durable des
Agro-écosystèmes Sahéliens »*



*Module AD2 : L'exploitation et la maîtrise de l'eau
aux fins agricoles*

Niamey, du 18 au 29 Août 1999

RAPPORT PEDAGOGIQUE

SECRÉTARIAT EXECUTIF : 03 BP 7049 Ouagadougou 03 BURKINA FASO. Tél. (226) 30 67 58/59 Fax : (226) 30 67 57 Email : CILSS@fasonet.bf
Télex : 5263 COMITER

CENTRE RÉGIONAL AGRHYMET : BP 11011 Niamey, NIGER. Tél (227) 73 31 16 / 73 24 36 Fax : (227) 73 24 35 Email : admin@sahel.agrhymet.ne
Site Web : www.agrhymet.ne Télex : 5448 NI

INSTITUT DU SAHEL : BP 1530 Bamako, MALI. Tél : (223) 22 21 48 / 23 02 37 Fax : (223) 22 23 37 / 22 59 80 Email : ceesay@insahdir.insah.ml

1234

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

DEPARTMENT OF THE HISTORY OF ARTS

AND ARCHITECTURE

OFFICE OF THE DEAN



CHICAGO, ILLINOIS

1900

LIBRARY

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

DEPARTMENT OF THE HISTORY OF ARTS

AND ARCHITECTURE

Sommaire

I. Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Justification	1
1.3 Publique cible	1
1.4 Objectifs	2
1.4.1 Objectifs généraux	2
1.4.2 Objectifs Spécifiques	2
II. Organisation	3
2.1 Présentation du module	3
2.2 Encadrement du module	3
2.3 Sélection des candidats	3
2.4 Préparation de la salle de formation	3
2.5 Aspects financiers	4
III Programme de la formation et moyennes Pédagogiques	5
3.1 Programme de formation	5
3.2 Démarche et support pédagogique	5
IV Conclusion	7
V Annexes	9
Annexe I : Fiche signalétique	
Annexe II : Thèmes et contenus	
Annexe III : Liste des participants	
Annexe IV : Exposés et étude de cas	

10. Results

10.1. Introduction

The first part of the results section discusses the overall findings of the study.

The second part of the results section discusses the findings of the first experiment.

The third part of the results section discusses the findings of the second experiment.

The fourth part of the results section discusses the findings of the third experiment.

The fifth part of the results section discusses the findings of the fourth experiment.

The sixth part of the results section discusses the findings of the fifth experiment.

10.2. Discussion

The first part of the discussion section discusses the overall findings of the study.

The second part of the discussion section discusses the findings of the first experiment.

The third part of the discussion section discusses the findings of the second experiment.

The fourth part of the discussion section discusses the findings of the third experiment.

The fifth part of the discussion section discusses the findings of the fourth experiment.

10.3. Conclusion

The first part of the conclusion section discusses the overall findings of the study.

The second part of the conclusion section discusses the findings of the first experiment.

10.4. References

The first part of the references section discusses the overall findings of the study.

The second part of the references section discusses the findings of the first experiment.

The third part of the references section discusses the findings of the second experiment.

The fourth part of the references section discusses the findings of the third experiment.

The fifth part of the references section discusses the findings of the fourth experiment.

I. INTRODUCTION

1.1 Contexte

Le mandat général révisé du comité permanent inter-etats de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) est de s'investir dans la recherche de la sécurité alimentaire et dans la lutte contre les effets de la sécheresse et la désertification pour un nouvel équilibre écologique.

Le CILSS dans cette optique doit œuvrer pour la promotion et la gestion améliorée des ressources naturelles de la région sahélienne.

Le Centre régional AGRHYMET, institution spécialisée du CILSS, compte parmi ses principales fonctions la formation des personnels des pays de la sous-région en vue de leur spécialisation appropriée en agrometeorologie, hydrologie, protection des végétaux, gestion des ressources naturelles et en maintenance des instruments.

L'une des principales fonctions du Programme Majeur Formation du Centre Régional AGRHYMET est le renforcement des capacités sahéliennes de conception et d'exécution dans les domaines d'intervention du CILSS.

Dans le cadre de ses activités de formation, l'Unité de Formation Continue du Programme Majeur Formation se propose de réaliser une série de six (6) modules d'agriculture durable portant sur la gestion durable des agro-écosystèmes sahéliens.

Le thème de la deuxième session de formation modulaire est : L'exploitation et maîtrise de l'eau aux fins agricoles

1.2 Justification

La résolution durable du problème d'autosuffisance alimentaire au Sahel passe par une gestion conséquente des agroécosystèmes.

Plusieurs études et recherches ont montré que l'eau est de loin le facteur le plus limitant pour l'agriculture au Sahel; de ce fait l'exploitation et la gestion de l'eau est une condition indispensable pour la réalisation d'une agriculture durable dans ces régions.

Dans le but d'atteindre l'objectif d'exploitation et de gestion de l'eau aux fins agricoles au Sahel; le Centre Régional AGRHYMET; à travers des formations continues de courte durée cherche à mettre à la disposition des états membres des agents mieux outillés pour relever les défis de développement durable de l'agriculture.

1.3 Public cible et condition de participation

- la formation s'adresse aux Ingénieurs des travaux de conception et techniciens supérieurs exerçant dans les services de développement rural des secteurs publics, parapublics, privés et des ONG.
- Vingt (20) places sont mises à la disposition des candidats répondant au profil ci-dessus décrit et bénéficiant d'un financement.

1.4 Objectifs

1.4.1 Objectifs généraux

- La formation doit permettre aux participants d'analyser à partir des réalités du milieu sahélien et d'expériences propres, les problématiques de sécurité alimentaire et une gestion de ressources naturelles dans une approche d'agriculture durable.
- La formation doit doter les participants de connaissances pratiques sur une meilleure gestion des ressources indispensables la production agricole notamment l'eau
- La formation doit rendre les participants capables d'assurer le transfert de technologies dans le domaine de l'agriculture.

1.4.2 Objectifs spécifiques

Il s'agit de donner aux participants, un savoir et un savoir-faire en matière de gestion des agro-ecosystemes sahélien leur permettant de :

- comprendre la typologie de l'irrigation et son évolution socio-économique et hydraulique
- maîtriser la notion de résistance des plantes à la sécheresse
- maîtriser la notion d'économie et de gestion de l'eau
- maîtriser les paramètres entrant dans le calcul du bilan hydrique et l'application du bilan hydrique aux cultures pluviales et irriguées
- concevoir des aménagements hydro-agricoles pour la petite et la grande irrigation.

II ORGANISATION

2.1 Présentation du module

Désignation : AD2- Exploitation et maîtrise de l'eau aux fins agricoles

Date de réalisation : du 18 au 29 Août 1999

Durée: douze (12) jours

Lieu : Centre Régional AGRHYMET

2.2 Encadrement et Animation

Responsable du Programme Majeur Formation (PMF) : Sankung B. SAGNIA Formateur en Ematologie, CRA/PMF

Responsable de l'Unité de Coordination des activités de Formation Continue : Faustin GNOUMOU, Formateur en Agrométéorologie, CRA/PMF

Responsable Pédagogique du module AD2 : Faustin GNOUMOU Formateur en Agrométéorologie, CRA/PMF

Consultant principal : Hamed MOULAYE Ingénieur Hydraulicien, directeur d'exploitation de l'Agence Nigérien pour la Promotion de l'Irrigation Priver au Niger (ANPIP)

Intervenants / Animateur

1. Dr Abou AMANI Hydrologue Unité gestion des ressources naturelles CRA/PMI
2. Hamed MOULAYE Ingénieur Hydraulicien, Agence Nigérien pour la Promotion de l'Irrigation Priver au Niger (ANPIP)
3. Issaka LONA , Ingénieur Agrometeorologue, Filière Agrometeorologie CRA/PMF
4. Iliassou MOSSI Ingénieur agronome d'irrigation /Département d'irrigation INRAN Kollo
5. A. MOUSTAPHA Docteur en bioclimatologie DS/INRAN Niamey
6. Rabiou ALMADJIR Ingénieur de travaux à l'ONAHA
7. Nguetora MADJYARA Ingénieur Hydraulicien CRA/PMF

2.3 Sélection des candidats :

Le Centre Régional AGRHYMET a fait une large diffusion du calendrier des formations programmées dans le cadre de son plan triennal 1999 - 2001.

Les candidats devraient remplir et faire parvenir un dossier de candidature distribue à cette fin. Une commission de quatre (4) membres a été mise en place afin d'étudier les candidatures et sélectionner deux candidats par Pays membre du CILSS.

Sur dix sept (17) candidats répondant aux critères de sélection 16 ont répondu présents soit une participation de 94.11 o/o. Seul un n'a pas pris part à la formation pour des raison techniques.

2.4 Préparation de la salle de formation

la salle de réunion du PMF/DFPV fut préparée afin d'accueillir la formation. Elle était équipée des matériels pédagogiques suivants : un (1) rétroprojecteur, un (1) micro-projecteur,

un (1) poste téléviseur, un (1) magnétoscope, tableau mural blanc, un (1) tableau en papier, un bureau pour les animateurs, des tables et des chaises pour participants.

2.5 Aspects financiers

La session de formation a été entièrement financée par le Gouvernement Danois.

L'enveloppe financière allouée à cette activité a été gérée par le Centre de Gestion du Centre Régional AGRHYMET.

Afin de couvrir les frais de restauration et d'hébergement, des perdiems ont été versés aux participants. Il ont aussi bénéficié d'une assurance de couverture sanitaire.

La rémunération du consultant a été faite sur la base d'un contrat conformément aux dispositions du CILSS en vigueur en la matière.

III. PROGRAMME DE FORMATION ET MOYENS PEDAGOGIQUES

3.1 Programme de formation

Date		Thème	Intervenant
Lundi	8h - 12h	La pluviométrie et initiation aux techniques de spatialisation des pluies	Habou AMANI
18/10/99	15h - 18h	Typologie de l'irrigation au Niger, évolution socio-économique et hydraulique	Ahmed MOULAYE
Mardi	8h - 10h	Les paramètres du bilan hydrique	MADJARA Nguetora
19/10/99	10h - 12h	Besoin en eau des cultures / débit maximum de pointe	Illiassou MOSSI
	15h - 18h	Résistances des plantes à la sécheresse	A. MOUSTAPHA
Mercredi	8h - 12h	Résistances des plantes à la sécheresse	A. MOUSTAPHA
20/10/99	15h - 18h	Besoins en eau des cultures / manuel CROPWAT	Illiassou MOSSI
Jeudi	8h - 12h	Application CROPWAT	Illiassou MOSSI
21/10/99	15h - 18h	économie de l'eau	A. MOUSTAPHA
Vendredi	8h - 12h	Besoin en eau des cultures et leur résistance à la sécheresse / manuel DHC4	Issaka LONA
22/10/99	15h - 18h	Application DHC4	Issaka LONA
lundi	8h - 12h	Gestion de l'eau	Rabiou ALMADJIR
25/10/99	15h - 18h	Gestion de l'eau	Rabiou ALMADJIR
Mardi	8h - 12h	Gestion de l'eau	Rabiou ALMADJIR
26/10/99	15h - 18h	Conception des AHA / Normes de l'irrigation au NIGER	Ahamed MOULAYE
Mercredi	8h - 12h	Conception des AHA / Grande Irrigation	Ahamed MOULAYE
27/10/99	15h - 18h	Conception des AHA / Petite irrigation	Ahamed MOULAYE
Jeudi	8h - 12h	Visite Irrigasq, Hydro-reteneur, visite des périmètres de Karaigorou et Gotheye	Tous les intervenants
28/10/99	15h - 18h	Mini - Projet	Ahamed MOULAYE
Vendredi	8h - 12h	Revue des Thèmes Techniques	Tous les intervenants
29/10/99	15h - 18h	Revue des techniques / (Evaluation)	Tous les intervenants

3.2 Démarche et supports pédagogiques

La stratégie pédagogique adoptée était active et participative. Elle comprenait les techniques suivantes :

- **L'exposé magistral** : il est donné par l'animateur sur le sujet du jour. Au cours de cet exposée il livre ces réflexions et analyses sur le problème posé et les solutions qu'il préconise. Dans certain cas la visualisation de cassettes vidéo, la retro-projection, la vidéo projection sont utilisées comme support dans l'exposé.

- **Des travaux dirigés en informatique** : ces travaux sont dirigés par l'animateur sur le sujet du jour pour consolider ce qui a été dit en exposée magistral sur le modèle présenté, et aussi pour que les participants puissent faire des manipulations sur le modèle présenté.
- **La discussion** : elle est d'une part introduite par les réactions des participants sous forme de questions posées ou de contributions; et d'autre part par des échanges d'expériences entre les participants d'une part et aussi entre les participants et les animateurs.
- **Les visites de terrains dirigées et commentées**: elles ont été effectuées sur des aménagements hydro-agricoles et sites maraîchers du territoire. Des discussions sur le terrain entre les animateurs et les paysans ont permis de mieux appréhender la conception des ouvrages hydrauliques, les problèmes qui se posent à ces ouvrages, la vision paysanne des problèmes d'exploitation et de maîtrise et de gestion de l'eau aux fins agricoles.

IV. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

En absence du Directeur Général du Centre Régional AGRHYMET, la cérémonie d'ouverture de cette session de formation a été présidée par monsieur Sankung B. SAGNIA, responsable du Programme Majeur Formation qui dans son allocution a souligné l'importance du thème et le grand espoir qu'il suscite pour nous Sahéliennes et Sahéliens

Sur dix sept (17) candidats répondant aux critères de sélection 16 ont répondu présents soit une participation de 94.11 o/o. Seul un n'a pas pris part à la formation pour des raisons techniques.

La formation a été animée en privilégiant la participation active de tous au cours de débats et échanges expériences.

Les documents élaborés par les différents intervenants ont été distribués aux participants.

En plus de séances de retro projections et vidéo projection des visites sur les aménagements de saga, à la de coopérative de Karai Gorou, à la coopérative maraîchère de Gotheye. Au cours de ces visites la délégation a eu des entretiens avec les coopérateurs.

Tous les thèmes programmés ont été exécutés

les participants ont manifesté un grand intérêt pour la formation par leur attention soutenue et leurs assiduité au travail.

La logistique a été assurée par un bus et son chauffeur.

Un système de pause café a été observé tout le long de la formation à raison de deux fois par jours

Tous les participant ont reçu leur attestations a l'issue de cette formation a l'exception un seul pour raison d'absence répéter.

En clôturant la session de formation Monsieur Sankung B. SAGNIA, responsable du Programme Majeur Formation assurant l'intérim du Directeur Général du Centre Régional AGRHYMET a vivement remercié le gouvernement Danois pour son appui financier au CILSS, les animateurs et les participants pour le travail bien fait. Il a exhorté les participants à faire bon usage des nouveaux outils qu'il viennent d'acquérir pour le bien être de la communauté sahélienne entière

Les participant au module AD2 Souhaite que cette formation soit divisée en deux modules qui pourraient se succéder ainsi qu'il suit:

Module N°1 : Gestion de l'eau aux fins agricoles : 13 jours

- Formation théorique de base 3 jours
- Diagnostic du fonctionnement d'un périmètre irrigué (le long du fleuve Niger) et évolution des performances : 6 jours de mesure de terrain, analyse des résultats
- Conception et réalisation d'un petit réseau californien à Karey gourou : 2 jours
- Analyse, interprétation des résultats : 1 jour
- Restitution - débats - évaluation : 1 jour

Module N°2 : Informatique appliquée à la gestion de l'eau

- CROPWAT, base théoriques et applications : 3 jours
- DHC4, bases théoriques et applications : 3 jours
- Visite de terrain (Kareygorou , Saga), recueil de données et applications pratiquées : 3 jours
- Restitutions, débats, évaluation : 1 jour.

ANNEXES

Annexe I : Fiche signalétique

Annexe II : Thèmes et contenus

Annexe III : Liste des participants

Annexe IV : Exposés

ANNEXE I

FICHE SIGNALITIQUE

1. **Titre** : AD2- Exploitation et maîtrise de l'eau aux fins agricoles
2. **Type** : Module de Formation Continue
3. **Lieu** : Centre Régional AGRHYMET
4. **Période** : du 18 au 29 Août 1999
5. **Durée** : douze (12) jours
6. **Pays bénéficiaires** : (Pays membres du CILSS) : Burkina Faso, Cap Vert, Gambie, Guinée-Bissau, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad.
7. **Groupe Cible** : la formation s'adresse aux Ingénieurs de conception, aux ingénieurs des travaux et techniciens supérieurs exerçant dans les services de développement rural des secteurs publics, parapublics et privés et des ONG.
8. **Encadrement et Animation** : Experts du Centre Régional AGRHYMET et Consultants
9. **Langue de travail** : Français

ANNEXE II

Thèmes et contenus

Thème 1 La pluviométrie et l'initiation aux techniques de spatialisation des pluies

Thème 2 : Typologie de l'irrigation au Niger, évolution socioéconomique et hydraulique

- Historique
- Typologie
- Evolution des itinéraires techniques: contrainte, performances, tendance
- Performances et limites de l'irrigation à la maîtrise totale de l'eau

Thème 3 : Résistance des plantes à la sécheresse

- Rappel de quelques définitions
- Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude des mécanismes de résistance des plantes à la sécheresse
- Les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse
- L'appareil stomatique et la résistance à la sécheresse
- Les stratégies de lutte contre la sécheresse
- Liste des documents consultés

Thème 4 : Besoins en eau des cultures , débit maximum de pointe

- Définitions
- Détermination des besoins en eau au niveau d'un projet d'irrigation
- Détermination des débits caractéristiques
- Applications

Thème 5 : Cours d'initiation à l'utilisation du logiciel CROPWAT

- Calcul de l'évapotranspiration de référence (Eto)
- Calcul des besoins en eau des cultures
- Pilotage des irrigations

Thème 6 : Diagnostic Hydrique des cultures (DHC4)

- Données d'entrée du modèle
- Rappel théorique sur le bilan hydrique des cultures pluviales
- Modélisation du bilan hydrique
- Bilan proposé
- Sorties et valorisation des résultats
- Prise en main du logiciel

Thème 7 : Economie d'eau

- Les techniques visant à l'amélioration, la collecte et le stockage de l'eau pluviale
- La modification de l'état de surface en vue de réduire l'évaporation du sol nu
- L'amélioration du microclimat de la plante
- Le choix des espèces et des variétés économe en eau
- La lutte contre les adventices
- La valorisation de l'eau du sol
- L'apport de l'eau par irrigation

Thème 8 : Gestion de l'eau

- Méthodologie d'analyse de la gestion de l'eau
- Gestion de l'eau
- Gestion des infrastructures
- Démarche conceptuelle
- Méthodologie d'évaluation rapide des performances

Thème 9 : Norme d'irrigation aux Niger

- Main d'eau, quartier hydraulique, tour d'eau
- Processus de prise de décision dans la distribution de l'eau
- Flexibilité des réseaux d'irrigation

Thème 10 : Conception des Aménagement Hydro-Agricoles (AHA) à Maîtrise Totale de l'Eau (MTE)-au NIGER

- Conception des AHA à MTE au Niger
- Conception des petits périmètres irrigués au Niger

ANNEXE III

LISTE DES PARTICIPANTS

3.1 Apprenants

KIKONE Hamouro, Ministère de l'Agriculture

Tel: 32 46 54

Ouagadougou Burkina Faso

TRAORE B. Gilbert DEP/Ministère de l'Agriculture

Tel: 38 50 86

Ouagadougou Burkina Faso

LAWAN Habou Direction de l'hydraulique

Tillabery NIGER

ZANGUI Mahamadou responsable des cultures vivrières

Kollo NIGER

DEMBA Lamine DEAR/MDRE

Tel: 591 83 / 901 15

Fax: 25 57 63 / 25 26 16

Nouakchott MAURITANIE

MOHAMED Lemine Ould Hmeida DEAR/MDRE

Tel: 591 83 / 901 15

Fax: 25 57 63 / 25 26 16

Nouakchott MAURITANIE

MANKA Kebba Ministère de l'Agriculture

Tel: 220 22 82 16 / 20 15 59

Fax: 22 50 09 / 22 86 28

Banjul GAMBIE

CHAM Matarr Ministère de l'Agriculture

Tel: 220 22 82 16 / 20 15 59

Fax: 22 50 09 / 22 86 28

Banjul GAMBIE

MARTY Haran MDR/D. Génie Rural et Hydraulique Agricole

Tel: 235 52 98 62

Email: dgrha.@intert.td

TCHAD

Mme KHADIDIA Hassaballah Société de développement du Lac

Tel: 52 35 03

Fax: 52 32 38

Ndjaména TCHAD

DAVILA Elvira Institut de Développement Agraire

Tel: 238 71 11 47

Praia CAP-VERT

TEKETE Aliou Direction Nationale de la Météorologie

Fax : 223 29 21 01

Bamako MALI

Mme TOURE Fanta Diallo Ministère du Développement Rural et de l'eau

Tel: 22 20 22 / 23 12 27

Bamako MALI

DIOUF Niokhor Direction de la météorologie Nationale

Tel : 827 74 08

Fax: 23 36 14

Dakar SENEGAL

Mme BARBOSA Carolina Ministère du Développement Rural N.P.

Tel: 22 17 67

GUINÉE BISSAU

CORREIA M. Aguinardo Carolina Ministère du Développement Rural N.P./DGR

Tel: 22 17 67

GUINÉE BISSAU

3.2 Encadreur

Responsable du Programme Majeur Formation (PMF) : Sankung B. SAGNIA Formateur en Entomologie, CRA/PMF

Responsable de l'Unité de Coordination des activités de Formation Continue et Responsable Pédagogique du module AD2 : Faustin Gnoumou, Formateur en Agrométéorologie, CRA/PMF

Consultant principal : Hamed MOULAYE, Ingénieur Hydraulicien, directeur d'exploitation de l'Agence Nigérien pour la Promotion de l'Irrigation Priver au Niger (ANPIP)

3.3 Animateurs

1. Dr Abou AMANI Hydrologue Unité gestion des ressources naturelles CRA/PMI
2. Hamed MOULAYE Ingénieur Hydraulicien, Agence Nigérien pour la Promotion de l'Irrigation Priver au Niger (ANPIP)
3. Issaka LONA , Ingénieur Agrometeorologue, Filière Agrometeorologie CRA/PMF
4. Iliassou MOSSI Ingénieur Hydraulicien INRAN Kollo
5. A. MOUSTAPHA Ingénieur Agronome INRAN Niamey
6. Rabiou ALMADJIR Ingénieur Hydraulicien
7. Nguetora MADJARA Ingénieur Hydraulicien CRA/PMF

ANNEXE IV

Les exposés

THEME I

PLUVIOMETRIE AU SAHEL ET INITIATION A LA SPATIALISATION DES PLUIES

Octobre 1999

DR. ABOU AMANI
Expert Hydrologue
Unité Gestion des Ressources
Naturelles
Programme Majeur Information

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu général sur l'importance des pluies au Sahel, sur l'état des connaissances scientifiques relatives aux pluies sahéliennes et sur les techniques de spatialisation des pluies en particulier la technique de krigeage. Les points abordés sont successivement : importance des pluies au Sahel ; mesure de pluie au Sahel ; la variabilité des pluies au Sahel et la spatialisation des pluies. La mesure de la pluie constitue un point important pour la connaissance des pluies au Sahel. La nature pas très dense des réseaux de mesure de pluies est une contrainte majeure. L'utilisation des techniques de télédétection peut contribuer à une meilleure connaissance des systèmes précipitants sahéliens. Le caractère fragile de l'écosystème sahélien est analysé eu égard à la forte variabilité spatiale et temporelle des pluies au Sahel. Cette variabilité est abordée pour différentes échelles d'espace allant du régional au degré carré et pour des pas de temps de quelques minutes, de l'événement, la journée, la décade, le mois et la saison. L'estimation des pluies est d'une grande importance pour la majorité des applications pour lesquelles la pluie est considérée comme variable explicative. En effet on a besoin généralement de connaître la valeur de pluie en un point de non mesure ou aussi de connaître la valeur de la pluie moyenne sur une surface donnée. Un aperçu sur les techniques de spatialisation est présenté en particulier la technique de krigeage.

2. Importance des pluies au Sahel

L'importance des pluies au Sahel n'est plus à démontrer compte tenu de son impact sur les activités socio-économiques des populations sahéliennes. La production agricole au Sahel est expliquée à plus de 70% par le cumul pluviométrique de la saison des pluies. Ainsi une mauvaise saison des pluies est synonyme au Sahel d'un déficit de production agricole. De même la répartition temporelle des pluies durant la saison joue un rôle déterminant quant au niveau de production agricole.

Une mauvaise saison des pluies au Sahel a aussi des conséquences négatives sur le l'élevage compte tenu du déficit en biomasse résultant et de l'insuffisance des ressources en eau pour l'alimentation des bétails. Aussi l'alimentation en eau domestique de certains centres urbains et la production d'énergie hydroélectrique sont très influencés par la disponibilité en eau.

La fragilité de l'écosystème sahélien est liée au caractère très variable des précipitations dans l'espace et dans le temps. En effet pour une saison donnée, les pluies sont très variables au courant de la saison avec une période de pluie abondante au courant des mois de juillet août et des pluies faibles à modérées durant les autres mois de la saison en début et fin. Le cumul associé au cœur de la saison contribue à hauteur de plus de 70% du cumul total de la saison des pluies au Sahel.

3. Mesure des pluies au Sahel

On distingue deux approches pour mesurer le cumul pluviométrique. L'approche directe par l'intermédiaire d'un pluviomètre ou d'un pluviographe permet d'accéder à la mesure réelle de cumul de pluie pour un temps donné. Avec le pluviomètre le cumul pluviométrique de l'événement pluvieux est mesuré et compte tenu des heures de lecture, c'est le cumul en 24 heures qui est donné par le pluviomètre. Pour ce qui est du pluviographe où un enregistrement de cumul de pluie est disponible dans le temps, on peut accéder non seulement au cumul total de l'événement pluvieux, mais aussi à la répartition dans le temps des intensités de la pluie.

Les données pluviographiques sont considérées dans des études sur l'érosion de sol. Le cumul de pluie obtenu à partir d'un pluviomètre quoique la seule mesure réelle de la pluie est entachée d'erreurs de mesure. Ces erreurs sont associées à la nature même de système précipitant et aussi à l'appareil de mesure. De façon générale l'erreur de mesure de pluie pour un événement pluvieux peut aller de 1 à 10%. A cette erreur de mesure viendra s'ajouter l'erreur d'échantillonnage dans le cas où le cumul est estimé à partir d'un réseau pluviométrique donné en un point de non mesure.

La deuxième approche de mesure de pluie est indirecte. Elle est basée sur la technique de la télédétection. En effet à partir des mesures satellitales et radar, il est possible de quantifier le cumul de pluie pour des pas de temps appropriés. Pour les faibles pas de temps inférieurs à l'événement (quelques minutes), c'est la technique de mesure radar qui est la mieux appropriée. Le radar permet de mesurer la réflectance d'un nuage en comparant l'onde émise par radar et l'onde réfléchie par le nuage et reçue par le radar. Cette réflectance caractérise la distribution granulométrique de gouttelettes d'eau au sein du nuage. Cette valeur est très bien reliée avec l'intensité des pluies au sol. Ainsi à partir de la relation Z-R (Z étant la mesure radar et R l'intensité des pluies), il est possible connaissant la mesure radar de déterminer l'intensité de la pluie et le cumul correspondant. Malheureusement le radar possède un rayon spatial d'action très limité (100 à 250 km) ne permettant pas de couvrir une très grande étendue à moins de disposer d'un réseau de radars bien répartis au sol.

Le satellite offre quant à lui cette possibilité de couvrir une grande région. Il est très vite apparue dès le début de satellites d'estimer les précipitations à partir des satellites afin de couvrir des grandes surfaces qui sont parfois difficilement accessibles. Dans le cas des régions sahéliennes, c'est la très faible densité de réseaux pluviométriques des pays résultant des contraintes économiques qui milite à l'utilisation des techniques d'estimation des pluies satellites.

Plusieurs méthodes d'estimation des précipitations à partir des données satellite ont été développées au cours des dernières années. Ces méthodes utilisent des mesures soit dans l'infrarouge thermique (IR), soit dans les micro-ondes (MO). L'avantage primordial des méthodes qui utilisent l'IR pour l'estimation des pluies est la très bonne résolution temporelle (une image toutes les demi-heures) de ces données. Néanmoins, les données IR sont des mesures qui n'ont pas un rapport physique direct avec les précipitations. L'avantage des méthodes qui utilisent les MO est lié au fait que les données MO sont des mesures directes de l'absorption et de l'émission ou de la diffusion du rayonnement par les gouttes d'eau et les cristaux de glace à l'intérieur des nuages. Cependant, la faible résolution temporelle (une ou deux images par jour) des données MO provenant des satellites à orbite basse rend difficile l'estimation des précipitations cumulées dans le temps. Il existe des algorithmes combinant les deux types de mesure satellitales afin d'estimer les pluies.

Néanmoins, des projets récents, comme celui du lancement du satellite TRMM ont pour but de développer la méthode MO. Ainsi, ce satellite doit permettre d'obtenir les estimations mensuelles des pluies mondiales sur des surfaces de côté 5°, avec une erreur inférieure à 10%.

En revanche, les méthodes d'estimation à partir des méthodes IR sont déjà largement développées. Ces méthodes se basent sur les données du satellite géostationnaire METEOSAT.

Les précipitations en zone tropicale sont principalement dues à de grands systèmes convectifs : au Sahel, les pluies de forte intensité contribuent à 50% des précipitations totales. Ces fortes intensités sont provoquées par d'importants processus de convection qui impliquent les surfaces supérieures de nuages élevés. Il est donc possible d'estimer les pluies à l'aide de méthodes fondées sur la radiométrie de la surface des nuages.

En effet, la hauteur des nuages est liée à la convection. Plus le nuage est haut, plus il est froid, on enregistre alors un compte numérique élevé au niveau des données thermiques infrarouges de METEOSAT. Ainsi si le nuage est assez épais et opaque (cas du cumulo nimbus tropical), les signaux émis depuis la partie supérieure du nuage donnent une indication de l'élévation de cette partie supérieure. L'altitude maximale des nuages sur un pixel est donc un paramètre important, qui représente l'activité du nuage ainsi que la création de pluie. Ainsi le canal TIR du satellite donne une indication sur la convection, et sert d'indicateur pluviométrique indirect.

Cette estimation étant indirecte, elle nécessite la calibration-validation des données satellitaires à partir des données sol provenant d'un réseau pluviométrique.

Exemples d'algorithmes d'estimations des pluies :

Les algorithmes d'estimation de pluie par satellite à partir de l'IR ont la même approche qui consiste à déterminer pour un pas de temps de cumul donné (mois ou saison) et pour chaque pixel l'occurrence de nuage à sommet froid (température inférieure à un seuil fixé -35, -40 ou -60°C). Le champ des occurrences est par régression linéaire simple ou multiple lié au champ de pluie réellement mesurée au sol pour la période correspondante. Pour ce qui est la région sahélienne les algorithmes d'estimation des pluies disponibles sont entre autres : la méthode TAMSAT de l'université de Reading, la méthode EPSAT de Lanion (IRD), la méthode AGRHYMET. Le choix du seuil permettant de séparer les nuages pluvigènes des nuages non pluvigènes est un point important. Une régression avec les observations permet alors d'obtenir une calibration de la forme :

$$R = a \text{ OCC} + b, R=0 \text{ si OCC}=0$$

Où R est la pluie en mm et OCC est l'occurrence de sommets froids en heures pour un seuil de température donné.

La qualité de l'estimation donnée par cette équation est fonction du pas de temps de cumul. L'estimation est d'autant plus précise que le pas de temps est grand. Pour la méthode AGRHYMET un modèle de régression linéaire multiple est considéré compte tenu du fait que plusieurs seuils de températures sont considérés pour le calcul des occurrences.

Il est très important de remarquer que la mesure des pluies par satellite ne peut jamais remplacer la mesure directement obtenue à partir des pluviomètres. La mesure satellitale utilise les données sol pour fin de calibration et de validation.

4. Variabilité des pluies au Sahel

Pour une saison donnée, les pluies sont très variables au courant de la saison avec une période de pluie abondante pendant les mois de juillet août et des pluies faibles à modérées durant les autres mois de la saison en début et fin. Le cumul associé au cœur de la saison contribue à hauteur de plus de 70% du cumul total de la saison des pluies au Sahel. Les cumuls

saisonniers d'une année à l'autre varient également. Cette variabilité inter-saisonnière est un grand facteur d'incertitude pour la production agricole au Sahel. L'évolution des cumuls saisonniers de ces cinquante dernières années fait ressortir d'une manière générale au Sahel l'existence d'une cassure au sein de la série des données saisonnières autour des années 1968-1972 (Lebel et al., 1997; Servat et al., 1999). Les années d'avant la cassure sont caractérisées par une moyenne des cumuls supérieure à celle des cumuls observés après. C'est ainsi qu'on distingue dans la littérature les périodes humide et sèche. Des études ont montré que cette baisse est de l'ordre de 10 à 20% et a touché l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest pas uniquement la région sahélienne (Sevat et al., 1999; Le barbe et Lebel, 1997).. Cette baisse est principalement associée à la diminution du nombre d'événements pluvieux enregistrés durant le cœur de la saison qui est en fait la partie de la saison où la baisse a été plus marquée (Lebel et al., 1997). Le cumul moyen événementiel n'as pratiquement pas subi de variation durant la période qualifiée de sèche. Il est très intéressant de remarquer l'existence d'un certain retour à une situation normale au Sahel depuis ces cinq dernières années.

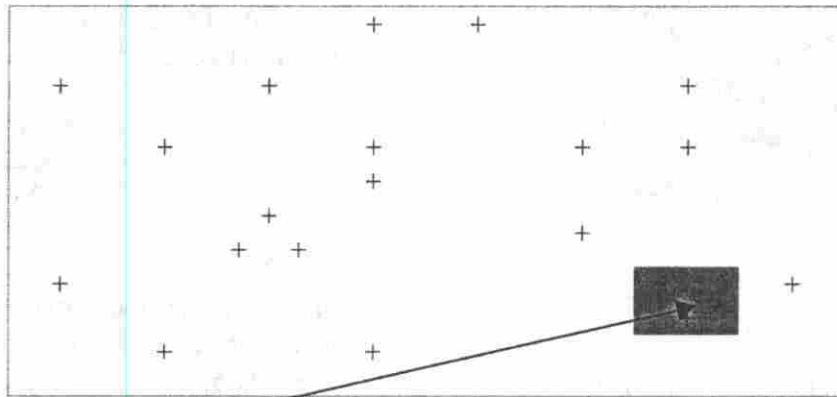
La très grande variabilité spatiale est aussi une des caractéristiques des pluies au Sahel. Cette variabilité spatiale se rencontre à toutes les échelles de temps (événement, journée, décade, mois et saison). Elle réside au niveau de la nature et le lieu de formation des systèmes pluvieux responsables des pluies dans la sous-région (Amani et al, 1996, Laurent et al, 1997). En effet les pluies sahéliennes sont engendrées principalement par deux types de systèmes pluvieux à savoir les systèmes convectifs localisés et les systèmes convectifs organisés dynamiques dont le sens de déplacement est d'est en ouest avec des vitesses de déplacement comprises généralement entre 40 et 70 km/h (Lebel et al., 1997). Ces derniers peuvent parcourir des distances de plus de 2000 km avec une étendue nord-sud pouvant dépasser les 200 km de large.

Les travaux issus des données EPSAT-Niger collectées sur un degré carré autour de la ville de Niamey sont très édifiants quant à la variabilité spatiale de petite échelle des pluies au Sahel (Taupin et al, 1993; Lebel et al., 1994, 1995). En effet sur les 10 années des données disponibles sur un réseau très dense (de l'ordre de 100 pluviographes au 10 000 km²), à chaque année, le rapport entre les cumuls saisonnier maximum et minimum a été toujours supérieur à deux. De même l'existence du gradient nord sud généralement admis au niveau du Sahel n'est plus réaliste à l'échelle d'une saison de pluies sur des surfaces de l'ordre du degré carré. Ce n'est qu'en cumulant plusieurs années que le gradient nord-sud en question apparaît de façon plus nette. A travers les données EPSAT-Niger, divers travaux sur la variabilité des pluies au Sahel à l'échelle du degré carré pour des pas de temps de cumul allant de l'événement à la saison ont été conduits. Des abaques ont été proposés afin de déterminer l'erreur d'estimation des pluies moyennes au Sahel à n'importe quel pas de temps de cumul pour un réseau de densité donné pour des surfaces inférieures au degré carré (Lebel et Amani, 1999; Amani et Lebel, 1998).

5. Spatialisation des pluies

Le besoin de la spatialisation des données de pluie réside même au niveau du fait que les données pluviométriques proviennent d'un réseau de mesure qui est pour le cas du Sahel pas très dense. Ainsi, on a généralement besoin de connaître pour un point de non mesure, la hauteur de pluie correspondante pour un pas de temps de cumul donné. De même pour la plupart des applications pour lesquelles la pluie est considérée comme une des variables explicatives, la valeur moyenne sur une surface donnée est requise à la place des valeurs ponctuelles. Dans la plupart des cas, c'est une valeur ponctuelle qui est considérée comme

représentative de la valeur moyenne. Il existe des méthodes bien éprouvées qui permettent d'estimer sur la base d'un réseau de mesure soit la valeur en un point de non mesure soit la valeur moyenne sur la surface donnée. Les exemples types pour lesquelles la valeur moyenne est requise sont entre autres : la calibration et la validation des algorithmes d'estimation des pluies par satellites, le DHC_CP pour lequel la pluie spatialisée est considérée comme une des variables d'entrée, le calcul de l'humidité.



$$P_a = \frac{1}{a} \int_a P(x,y) da \text{ qui peut être obtenue par } \Rightarrow P_a = \frac{1}{n} \sum \lambda_i P_i \text{ avec } P_i \text{ pluie mesurée à la station } i \text{ et } n \text{ le nombre de points de mesure.}$$

Figure 1 : schématisation du passage des données ponctuelles à la moyenne surfacique (Abdou, 1999).

Les méthodes de spatialisation ont toutes la même approche, qui consiste à déterminer la valeur en un point comme étant une combinaison linéaire des valeurs mesurées. Elles diffèrent par la façon dont les pondérations sont estimées. Il existe deux types de méthodes de spatialisation : les méthodes déterministes (spline, distance inverse, etc...), et les méthodes stochastiques. Les méthodes déterministes ne permettent pas d'apprécier la qualité de l'estimation. Les méthodes stochastiques, en plus de la valeur estimée, donnent une quantification de la qualité de l'estimation.

Méthodes déterministes

Méthode de THIESSEN

Cette méthode a été proposée par THIESSEN, elle a l'avantage de tenir compte des positions des points expérimentaux entre eux par rapport au domaine. Elle permet ainsi de discriminer l'information redondante. Un point de mesure est représentatif de l'ensemble des points du domaine qui lui sont les plus proches par rapport aux autres points de mesure.

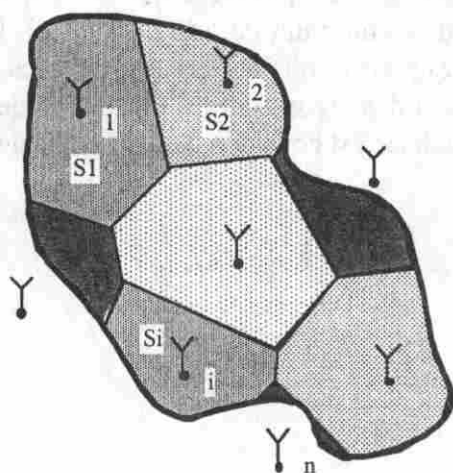


Figure 2. Polygone de Thiessen
(Abdou, 1999)

Sa mise en œuvre nécessite le tracé d'un réseau polygonal formé par les médiatrices des segments joignant les stations de mesure (fig 2)

On réalise ainsi une représentation du domaine en zone d'influences de surface S_i .

La moyenne P_m de la pluie sur tout le domaine sera égale à :

$$P_m = \frac{\sum S_i P_i}{S_T}$$

Où :

S_i est la surface partielle correspondant à la valeur P_i de la pluie.

S_T est la surface totale correspondant au domaine d'étude

Cette méthode est surtout adaptée à l'estimation des pluies moyennes sur une région mais elle présente deux inconvénients :

- l'un est dû à la relative lourdeur de sa mise en œuvre, notamment lorsque des absences de mesures en certaines stations obligent à tracer autant de réseaux polygonaux qu'il y a de configurations expérimentales ;
- l'autre, c'est qu'elle a été conçue pour être employée à grande échelle dans des régions où la pluie est homogène sans influence orographique très marquée.

Méthode des isohyètes

Elle consiste à tracer des courbes d'égales hauteurs de précipitation. Celles-ci peuvent être établies par interpolation. Entre deux isohyètes, on suppose une précipitation moyenne entre les deux valeurs des isohyètes et on calcule la surface d'influence de cette valeur par planimétrie.

La valeur moyenne P_m de la pluie est :

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i + C_{i+1}}{2} A_i}{A_T}$$

A_i : aire comprise entre les courbes de niveau C_i et C_{i+1}

A_T : aire totale du domaine

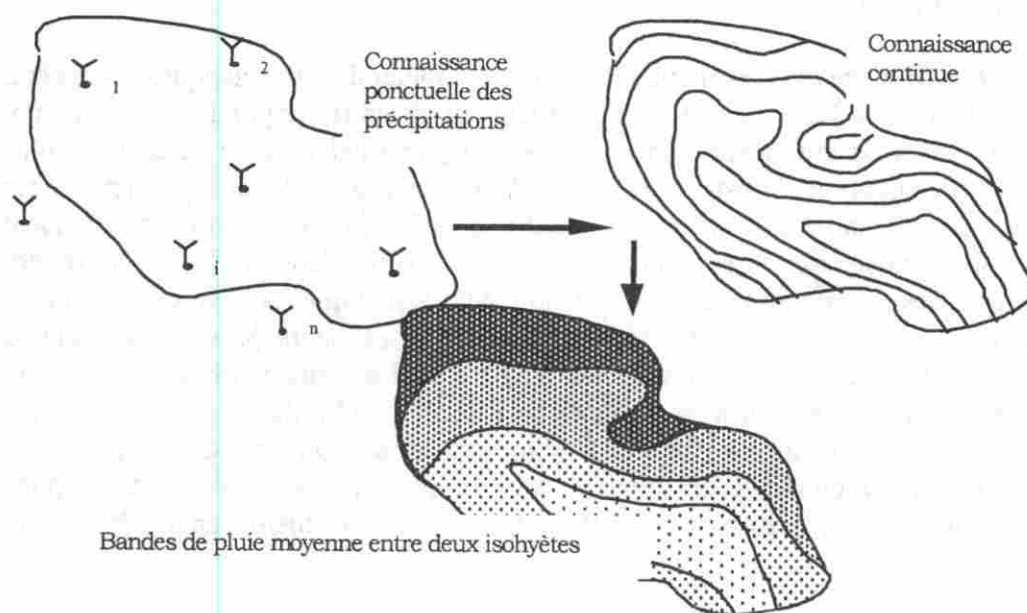


Figure 3. méthode des isohyètes
(Abdou, 1999)

Cette façon de procéder est préférable par rapport à la précédente, puisqu'elle permet de prendre en compte la connaissance de la pluie, en des points autres que ceux correspondant uniquement aux pluviomètres. Mais elle peut être plus longue, il faut passer par l'établissement des courbes de niveau (calcul automatique quasiment nécessaire), aussi elle doit être répétée pour chaque averse

Méthodes de pondération par la distance

Les méthodes de pondérations par la distance constituent un ensemble de techniques basées essentiellement sur une hypothèse d'homogénéité du paramètre étudié. Elles consistent à affecter des poids inégaux aux points de mesure en fonction de leurs proximités géographiques respectives par rapport au point à estimer

La valeur de P en un point devrait être très proche à celles des points voisins observées. L'estimateur P au point non mesuré, sera donc la moyenne des valeurs voisines. Cette moyenne est calculée de manière à donner plus de poids aux points géographiquement les plus proches. L'interpolation au point P de coordonnées (x, y) est donnée par l'expression :

$$P(x, y) = \sum W(d_i) P_i(x, y)$$

avec:

$P(x, y)$: point à estimer de coordonnées x, y

P_i : point voisin de coordonnées x_i, y_i

$\sum W(d_i) = 1$.

$W(d_i)$: fonction de pondération

d_i : distance entre le point à estimer et les points de mesure i .

L'inconvénient majeur des techniques de pondérations par la distance est dû au fait qu'on ne peut pas discriminer l'information redondante. Aussi, la pondération en fonction de la distance assigne un poids égal à tous les points situés à la même distance du point à estimer.

Méthode stochastique

La méthode de krigeage appartient à la famille des méthodes stochastiques. Ceci est dû au fait que la technique se base sur la notion des variables aléatoires régionalisées. L'interpolateur de krigeage est un interpolateur linéaire, sans biais, optimal dans le sens où il minimise la variance d'estimation. Il est aussi un interpolateur exact. Il nous permet de procéder à l'interpolation à partir de la connaissance d'une seule réalisation du processus aléatoire. En effet, on suppose alors que chaque réalisation particulière suffit à rendre compte de l'ensemble des réalisations éventuelles. L'inférence statistique (la reconstitution de la loi de la fonction aléatoire) à partir d'une réalisation unique est alors possible, en remplaçant les moyennes que l'on est normalement amené à faire sur l'ensemble des réalisations disponibles, par des moyennes spatiales sur l'unique réalisation. On doit pour cela introduire des hypothèses supplémentaires sur la fonction aléatoire. On introduit en particulier une hypothèse de stationnarité, qui suppose que le phénomène a une certaine homogénéité spatiale, de nature statistique, qui fait qu'il se répète lui-même en quelques sortes dans l'espace.

Avantages de la méthode de krigeage ou géostatistique

- La possibilité de ne pas se limiter aux méthodes d'interpolation plus ou moins arbitraires ;
- L'application d'un estimateur sans biais ;
- Détermination d'un estimateur optimal, c'est à dire variance minimale ;
- Quantification de la précision de l'estimation ;
- La prise en compte de la notion du support de l'information ;
- Permet d'éviter une erreur systématique (la surestimation ou la sous-estimation de la moyenne sur une surface ou dans un volume à partir des échantillons prélevés). Le système de krigeage ne fait intervenir que la structure et la configuration géométrique des données et du domaine à estimer, il ne dépend pas des valeurs expérimentales.
- L'utilisation du krigeage permet l'optimisation des réseaux de mesure ou d'une campagne d'échantillonnage.

Phases d'une étude géostatistique

Une étude géostatistique se compose de deux étapes essentielles : la phase d'identification structurale basée sur l'estimation et la modélisation du variogramme ou de la dérive, et la phase du krigeage qui est la phase d'interpolation proprement dite. Variogramme et krigeage constituent ainsi les deux outils fournis par la théorie des variables régionalisées et sont bien adaptés à l'étude de la variabilité spatio-temporelle des phénomènes naturels. Le premier synthétise d'une façon quantitative l'information sur la variabilité spatiale du paramètre d'un point à un autre du domaine. Le second permet l'estimation en prenant en compte l'information structurale synthétisée et donne une prédiction aux points non mesurés avec une précision connue.

Les équations du krigeage

Un aperçu sur la dérivation des équations du krigeage pour le cas de stationnarité est présenté ci-après. Pour beaucoup plus de détails sur les différentes méthodes de krigeage,

le lecteur est invité à consulter les références dont entre autre celle de Journel et Huijbregts (1978).

Notations :

On considère la pluie tombant sur une surface en une période donnée comme étant un processus aléatoire, représenté par une fonction aléatoire prenant ses valeurs dans un espace à deux dimensions.

$t=(x,y)$ est un point de cet espace

t_i un point de mesure de la pluie, $i=1 \dots n$ étant le nombre de points de mesure

Z la fonction aléatoire

$Z_i = Z(t_i)$ la variable aléatoire au point t_i

Z_{ik} une réalisation de la variable aléatoire Z_i

K la variable indexant les mesures successives de pluie (ou événements)

On estime $Z(t_0)$, en notant $Z^\wedge(t_0)$ la valeur estimée, comme fonction linéaire des valeurs connues

$$Z^\wedge(t_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z_k(t_i) \text{ où les } \lambda_i \text{ sont les inconnues : les poids à affecter à chaque mesure.}$$

On utilise alors l'hypothèse de stationnarité d'ordre 2 appliquée aux accroissements, c'est à dire l'hypothèse intrinsèque :

$E(Z(t+h)-Z(t))=0$ pour tout t , où $t+h$ est un point situé à la distance h de t .

$\text{Var}(Z(t+h)-Z(t))=2\gamma(h)$ où γ est le demi-variogramme, appelé plus fréquemment variogramme.

Dans le cas du krigeage ordinaire, la condition de non-biais impose la contrainte :

$$\sum_{i=1, N} \lambda_i = 1 \quad \text{où } N \text{ est le nombre de stations.}$$

La quantité à minimiser sous la contrainte de non biais est l'espérance de l'erreur quadratique :

$$E[(Z(t_0) - \sum_{i=1, N} \lambda_i Z(t_i))^2]$$

Cela nous amène à résoudre le système d'équations suivant :

$$\gamma(t_i, t_0) = \sum_j \lambda_j \gamma(t_i, t_j) + \mu \quad \text{pour tout } i.$$

$$\sum_{i=1, N} \lambda_i = 1$$

On met le système formé par ces deux équations (condition de non-biais et condition d'optimalité) sous forme matricielle, et on obtient :

$$\begin{bmatrix} \Gamma E \\ {}^tEO \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_0 \\ E_0 \end{bmatrix}$$

où E est un vecteur de n lignes identiquement égales à 1 dans le cas du krigeage ordinaire, E₀ est égal à 1,

Λ est le vecteur colonne des poids affectés à chaque point de mesures,

Γ est la matrice des valeurs du variogramme calculées pour chaque couple de points de mesure (t_i, t_j),

Γ₀ est le vecteur des valeurs du variogramme calculées entre le point à interpoler t₀ et le point de mesure t_j.

Pour calculer les valeurs moyennes sur des surfaces, il suffit de modifier légèrement le système matriciel précédent : on prend alors pour Γ₀ le vecteur constitué par la moyenne des valeurs du variogramme calculées pour les points de la surface considérée et la station t_j.

$$\gamma_{oj} = \frac{1}{S} \int_S \gamma(t, t_j) dt \quad t \in S \text{ où } S \text{ est la surface considérée}$$

Dans la pratique, les logiciels de krigeage utilisent une sous grille de calculs et ils calculent :

$$\gamma_{oj} = \frac{1}{nm} \sum_{l=1, nm} \gamma(t_l, t_j)$$

Où les t_l sont les points de la grille de calcul appartenant à la surface S, au nombre de nm.

Afin de mettre en œuvre l'estimation par krigeage, il est nécessaire de connaître la fonction du variogramme, caractérisant la structure spatiale du processus. Cette fonction se modélise à partir du variogramme expérimental :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{j=1, N(h)} [Z(t_j + h) - Z(t_j)]^2$$

où h est une classe d'accroissements et N(h) le nombre de points dans cette classe. Au variogramme expérimental est ajusté un modèle théorique de variogramme. Cet ajustement peut se faire par essai erreur ou par la méthode des moindres carrés.

Quelques caractéristiques du variogramme

Les caractéristiques importantes du variogramme sont relatives à son comportement à l'origine et à l'infini. Pour un processus stationnaire d'ordre deux, les caractéristiques du variogramme sont :

- *l'effet de pépité* : la valeur du variogramme à l'origine est toujours égale à zéro. Par contre, une discontinuité à l'origine peut exister qu'on appelle effet de pépité. Celle-ci provient soit des erreurs de mesure ou/et des variations de petites échelles non mesurable par le réseau de mesure.

- *la portée* : les valeurs du variogramme se stabilisent au delà d'une certaine distance. Cette distance est appelée portée. Elle correspond à la distance de décorrélation.

- *le palier* : c'est la valeur du variogramme correspondant à la portée.

Ces caractéristiques s'obtiennent à partir de l'ajustement du variogramme expérimental à un modèle théorique de variogramme. Les modèles théoriques de variogramme généralement considérés sont les suivants :

Modèles à palier

- 1) Sphérique

$$\gamma(h) = C_0 + (C - C_0) \cdot \left\{ \frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right\} \quad \text{si } h \leq a$$

$$\gamma(h) = C \quad \text{si } h \geq a$$

- 2) exponentiel

$$\gamma(h) = C_0 + (C - C_0) \cdot \left\{ 1 - \exp \frac{h}{a} \right\} \quad \text{le palier est atteint asymptotiquement.}$$

- 3) gaussien

$$\gamma(h) = C_0 + (C - C_0) \cdot \left\{ 1 - \exp \frac{h^2}{a^2} \right\} \quad \text{le palier est atteint asymptotiquement}$$

avec

C_0 : la pépite à l'origine

C : la valeur du palier

a : le paramètre de forme du variogramme

Modèles sans palier

- 4) modèle puissance

$$\gamma(h) = C_0 + (\alpha - C_0) \cdot h^\beta \quad \beta \in]0, 2[$$

- 5) modèle logarithmique

$$\gamma(h) = \ln(h) \quad \text{utilisable seulement si } h \geq 1$$

L'annexe présente une note technique montrant l'importance de connaître la méthodologie de mise en œuvre de la méthode du krigeage au risque d'obtenir des résultats aberrants.

Références

- Abdou, A., 1999 : Estimation des pluies par satellites : Calcul des grilles de pluie par krigeage. Stage AGRHYMET, Juillet-Août 1999.
- Amani, A., T. Lebel, J. Rousselle and J.D. taupin, 1996: Typology of rainfall fields to improve rainfall estimation in the Sahel by the area threshold method. *Water Resour. Res.*, 32, 2473-2487.
- Amani, A and T. Lebel, 1998: Relationship between point rainfall, average sampled rainfall and ground truth at the event scale in the Sahel. *Stochastic hydrology and Hydraulics*, 12(2): 141-153.
- Journel, A. G and C.I. Huijbregts, 1978: Mining geostatistics. Academic Press, 597pp.
- Laurent, H., T. Lebel, and J. Polcher, 1997: Rainfall variability in soudano-sahelian Africa studied from rain gauges, satellites and GCM. Proc. 13th Conf on hydrology of the 77th AMS annual meeting, Long Beach, 17-20.
- Lebel, T, A. Amani et J.D. Taupin, 1994: La pluie au Sahel: une variable rebelle à la régionalisation. *Journées hydrologiques*, Montpellier, 13-14 septembre 1994
- Lebel, T, A. Amani, F. Cazenave, J. Lecocq, J.D. taupin, E. Elguero, M. Greard, L. Le Barbe, H. Laurent, N. D'Amato et J. Robin, 1995: La distribution spatio-temporelle des pluies au Sahel: apports de l'expérience EPSAT-NIGER. *L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement*. IAHS Pub. No 238: 77-98.
- Lebel, T and A. Amani, 1999: Rainfall estimation in the Sahel: What is the ground truth ? *Journal of Applied Meteorology*, 38: 555-568.
- Lebel, T., J.D. taupin and N. D'Amato, 1997: Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 1. General rainfall conditions and Climatology. *Journal of Hydrology*, 188-189 (1997): 74-96.
- Le Barbé, L and T. Lebel, 1997: Rainfall climatology of the HAPEX-sahel region during the years 1950-1990. *Journal of Hydrology* 188-189 (1997): 43-73.
- Servat, E., J.E. Paturel, H. Lubes-Niel, Broukoumé, J.M. Masson, M. Travaglio et B. Marieu, 1999, De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue Sciences de l'Eau*, 12(2).
- Taupin, JD, Amani, A and T. Lebel, 1993: Small scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel. Exchange process at the land surface for a range of space and time scales. *IAHS Pub. No 212: 593-602.*

THEME II

TYPLOGIE DE L'IRRIGATION AU NIGER EVOLUTION SOCIO-ECONOMIQUE ET HYDRAULIQUE

Octobre 1999

ABDOU MOULAYE AHMED

ANPIP / Niger

INTRODUCTION

Suite à l'appel lancé par la Conférence Régionale de la FAO pour l'Afrique tenu en 1992 à Accra, le Bureau Régional de la FAO pour l'Afrique en collaboration avec les divisions spécialisées du siège propose aux Etats Africains un programme spécial de vulgarisation en irrigation en vue :

- de concentrer l'attention sur le besoin urgent de fournir des services d'appui essentiels aux agriculteurs pour l'irrigation et la conservation des eaux.
- d'identifier et évaluer des méthodes et approches susceptibles de promouvoir une agriculture irriguée durable et l'utilisation optimale de l'eau pour la production alimentaire.
- d'assister les pays membres pour la planification et l'introduction de services de vulgarisation efficaces en irrigation.

Ainsi, dans le cadre de la consultation technique qui sera organisée par la FAO en Décembre 1994, les Experts des 14 pays membres de la Sous-Région Ouest-Africaine ont été invités à présenter leurs contributions.

Sur la base du canevas de travail proposé par la FAO (voir annexe), un Ingénieur agronome et un Ingénieur du Génie Rural Expert en Management de l'Irrigation ont élaboré et présenté la contribution du Niger à travers le document suivant.

I/ AGRICULTURE IRRIGUÉE , TENDANCES ET PERFORMANCES

1.1. - Historique :

L'examen de la carte indiquant les zones agro-écologiques du Niger (Voire Annexe 1) montre que le Niger est un pays sahélien (1.267.000 km²) qui est subdivisé comme suit :

- zone soudanienne comprise entre les isohyètes 800 et 400 mm (région de savane, propice à l'agriculture et à l'élevage),
- zone soudano-sahélienne (de transition) comprise entre les isohyètes 400 et 300 mm (steppe arborée) ;
- zone sahélienne comprise entre les isohyètes 300 et 200mm (steppe herbeuse, zone pastorale permanente) ;
- zone saharienne en dessous de l'isohyète 200 mm.

La superficie désertique avoisinant 71 % du total, il en résulte que la bande climatique sahélienne qui se situe entre 200 et 800 mm ne couvre que 21 % du territoire national.

Le secteur de l'agriculture au Niger (productions animales, végétales, sylvicoles, piscicoles, etc ...) constitue l'activité économique principale du pays, car il occupe environ 90 % de la population (8 000

000 d'habitants) et participe à la formation du Produit Intérieur Brut (PIB) pour plus de 45 %. Les céréales de base (mil, sorgho) constituant l'essentiel de la production vivrière sont auto - consommées.

Elles sont cultivées sous le régime pluvial aléatoire avec des rendements faibles (< 1t/ha), sur des sols dont la fertilité diminue de plus en plus, faute d'amendements.

Il existait aussi (avant 1945) en bordure du fleuve, des cultures de décrue (riz, sorgho) sur des superficies réduites pour minimiser les risques d'inondation préjudiciables aux cultures qui pourraient être causés par la crue locale de Septembre et même la crue de saison sèche qui commence en Novembre.

Les besoins en céréales n'étant pas couverts, le Niger importe annuellement des quantités importantes de riz et de blé.

C'est pour cette raison que la Direction de l'Agriculture a conçu, depuis les années 50, un plan de création et de transformation d'aménagements.

Ces transformations avaient pour objectifs de maîtriser les amplitudes des crues du fleuve, et de permettre un accroissement des superficies irriguées (double culture du riz) et une amélioration des rendements. Il s'en suivrait alors une augmentation de la production nationale.

Le Niger compte maintenant environ 8 millions d'habitants avec un taux de croissance de 3,1 %. Tous les ans, il doit falloir nourrir plus de 248.000 bouches supplémentaires.

Il est alors facile de constater que sur la base de 250 kg de céréales par habitant et par an, il faut plus de 62.000 tonnes de vivres supplémentaires par an.

En superficie de riziculture moderne (casiers planés) sur la base de 6 T/an/ha, il faudra mettre en valeur quelques 17.220 ha en prenant 60 % comme rendement à l'usinage. Ce chiffre est très important compte tenu des maigres ressources du pays.

Toutefois, l'accroissement des superficies des cultures pluviales auquel il faut ajouter celui des autres cultures irriguées (blé, sorgho, maïs, niébé, etc ...) permettront tout en limitant le développement du riz irrigué (moins de 1.000 ha/an) de satisfaire les besoins alimentaires de la population nigérienne.

A l'heure actuelle, la superficie totale irriguée est de 78.720 ha, pour un potentiel national de 270.000 ha. Elle se répartit comme suit:

- > 13.000 ha d'aménagements modernes à maîtrise totale de l'eau,
- > 12.000 ha par submersion non contrôlée ;
- > 53.720 ha en contre saison (décrue, puits, forages, bas-fonds ...).

Nous rappelons enfin que la production du riz répond parfaitement aux objectifs de recherche de l'auto-suffisance alimentaire et d'accroissement des revenus monétaires des paysans visés à travers le plan quinquennal 1987-1991.

1.2. Typologie

En dehors du riz et du sorgho, les autres céréales (mil, maïs ...) sont cultivées en pluvial.

L'irrigation traditionnelle (riz et sorgho de décrues) s'est développée dans la vallée du fleuve Niger, dans la Komadoukou et dans les bas fonds et les mares à travers le pays.

- Groupe d'aménagement pour les céréales cultivées en submersion (riz, sorgho)

Les différents aménagements se différencient suivant l'absence ou la présence de trois éléments principaux :

- l'endiguement de la cuvette (avec ouvrages de prise et l'exhaure),
- l'équipement de pompage (équipement fixe ou mobile) ;
- l'aménagement intérieur de la cuvette en casiers planés (avec réseau secondaire et tertiaire d'irrigation et de drainage).

On peut ainsi définir quatre groupes d'aménagements rizicoles:

Groupe	A	B	C	D
Dénomination	Submersion naturelle	Submersion simple	Submersion contrôlée	Submersion artificielle
Dénomination commune (Niger)	Riziculture traditionnelle	Riziculture gravitaire	Riziculture en submersion contrôlée	Riziculture en casiers planés
Caractéristiques Techniques	Aucun ouvrage ou digue submersible	Endiguement	Endiguement + équipement de pompage	Endiguement + équipement de pompage + aménagement intérieur en casiers planés
Périmètre type	Vallée du Niger (lit majeur)	FIRGOUN	KOUTOUKALE	SAGA

- Sous groupes d'aménagements

a) Sous groupes A₁ et A₂

A₁ - Riziculture traditionnelle

A₂ - Aménagement d'une petite cuvette avec digue submersible et ouvrage de prise ("ouvrage Grille à poisson").

b) Sous-groupes B₁ et B₂

B₁ - Aménagement d'une cuvette avec digue insubmersible et ouvrages (prise et exhaure)

Dénomination : submersion simple

Exemple : Firgoun 1945

B₂ - A partir du cas précédent, aménagement intérieur partiel (le sol n'est pas plané), au moyen de diguettes intermédiaires réalisées suivant les courbes de niveau, assurant des plans d'eau étagés dont la profondeur varie de 20 à 70 cm. Des canaux principaux d'irrigation et de drainage relient les différentes zones submergées (terrasses) aux ouvrages de prise et d'exhaure.

Dénomination : Submersion simple en terrasses

Exemple : 1er modèle amélioré de Firgoun dans l'étude Carlo Lotti.

c) Sous groupe C₁ et C₂

- C₁ - Aménagement d'une cuvette avec digue insubmersible et ouvrages, ainsi qu'un équipement de pompage d'appoint (éventuellement aménagement d'une pépinière et des canaux permettant son irrigation).

Dénomination : Submersion contrôlée

Exemple : Koutoukalé 1964

- C₂ - A partir du cas précédent, aménagement intérieur partiel (le sol n'est pas plané) au moyen de diguettes intermédiaires réalisées suivant les courbes de niveau, assurant des plans d'eau étagés dont la profondeur varie de 20 à 70 cm. Des canaux principaux d'irrigation et de drainage relient les différentes zones submergées (terrasses) aux ouvrages de prises et exhaure.

Dénomination : Submersion contrôlée en terrasses.

Exemple : 2^{ème} modèle amélioré de Koutoukalé - Karma

d) Sous groupes D₁ et D₂

- D₁ - Aménagement d'une cuvette en casiers planés avec réseau complet d'irrigation et de drainage en canaux classiques (revêtus ou non)

Dénomination : Submersion artificielle

Exemple : Saga et Daïkeina actuels

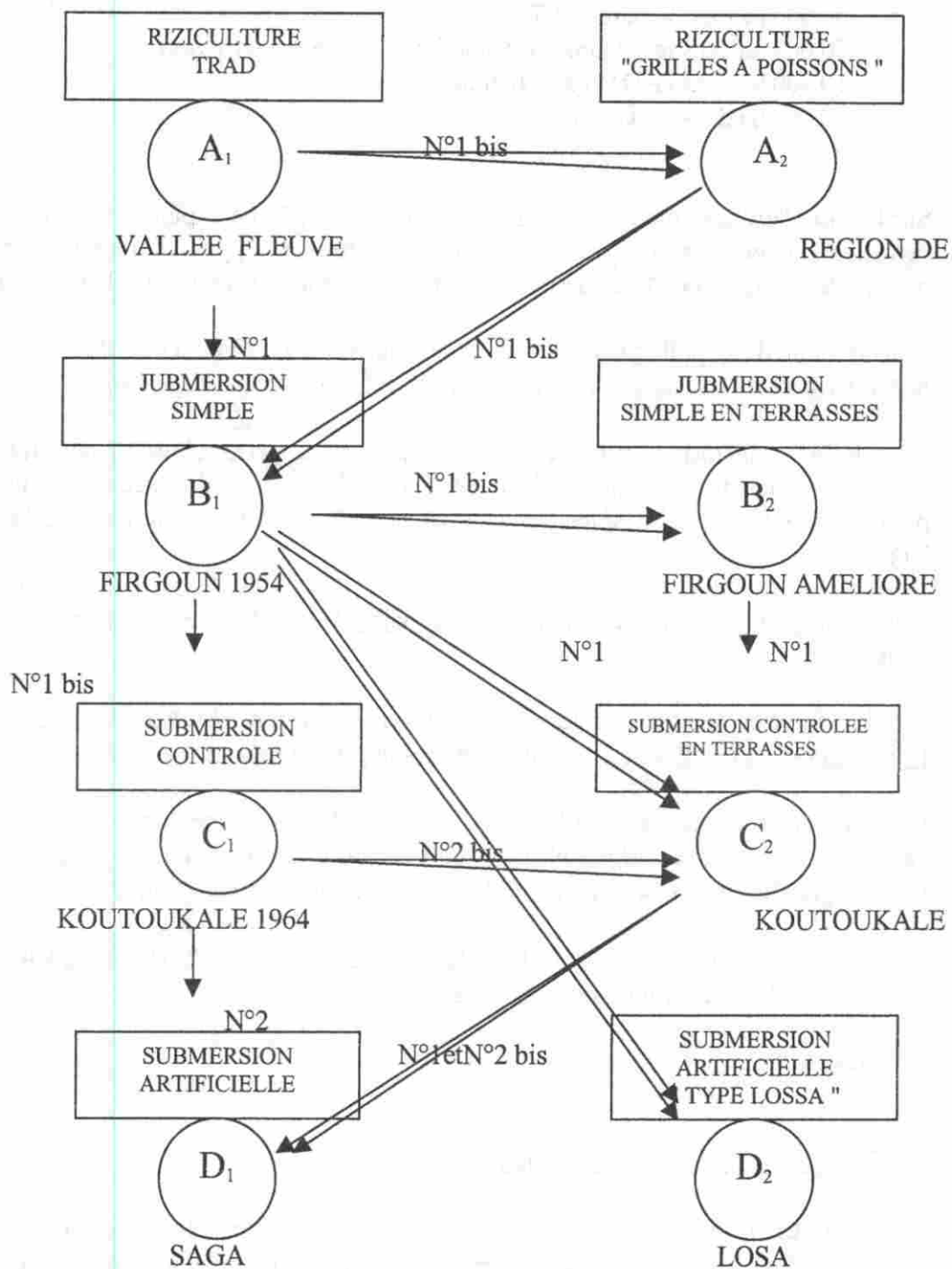
- D₂ - Aménagement identique au précédent, mais les canaux d'irrigation sont remplacés par des conduites souterraines permettant d'assurer une distribution de l'eau sous basse pression jusqu'au niveau des parcelles. Le réseau de drainage est classique.

Dénomination : Casiers planés type Lossa

Exemple : Lossa -

TILLABERY

1972



N°1

Passage direct

N°1 bis

Passage par étape

- 140 000 ha dans la vallée du Niger ;
- 60 000 ha dans le lit du lac Tchad ;
- 50 000 ha dans les goulbis de Maradi (ressources souterraines)
- 10 000 ha dans l'ADM (petit barrages)
- 10 000 ha dans les koramas

Sur la base d'un rendement moyen de 5 à 6 t/ha, les 7 524 ha exploités en double cultures annuelles permettent de produire quelques 70 000 tonnes environ (en supposant une surface emblavée de 14 000 ha) soit de l'ordre de 40 % des besoins nationaux qui sont chiffrés à 175 000 tonnes environ.

Dans le cadre de sa politique d'aide aux populations rurales, l'Etat a créé des centres de fabrication de matériel agricole (charrettes, outils aratoires etc...) ; un centre par département.

Dans les aménagements où les terres sont plus lourdes qu'en culture dunaire (terre de terrasses, de plaine ou de cuvettes avec un fort pourcentage d'argile), la culture attelée avec la charrue s'est imposée par nécessité. Sur tous les aménagements, la culture attelée intervient pour les labours à raison de 5 ha/j.

L'unité de culture attelée est tirée par une paire de bœufs. C'est la première forme d'intégration agriculture, élevage.

Aussi faudrait-il ajouter que les résidus des récoltes sont vendus à de tiers pour servir soit à l'alimentation du bétail, soit à confectionner des matelas ruraux.

Pour la plupart des cuvettes en bordure du fleuve Niger, les bras morts devant servir de collecteurs pour les colatures principales sont aussi utilisés pour la production de poissons. Il en est de même pour les grandes dépressions qui ne sont ni aménageables, ni totalement drainables.

1.3. Evolution des itinéraires techniques (de la submersion naturelle à la maîtrise totale de l'eau) : Contraintes - Performances - Tendances.

1.3.1 Les causes

- Evolution climatique et hydrologique

- ◆ La riziculture de décrue se faisait habituellement de Juillet à Décembre. Après les premières pluies significatives (≥ 10 mm) le terrain est labouré et le semis sont effectués en Juillet et la récolte intervenait en Novembre-Décembre.

Toutefois, devons-nous signaler que le maximum secondaire intervenant en Septembre, principalement occasionné par les gros affluents locaux comme la Sirba, menace parfois les récoltes, en dehors de tout contrôle possible sur la hauteur d'eau admise dans la cuvette.

De plus la préparation du terrain (labour) est tributaire des premières pluies significatives (≥ 10 mm) devant servir à humecter le sol pour faciliter cette opération.

- ◆ La topographie étant encaissée et le marnage du fleuve en baisse continue, on ne dispose plus de vastes zones plates facilement irrigables. Du fait de cette baisse, quelque fois, seulement 30 % des terres étaient inondables ; et il fallait procéder à un pompage d'appoint.

pour atteindre les terres hautes. Par ailleurs, la baisse de l'amplitude des crues du fleuve (voir hydro-gramme du fleuve Niger Annexe III) ne permettant ni une inondation du maximum de terres, ni un temps et une hauteur d'eau suffisants pour permettre la maturation du riz, aucune programmation des surfaces à irriguer n'est possible ; ce qui est inadapté à toute politique nationale de commercialisation

- Evolution socio-économique

- ◆ Les rendements obtenus en riziculture traditionnelle (sans endiguement) ne dépasse guère 800 kg/ha et, le retenu tiré de cette activité était estimé à 12 800 F actualisé à 27 695 FCFA. La valeur totale brute de la production (mil, sorgho) d'une famille moyenne de 8 personnes était estimée à 60 000 F/CFA. Il en résulte que le revenu par personne et par an est d'environ 11 000 F. A ce revenu très réduit s'ajoute de petites entrées provenant du travail fourni pour de tiers et des retombées de l'immigration d'un membre de la famille. Il faut remarquer que la plus grande partie des productions est auto-consommée et seulement une petite partie est vendue au marché afin d'obtenir l'argent nécessaire à l'achat de denrées alimentaires qui ne sont pas produites sur place (sel, sucre, huile) et du peu de vêtements nécessaires.

Un tel bilan de la famille moyenne justifie les conditions de vie très modestes qui poussent les jeunes à l'immigration.

- * De même pour le périmètre irrigué de Saga le passage de l'irrigation traditionnelle à une submersion contrôlée avec pompage du type C₁ fait passer le revenu net/ha de 27 695 F à 113 100 F, ce qui permet d'accroître les revenus monétaires des paysans et donc d'augmenter leur niveau de vie.

1.3.2 Les choix techniques (mise en évidence l'influence de la crue du Niger et du contexte socio-économique)

1) Solutions d'origines

La riziculture traditionnelle du type A₁ s'est développée dans la vallée du fleuve Niger. L'appréciation des superficies reste très difficile à cause du manque de statistiques fiables. Très souvent, ce riz est auto-consommé, mais dans tous les cas sa diffusion est très limitée sur le plan de la commercialisation.

Elles sont estimées à 22 000 ha, mais on constate une nette régression depuis les années 1976.

Les raisons d'une telle régression sont les suivantes :

- Les paysans producteurs restent tributaires de l'amplitude des crues du fleuve dont la baisse engendre une réduction des superficies. Cette baisse ne permet pas d'autre part une hauteur d'eau et un temps suffisant pour garantir la maturation du riz.
- En cas de fortes crues du fleuve, aucune maîtrise des hauteurs d'eau admises dans la cuvette n'est possible ; l'on enregistre des pertes importantes de plants qui sont totalement noyés.
- L'inévitable intrusion de poissons rizophages provoquant d'énormes dégâts au début de la croissance des jeunes plants (près de 80 % de la production potentielle).

- La seule campagne possible s'effectue pendant la phase de "la hausse des crues", c'est à dire en saison d'hivernage. Les semis s'effectuent en Juillet après les premières pluies significatives (≥ 10 mm facilitant le labour) et la récolte intervient entre Décembre-Janvier). La crue locale de Septembre et la crue soudanienne qui commence en Novembre sont gênantes : l'une pour la culture, l'autre pour la récolte pouvant même parfois la détruire.
- Les superficies marginales et les faibles rendements obtenus (800 kg/ha) ne permettent pas aux paysans des revenus monétaires importants. Le revenu net / ha est de l'ordre de 27 695 FCFA.

Pour les raisons ci-dessus énumérées, la nécessité de passer à la submersion naturelle "du type A₂" encore appelée type "Grille à poisson" s'était faite ressentir dans les années 1934 (cas du périmètre de Koutoukalé) dans la vallée du fleuve Niger.

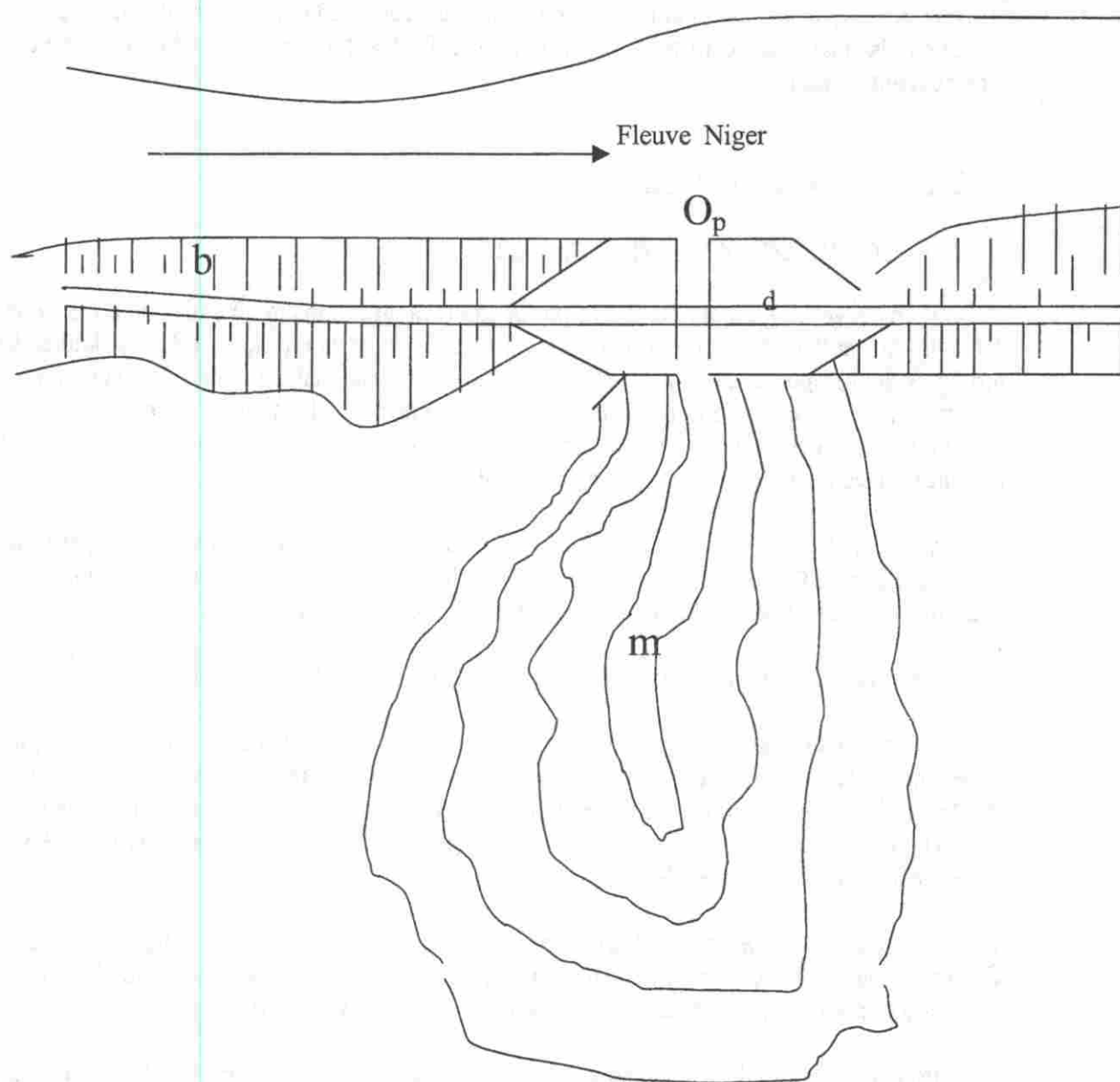
Il s'agit, grâce à la réalisation d'une digue de retarder l'inondation de la cuvette (en Septembre) de façon que les cultures normales d'hivernage puissent être réalisées. De plus, la mise en place d'une vanne munie d'une "Grille à poissons" permet de se prémunir de poissons rizophages et de régler les hauteurs d'eau admises dans la cuvette jusqu'à la limite de la hauteur de la digue. La digue est annuellement submergée par les eaux, ce qui nécessite un entretien permanent et coûteux (tous les 3 ans). Elle est aussi, souvent détruite par les hippopotames.

La petite digue est réalisée en matériaux compactés avec des talus de 2/1 à 3/1, sa largeur est petite 50 cm et sa longueur varie d'une cinquantaine de mètres (50 m) à 6 km. C'est dans le corps de la digue que l'on installe l'ouvrage de contrôle constitué de la vanne et de la "grille à poissons". Les techniques culturales appliquées sont plus avancées que dans le cas de la riziculture traditionnelle. La préparation du sol à la pioche ou à la culture attelée se fait après les premières pluies. Les semis sont faits à la volée sur le terrain labouré en raison de 100 kg à 150 kg par ha. Ils sont effectués graduellement en bandes parallèles aux courbes de niveaux des parties basses vers les parties hautes.

Dans les zones profondes 1.50 m, on utilise des variétés comme MALA et De Gaulle locale. Dans les zones les plus hautes, on peut utiliser des variétés sélectionnées comme D52 37 et De Gaulle améliorée. Après les semailles, on sarcle et on fait répandre l'engrais (urée) à la dose de 150 kg/ha. Les rendements varient de 1.5 T à 2.5 T.

Le revenu net/ha est d'environ 106 000 F/CFA. Le schéma général des cuvettes du type "Grille à poissons" ou encore type A₂ (voire typologie) est donnée ci-dessous :

*Schema Général des cuvettes
du type "Grille à poisson"*



b = bourrelet de berge

d = digue submersible

Op = ouvrage de prise + grille à poisson

m = marigot

La tentative de la Direction de l'Agriculture de pratiquer une campagne en hivernage, et une en saison sèche, sur les mêmes types de périmètres, s'est soldée par un échec en 1957 ; ce qui nous ramène à la conception de départ.

Il en découle, que pour augmenter sensiblement la production annuelle et par suite les revenus des paysans, l'on devra passer au système du type "B₁" ou encore appelé "type grands périmètres" qui utilisent des digues insubmersibles même pendant la crue soudanienne (en plus des vannes munies de grilles à poissons) pour accroître les superficies emblavées. La campagne s'étend de Novembre à Avril (cas de Koutoukalé).

2) Evolution et situation actuelle

2.1. Les types dits "Grands périmètres" ou "types B₁"

Ce sont des cuvettes qui sont protégées par de grandes digues insubmersibles de 2 à 3 m de haut, talus 2/1 à 3/1 et une largeur en crête de plus de 3 m permettant la circulation des véhicules. Les surfaces protégées sont importantes. Le système hydraulique consiste dans la réalisation d'une ouverture munie de vanne placée haut à l'amont de la cuvette pour permettre l'entrée de l'eau, et placée bas, à l'aval permettant ainsi l'évacuation de l'eau. On a alors une submersion contrôlée. Les digues sont calées sur la fréquence centennale, avec une revanche de 40 cm.

Ces types d'aménagements, à cause de leurs grandes superficies sont caractérisées par plusieurs zones topographiques qu'il convient de distinguer pour le choix des variétés. Les techniques culturales sont identiques à celles du cas précédent et les variétés utilisées sont les mêmes.

Le rendement varie de 2 à 3 tonnes, et le revenu net par ha est de 106.000 F/CFA.

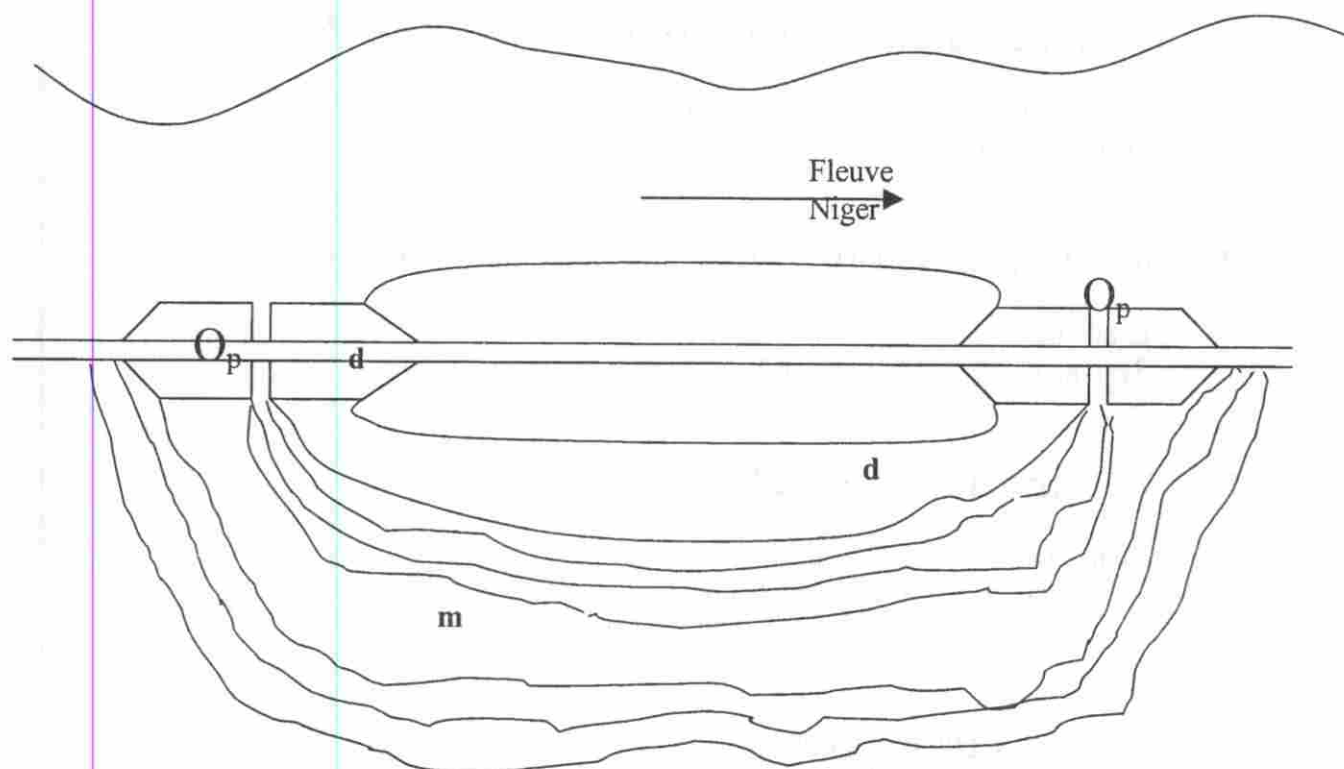
L'absence totale de planage (la cuvette étant encaissée) conduit cependant à une perte de plants dans les zones profondes ; ce qui a conduit à une autre forme de submersion qui consistait en plus de la digue insubmersible et des ouvrages de prise et de vidange, à aménager la cuvette en terrasse (le sol n'est pas plané) comme dans le cas "B₂" (exemple : cas de Firgoun). Le rendement est d'environ 3.5 Tonnes et le revenu net par ha de 161.000 F/CFA.

Toutefois, dans le cas B₁ et B₂, il arrive que des superficies importantes et parfois même très fertiles, situées en haute toposéquence, ne soient pas submersibles par la crue ; ce qui justifie la nécessité d'un pompage d'appoint (cas de Koutoukalé 1964). On aboutit ainsi au cas C₁ et C₂.

Dans le souci d'économiser les tranches d'eau situées au dessus de 20 cm dans les casiers en terrasses et de pouvoir utiliser des variétés sélectionnées à très hauts rendements telles IR 15, IR 22, IR 8, BG 902, on est passé à l'irrigation à maîtrise totale de l'eau avec des "casiers planés" : il s'agit des sous-groupes D₁ et D₂ annoncés dans la typologie.

Les rendements observés varie de 5 à 7 Tonnes par ha. Le revenu net est estimé à 226.000 F/CFA.

*Schéma Général des cuvettes
du type "Grands périmètres"*



d = digue

b = bourrelet de berge

m = marigot

O_p = ouvrage de prise + grille à poisson

1.4. Performance et limites de l'irrigation à maîtrise totale de l'eau

La politique de transformation des aménagements entreprise au Niger a permis d'accroître graduellement les rendements et revenus des paysans de la manière suivante :

1) Aménagement traditionnelle type A1

Rendement = 800 Kg/ha
Revenu net/ha = 27695 FCFA

2) Aménagement type A2 ou "Grille à poisson" avec digue submersible

Rendement = 1,5 à 2.5 t/ha
Revenu net/ha = 106 000 FCFA

3) Riziculture type dit "Grands Périmètres" ou type B1 avec digue insubmersible

Rendement = 2 à 3 t/ha
Revenu net/ha = 106 000 FCFA

4) Aménagement type B2 = B1 + "casiers planés"

Rendement = 3,5 t/ha
Revenu net/ha = { 113 100 FCFA pour B1
 { 161 076 FCFA pour B2

5) Aménagement du type C1 ou C2 :

Rendement = 4 t/ha
Revenu net/ha = { 113 100 FCFA pour C1
 { 161 076 FCFA pour C2

6) Aménagement type D1 ou D2 (maîtrise totale de l'eau)

Rendement = 5 à 7 t/ha
Revenu net/ha = 226 000 FCFA/campagne

Toutefois, pour les aménagements de type A à C, le coefficient de capital (rapport entre le coût de l'hectare aménagé et le revenu net à l'hectare) est ≤ 3 , tandis qu'il est supérieur à 20 pour les aménagements à maîtrise totale de l'eau :

Il en résulte que les aménagements du type A à C sont avantageux pour l'utilité publique, tandis que ceux à "maîtrise totale de l'eau" exige un investissement tellement exorbitant (6 à 8 millions FCFA à

l'hectare) suivant que l'on y inclut le coût de l'assistance technique et des études (préalables) ce qui hypothèque la rentabilité de ces aménagements du point de vue macro-économique.

Il est alors envisageable de faire amortir les aménagements du type A à C, tandis que pour ceux à "maîtrise de l'eau", l'Etat a fait obligation aux coopératives de supporter seulement l'amortissement des stations de pompage et l'entretien des périmètres.

Ces investissements lourds devaient théoriquement permettre une exploitation illimitée de ces périmètres. Or, toutes les coopératives ont à un moment ou l'autre cessé leurs activités et ont fait l'objet d'une réhabilitation lourde ayant nécessité l'appui de sources de financement extérieures à la coopérative et à l'Etat.

La fréquence moyenne de ces réhabilitations est actuellement d'environ une fois tous les 15 ans (voir tableau) alors que les calculs de TIR se basent sur un minimum de 25 ans, quant à leur coût, il est compris entre 640 000 et 1 200 000 FCFA/ha

A cela s'ajoute le faible taux de recouvrement des redevances au niveau de la quasi-totalité des coopératives (40 %).

Si les aspects agronomiques ont bien été assimilés par les coopératives, il n'en demeure pas moins que la gestion de l'eau reste sujette à des améliorations car le coût de l'eau représente 40 à 60 % des charges d'exploitations.

De plus l'autogestion intervenue en 1982 s'est faite sans mesures d'accompagnement (appui en gestion hydraulique et gestion financière)

Les aspects négatifs suivants sont constatés :

- Systèmes incapables de se reproduire ;
- Gestion anarchique des réseaux ;
- Méconnaissance générale du fonctionnement des réseaux et des contraintes liés à l'irrigation ;
- Mauvais entretien du réseau ;
- Dégradation rapide des systèmes d'irrigation ;
- Caractère imprécis du droit foncier ;
- Consommation de forces motrices .

Fréquence de réhabilitation des AHA

AHA	Année de réalisation	Année de réhabilitation	Coût Millions FCFA		Nombre d'années de fonctionnement
Karma	71	83	172	(!)	12
Saadia aval	73	85	127		12
N'Dounga2	77	88	505	(*)	11
N'Dounga2	76	88	420	(*)	12
Tiaguiriré	84				
Saadia amont	73	88	213	(*)	15
Sébéri	80	88	474	(*)	8
Saga	67	88	482	(*)	21
Karaïgorou	64	84	170	(!)	20
Kirkissoye	64	87	290	(*)	23
Namardé Goungou	82				
Liboré	73	88	512	(*)	15
Say1 (1)	80				
Say2	88				
Djamballa	80			(?)	
Namari-Goungou	80	88	5470	(?)	8
Kokomani	70	88	120	(*)	18
Toula (2)	74	91		(!)	17
Daibéri	85				
Lossa	70	88	182	(*)	18
Daïkaina	64	87	198	(*)	23
Sona	70	87	181	(*)	17
Yelwani	84				
Koutoukalé(2)	81	91		(!)	10

NB :

- (1) Ce périmètre a nécessité l'intervention constante de la coopération Belge.
- (2) Prévu au programme Grande Irrigation
- (*) Projet "Rehabilitation" : BM, CCCE, KFW
- (!) Financement Grande Irrigation
- (?) Ce coût comprend la réalisation de Djamballa et la réhabilitation de Namari-Goungou.

Toutefois devons-nous signaler que les performances actuellement constatées en termes de production sont les fruits d'efforts soutenus de la part de l'Etat et des bailleurs de fonds.

En conclusion, il nous semble indispensable de réorienter la conception en concertation avec les producteurs tout en recherchant des systèmes intermédiaires qui soit à la fois avantageux pour les paysans (accroissement de leurs revenus) et pour l'Etat (amortissement).

THEME III
RESISTANCE DES PLANTES A LA SECHERESSE

Octobre 1999

Dr. Amadou Moustapha
DS/INRAN
Niamey

I. RAPPEL DE QUELQUES DEFINITIONS

1.1. DEFINITIONS DE LA SECHERESSE

La difficulté liée à la définition exacte de la sécheresse date de plusieurs siècles. D'après Heathcote 1973 cité par Sivakumar 1991, Il y a 3000 ans avant J.-C., on faisait déjà mention de la sécheresse dans la première légende historique connue : l'épopée de Gilgamesh. En Chine, les écrits sur la sécheresse remontent au moins à l'an 206 avant J.-C. En fait, les conséquences de la sécheresse sont plus facilement compréhensibles. Phénomène naturel, la sécheresse peut aboutir à des effets désastreux, souvent amplifiés en raison d'erreurs commises par l'homme dans la gestion de son environnement (Dorize, 1990).

Le terme sécheresse revêt divers aspects ou évoque des notions différentes selon le degré et les types de conséquences et, comme l'a écrit Heathcote (1973), il y a probablement autant de définitions de la sécheresse qu'il y a d'utilisateurs d'eau. Cependant, la notion du déficit hydrique, commune à toutes les définitions, peut être retenue comme critère d'analyse.

La cause première de la sécheresse réside dans une déficience pluviométrique plus ou moins accusée. C'est donc une anomalie météorologique qui ne s'identifie que par référence à une norme climatologique reposant, par convention, sur trois décennies consécutives d'observations. L'écart à la moyenne dégagé fournit une indication intéressante qui permet de fixer l'intensité de la sécheresse en fonction de sa durée. Ainsi, selon le dictionnaire encyclopédique d'Agrométéorologie, la sécheresse est un déficit hydrique par rapport à un état normal ou maximal, elle peut se référer au climat (déficit de précipitations par rapport à la valeur normale des précipitations durant la période considérée), au sol (déficit d'humidité par rapport à la capacité au champ, ou à la plante (déficit de saturation par rapport à la teneur en eau, à la turgescence).

L'effet de la sécheresse dépend de sa durée et de son intensité, c'est à dire des conditions climatiques, mais aussi des réserves en eau du sol et de la nature et du stade de développement de la plante qui la subit. Une sécheresse même modérée peut être néfaste si elle intervient au moment de la floraison. Par contre, une sécheresse modérée précoce, en début de période végétative, peut faciliter ou être nécessaire à l'induction florale ; elle peut permettre un développement plus important des racines ce qui accroît la résistance aux sécheresses ultérieures éventuelles, et permet une meilleure exploitation des réserves hydriques et minérales du sol.

De même, les périodes d'installation et de fin de la sécheresse sont souvent difficiles à préciser, par manque d'une distinction nette entre période sèche et période de sécheresse (Glantz 1987, cité par Sivakumar 1991).

1.2. FONCTIONNEMENT DES PLANTES

Les végétaux supérieurs sont des organismes dits photolithotrophes, qui ont besoin pour leurs synthèses organiques d'une source d'énergie (l'énergie lumineuse), d'une source de carbone minéral (le CO₂) et d'un donneur d'électrons (l'eau). Ils se développent et se

maintiennent dans deux milieux différents : la rhizosphère et l'atmosphère. De la rhizosphère, ils tirent l'eau et les éléments minéraux dissous essentiels à leur métabolisme, de l'atmosphère, ils tirent l'énergie et le CO₂ nécessaires à leurs synthèses organiques (schéma 1)

Trois phases essentielles caractérisent le développement et la croissance de ces végétaux : La phase de germination-levée, la phase végétative et la phase reproductrice.

La phase de germination-levée est sous la dépendance de facteurs intrinsèques à la graine : - poids du grain et sa composition qui déterminent la faculté germinative et l'aptitude de cette graine à « biberonner » la future plante jusqu'à son sevrage -; et de facteurs extrinsèques à cette graine : - eau, oxygène, températures et éléments protecteurs (fongicides, insecticides) -.

La phase végétative se caractérise par la régulation entre croissance et développement, deux phénomènes intimement liés. La croissance étant une évolution quantitative en poids et en volume, alors que le développement se caractérise par une évolution qualitative avec l'induction d'organes nouveaux. La croissance nécessite le maintien des flux de masse (CO₂, H₂O) à travers le continuum sol-plante-atmosphère. Flux hydriques et flux carbonés sont entretenus par des différences de potentiel et sont couplés au niveau des feuilles, qui jouent le double rôle d'organe assimilateur et de surface transpirante. Le développement est souvent lié au froid, à une photopériode, à un niveau suffisant d'énergie ou à une température optimale.

La phase reproductrice conditionne le niveau de rendement d'une plante et est sous la dépendance de trois types de facteurs : ceux liés au milieu (pédo-climat), ceux relatifs aux capteurs (racines et feuilles) et à leur état de fonctionnement, et ceux concernant la régulation et l'adaptation par la plante entre les demandes minérales / énergétique et l'offre pour éviter tout engorgement ou pénurie.

Naturellement, des interactions existent entre ces trois types de régulation. Si la vitesse de croissance chute, c'est qu'un facteur limitant (minéraux, lumière, température, eau) s'exprime. L'activité des capteurs se régule en fonction de l'offre maximale disponible (loi du facteur limitant) et un nouvel équilibre moins performant que le premier s'établit. Idem dans l'autre sens lorsque ce facteur limitant est levé.

Remarquons toutefois, que le stockage dans le grain et les tiges en particulier est irréversible. L'analyse de la situation des plantes et de leur environnement, permet de visualiser d'éventuels dysfonctionnements.

1.3. ROLE ET IMPORTANCE DE L'EAU

L'eau est un composé essentiel de la plante, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. Elle représente 80 à 90 % du poids frais de la majorité des plantes herbacées. Dans les cellules matures (cellules du parenchyme foliaire, cellules des tiges, cellules racinaires) elle est essentiellement contenue dans les vacuoles où elle est retenue par des forces osmotiques. L'état hydrique de la plante, qui peut être caractérisé par la teneur en eau ou le potentiel hydrique des tissus foliaires, influence un certain nombre de processus physiologiques :

- la croissance cellulaire ne peut être assurée que si le potentiel hydrique est supérieur à un potentiel hydrique critique ;
- Les mécanismes d'ouverture et de fermeture stomatique sont directement liés à la teneur en eau dans la plante, précisément à la turgescence des cellules stomatiques.

Pour une graine, son gonflement et sa germination sont directement liés à sa capacité à être en contact continu avec de l'eau, ceci explique, en partie, la nécessité de rappuyer le sol sous la graine pour avoir une levée homogène.

L'eau distribuée en continue dans la plante joue le rôle de solvant (milieu de transport de tous les composés minéraux et organiques de la plante) et le rôle de réactant. Comme agent d'hydrolyse, l'eau participe activement aux réactions du métabolisme et en particulier aux réactions photosynthétiques. En effet, la photolyse de l'eau est le point de départ des réactions lumineuses de la photosynthèse et à ce niveau s'effectue un premier couplage essentiel entre flux hydrique et flux carbonés.

1.4. LA RESISTANCE A LA SECHERESSE

En biologie, la résistance est une propriété que possède un organisme de s'adapter à un facteur climatique, à un parasite ou à un produit toxique (par exemple, résistance à la chaleur, au gel, à la sécheresse, à un herbicide).

En physique, la résistance est un paramètre qui figure dans les équations de transfert de gaz, de liquide ou de chaleur exprimant le flux en fonction d'une différence de concentration, de potentiel hydrique ou de température.

A l'instar de la loi d'Ohm en électricité, qui permet de définir la résistance R comme le quotient d'une différence de potentiel électrique par une intensité ($R = \Delta V/I$), la résistance au transfert d'un gaz dans l'air libre ou dans un matériaux poreux est le quotient de la différence de concentration ΔC entre deux niveaux par le flux ϕ : $R = \Delta C/\phi$.

De même, la résistance au transfert d'eau liquide dans le sol ou dans le continuum sol-plante-atmosphère est le quotient de la différence de potentiel hydrique total $\Delta \Psi T$ entre deux niveaux par le fluide liquide ϕ : $R = \Delta \Psi T/\phi$.

La résistance au flux de chaleur sera, de la même façon, le quotient de l'écart de température ΔT par le flux de chaleur Q : $R = \Delta T/Q$.

Pour la résistance au transfert gazeux, on a souligné par ailleurs l'importance sur le processus d'évaporation des résistances aux flux de vapeur d'eau, en particulier de :

- la résistance stomatique (qui augmente avec le degré des fermeture des stomates)

- la résistance de la couche superficielle du sol lorsqu'elle est desséchée (résistance qui augmente avec l'épaisseur de cette couche et avec le tassement du sol).

En Bioclimatologie, on a l'habitude de considérer l'inverse de la résistance qui représente la conductance ($C = 1/R$). Ainsi, la conductance stomatique est l'inverse de la résistance stomatique.

Si la notion de résistance évoque l'adaptation d'un organisme à un facteur ou le frein opposé par un milieu à un transfert de liquide de gaz ou de solide, et que la sécheresse fait mention de déficit de hydrique, la notion de résistance à la sécheresse d'une plante peut être comprise comme la capacité de cette plante à supporter un stress hydrique. En fait, le phénomène est beaucoup plus complexe. Par exemple, La résistance du mil à la sécheresse comporte plusieurs composantes :

- génétiques, qui sont le produit de l'évolution des populations dans des zones agroclimatiques différentes, ainsi que des échanges de gènes entre plantes cultivées sélectionnées par l'homme et plantes spontanées soumises aux pressions de la sélection naturelle ;
- morpho-phénologique, liée au développement asynchrone des talles et à l'importance de la biomasse aérienne ;
- physiologique, liées aux différents mécanismes contrôlant les flux d'eau et de carbone au niveau de la surface foliaire et de la plante entière.

Des interactions lient ces différentes composantes : le stade phénologique de la floraison conditionne l'étalement des flux polliniques, et donc des échanges de gènes entre individus ; l'allocation du carbone entre les organes détermine l'effort reproductif, et donc le rendement en grains ; etc.

Par ailleurs, les relations entre physiologie et résistance à la sécheresse changent avec les conditions du milieu et l'état de développement des plantes. La notion de résistance variétale à la sécheresse doit être relativisée. Pour le mil ou tout autre culture vivrière, la résistance variétale à la sécheresse devrait traduire une caractéristique fondamentale du matériel quant à la stabilité de sa production face au stress hydrique.

Par exemple, deux essais conduits séparément à l'ICRISAT et à l'IRI (Do et al. 19..) sur les mêmes variétés soumises à un stress terminal, ont abouti à une classification inverse en fonction des caractéristiques du stress.

- Dans l'essai ICRISAT de contre-saison chaude 1988, où le stress hydrique était de forte intensité (haute densité de peuplement, ETP 7 mm/j, température moyenne maximum de 40°C) et d'une durée de 30 j, le classement était le suivant :

ICMVIS 86330 >> HKP – ICMVIS 85327

«résistant»

« sensible »

- Dans l'essai IRI de contre saison froide 1988/89, où le stress hydrique était d'intensité moyenne (densité moyenne, ETP de 5 mm/j, températures moyennes maximum de 33 °C) mais d'une durée de 50 j, le classement est inversé :

Cette contradiction démontre la relativité de la notion de résistance variétale à la sécheresse précédemment évoquée. En fait, une certaine ambiguïté peut provenir d'une confusion entre la résistance à la sécheresse en terme de rendement et la résistance à la déshydratation proprement dite, laquelle serait intrinsèque aux variétés. Cette dernière constitue une aptitude du matériel à tolérer une déshydratation partielle de ses tissus, indépendamment de toute considération sur la production finale.

La résistance agronomique à la sécheresse est par contre la conséquence sur le rendement final du comportement physiologique de la variété face à des conditions de stress hydriques données (positionnement dans le cycle, intensité, durée).

II. LES GRANDEURS DE REFERENCE UTILISABLES DANS L'ETUDE DES MECANISMES DE RESISTANCE DES PLANTES A LA SECHERESSE

Les recherches concernant l'alimentation en eau des cultures et ses conséquences sur la croissance ou le rendement requièrent la détermination de 2 types de grandeurs : Un premier type exprimant l'état hydrique de la plante et un second type exprimant les conditions d'alimentation hydrique de la plante (relatives au milieu ou au végétal lui même).

2.1. LES GRANDEURS EXPRIMANTS L'ETAT HYDRIQUE DE LA PLANTE

2.1.1. Les grandeurs liées à la teneur en eau du végétal

La teneur en eau (masse d'eau rapportée à l'unité de masse de matière sèche) constitue une référence incommode, sa gamme de variation étant éminemment variable d'un organe à l'autre. Aussi, préfère-t-on retenir soit la teneur en eau relative RWC (relative water content) $= v/V$ (v = volume d'eau présent ; V = valeur maximale de v c'est à dire en pleine turgescence), soit encore le déficit de saturation WSD (water saturation deficit), valeur complémentaire de la précédente ($WSD = 1 - v/V$).

2.1.2. Le potentiel hydrique d'un organe végétal (Ψ_F)

Cette grandeur qui définit l'état énergétique de l'eau est le meilleur indicateur de l'état hydrique de la plante. Trois raisons justifient son importance : (i) le Ψ_F traduit physiquement l'état énergétique de l'eau dans la plante tandis que les autres paramètres n'en donnent qu'une indication relative ; (ii) certaines fonctions de la plante comme la résistance stomatique, la différenciation et l'élongation cellulaire semblent liées directement à Ψ_F , (iii) sa mesure, réalisable à l'aide d'une chambre à pression est beaucoup plus rapide et plus précise que celle de RWC ou de WSD.

2.1.3. La résistance stomatique (r_s)

En l'absence de régulation photique liée à un éclairage insuffisant, l'accroissement de r_s traduit généralement un dessèchement relatif des feuilles et conduit à une réduction de la transpiration végétale et à l'assimilation. Ce paramètre demeure une donnée de référence intéressante. Cependant, il présente des variations spatiales importantes selon l'âge de la feuille, l'éclairage à l'intérieur même du couvert, ainsi qu'à l'échelle même de la feuille. Par ailleurs, la résistance stomatique présente des variations systématiques dans le temps (exemple du mil).

2.1.4. Les rapports des évapotranspirations réelle et potentielle

Plusieurs études expriment la croissance ou le rendement agricole en fonction des rapports ETR/ETP ou ETR/ETM, expression dans lesquelles ETR représente l'évapotranspiration réelle, ETP l'évapotranspiration potentielle et ETM l'évapotranspiration maximale du couvert considéré, c'est à dire en conditions d'alimentation hydrique optimales.

2.2. LES GRANDEURS EXPRIMANTS LES CONDITIONS D'ALIMENTATION HYDRIQUE DE LA PLANTE

2.2.1. Le potentiel moyen du sol Ψ_s et le potentiel foliaire de base à l'état d'équilibre Ψ_{Fb}

- Lorsque les racines explorent un milieu homogène dont le potentiel présente une valeur unique Ψ_s , on peut vérifier que le potentiel foliaire à l'équilibre correspond à Ψ_s (à l'erreur de mesure près soit environ 1 bar).
- Dans les conditions du champ où les n couches de sol explorées par les racines présentent des potentiels différents $(\Psi_s)_1, (\Psi_s)_2 \dots (\Psi_s)_n$, plusieurs auteurs ont proposé d'exprimer le potentiel moyen du sol par la relation :

$$\Psi_s = \sum$$

Le terme X_i désignant pour la tranche (i) soit la masse soit la longueur des racines. Il a été suggéré par ailleurs et vérifié que le potentiel foliaire à l'équilibre Ψ_{Fb} était très voisin de la valeur de Ψ_s ainsi définie :

$$\Psi_{Fb} = \Psi_s \pm 1 \text{ bar}$$

2.2.2. Les conditions d'équilibre entre l'offre et la demande en eau

Lorsque les racines explorent un milieu homogène, il a pu être montré et vérifié qu'en première approximation le flux liquide maximal du sol aux racines est donné par :

$$q_{\max} = \alpha (W - W_f)$$

Où W désigne l'humidité du sol, W_f le point de flétrissement permanent et α un coefficient de proportionnalité, fonction, croissante de la diffusivité D de l'eau dans le sol et de la densité racinaire dr , q_{max} représente une 1^{ère} limite de l'ETR.

III. MECANISMES PHYSIOLOGIQUES D'ADAPTATION A LA SECHERESSE

Les stratégies de lutte contre la sécheresse peuvent être regroupées sous trois formes : l'esquive, l'évitement et la tolérance à la sécheresse (Annerose et Cornaire 1991)

3.1. L'ESQUIVE A LA SECHERESSE

Les plantes pouvant esquiver la sécheresse ont la capacité de réaliser leur cycle complet de développement avant la manifestation de déficits hydriques importants du sol. C'est notamment le cas de l'utilisation des plantes à cycle court dans des zones de courte période végétative ou le semis à une date de forte probabilité de démarrage de la saison culturale. Cependant, si la précocité assurent de meilleurs rendements durant les années sèches, elle s'accompagne très souvent d'une baisse de productivité lorsque les conditions hydriques sont favorables. L'intérêt de cette caractéristique doit être considéré en tenant compte des conditions pluviométriques, de l'évaporation, des caractéristiques hydrodynamiques du sol, les effets des pratiques culturales sur la disponibilité en eau et les réactions de la plante à son environnement.

3.2. L'EVITEMENT DE LA SECHERESSE

Pour éviter la sécheresse, certaines plantes ont la capacité de maintenir à des niveaux élevés le potentiel hydrique de leurs tissus durant des périodes sans pluies significatives. Elles développent dans ce cas des mécanismes leur permettant à la fois d'augmenter l'absorption en eau et de réduire les pertes de cette eau.

L'augmentation de l'absorption de l'eau se fera à travers le développement d'un système racinaire performant. Cependant, cette performance du système racinaire est étroitement liée à l'allure de la pluviométrie et des caractéristiques hydrodynamiques du sol qui déterminent la disponibilité en eau pour la plante. Sur un sol léger à forte capacité de drainage, avec des pluies espacées et intenses, le système racinaire le mieux adapté doit être profond et dense sur tout le profil afin de réduire les pertes en eau par drainage en dessous du front racinaire. A l'opposé en cas de pluies fréquentes et de faible intensité un système racinaire peu profond et dense en surface améliorera l'absorption hydrique. La colonisation rapide du sol par le système racinaire est aussi importante dans les zones semi-arides où la préparation du lit de semence et la satisfaction des besoins en eau de germination ne peut être optimisée par irrigation (Hall et coll., 1979). Il faut également noter, qu'il a été mis en évidence chez certaines espèces comme le mil une considérable capacité d'ajustement de la croissance et du développement racinaire aux conditions hydriques du sol. Ces caractéristiques peuvent être utilisés dans la sélection de matériel végétal possédant l'architecture racinaire ou le mode de croissance et de développement les mieux adaptés à un type de sécheresse donné.

Concernant la réduction des pertes en eau, la fermeture hydroactive des stomates, lorsqu'elle est associée à une faible transpiration cuticulaire, constitue le mécanisme de régulation des pertes en eau le plus performant. Par exemple chez le niébé, le manioc et l'arachide, la diminution de la surface transpirante par enroulement des feuilles contribue à réduire efficacement la transpiration.

3.3. LA TOLERANCE A LA SECHERESSE

On regroupe sous ce terme les mécanismes qui permettent à la plante de maintenir l'intégrité de ses fonctions métaboliques tout en endurant un déficit hydrique de ses tissus (cas d'activité photosynthétique chez certaines variétés de sorgho et d'arachide). Les principaux mécanismes de tolérance à la sécheresse sont le maintien de la turgescence et la tolérance à la déshydratation.

Depuis les travaux de LOCKHART (1965) et HSIAO (1973), la diminution de la turgescence des tissus a été toujours considérée comme l'une des causes principales des effets négatifs d'un stress hydrique sur les fonctions de la plante (LEVITT, 1980). L'accumulation de solutés dans les tissus cellulaires déshydratés, l'augmentation de l'élasticité des parois cellulaires et la diminution de la taille des cellules contribuent à maintenir la pression de turgescence cellulaire. La maintenance de la turgescence permet de maintenir l'ouverture des stomates, la photosynthèse, la croissance racinaire et l'absorption hydrique ; elle diffère l'enroulement des feuilles et leur sénescence lors d'un déficit hydrique des tissus (Turner, 1986).

La tolérance à la déshydratation est un terme général recouvrant à la fois résistance mécanique des tissus au déficit hydrique ainsi que la résistance biochimique des enzymes et des protéines à la dénaturation. Elle dépend de la capacité des membranes cellulaires, des protéines membranaires et cytoplasmiques à résister à la dégradation et à la dénaturation. L'évaluation de l'importance de la tolérance à la déshydratation est très complexe et les méthodes simples souvent basées sur une estimation globale du maintien de l'intégrité des tissus restent encore les plus utilisées. Les études les plus avancées, arachides et sorgho, indiquent que la capacité de tolérance à la dessiccation augmente avec l'âge du matériel (ANNEROSE, 1990).

IV. L'APPAREIL STOMATIQUE ET LA RESISTANCE A LA SECHERESSE

(Daniel Laffray et Philippe Louguet)

*Laboratoire de Physiologie Végétale et d'écophysiologie Végétale Appliquée.
UFR de Sciences - Université Paris Val de Marne - Avenue du Général de
Gaulle - 94010 Créteil, Cédex, France.*

Rev. Rés. Amélior. Prod. Agr. Milieu Aride, 1989,1, 31-46.

Summary : *During drought, stomata allow the regulation Of CO₂ and water vapor exchanges of the plant. The relationships between stomatal conductance and leaf water potential and the stomatal responses to air water vapor deficit are studied and their mechanisms analysed. The partial control of photosynthesis by stomata is reexamined taking into account the new results showing a stomatal aperture patchiness on the leaf during drought. In a last part, interest and limitations of the use of stomatal responses in plant breeding for more drought*

résistant cultivars are discussed in relation to the overall mechanisms of drought resistance in the plant kingdom.

Résumé : Les stomates permettent, en condition de sécheresse, la régulation des échanges de CO₂ et de vapeur d'eau de la plante. Les relations entre la conductance stomatique et le potentiel hydrique foliaire ainsi que les réponses des stomates au déficit de saturation de l'air sont étudiées et leurs mécanismes d'action analysés. Le contrôle partiel de la photosynthèse par les stomates est réexaminé à la lumière des données récentes sur l'hétérogénéité des ouvertures stomatiques observées sur la feuille pendant la contrainte hydrique. Dans une dernière partie, l'intérêt et les limites de l'utilisation des réponses stomatiques pour la sélection de cultivars plus résistants à la sécheresse sont discutés dans le cadre plus général des mécanismes globaux de résistance à la contrainte hydrique dans le monde végétal.

Mots clés : Stomata - drought résistance - plant breeding, stomate, résistance à la sécheresse - sélection des plantes.

INTRODUCTION

Les plantes terrestres vivent dans un environnement qui leur est souvent hostile. La quantité d'eau disponible dans le sol, au niveau des racines, peut devenir limitante. Dans le même temps l'augmentation de la température de l'air pendant la journée peut conduire à de larges variations du déficit de pression de vapeur de l'atmosphère (VPD). La transpiration des plantes bien irriguées dépend étroitement du VPD qui conditionne, en définitive, le gradient de potentiel hydrique entre la feuille et l'air. Dans le même temps les feuilles doivent maintenir un état hydrique satisfaisant et assurer la fixation du CO₂. La présence d'une cuticule plus ou moins épaisse recouvrant le tissu épidermique, non seulement assure une réduction des échanges hydriques avec le milieu extérieur, mais permet également le contrôle de l'intensité de l'assimilation et de la transpiration grâce aux stomates, localisés pour l'essentiel à la surface des feuilles. Le flux d'eau transpiratoire conduit à la création de gradients de potentiel hydrique dans le continuum sol plante atmosphère et contribue, pour une large part, aux mécanismes d'absorption de l'eau au niveau racinaire et à son transfert dans la plante. La plupart des plantes doivent subir des périodes de sécheresse au cours de leur cycle de développement. Aussi la relation entre la conductance stomatique et le potentiel hydrique est-elle un aspect fonctionnel très important pour comprendre les mécanismes de réaction et de régulation des stomates en conditions de stress hydrique. Par ailleurs, les stomates de nombreuses espèces répondent directement aux variations de l'humidité de l'air, indépendamment de l'état hydrique de la feuille.

En raison du nombre très important de travaux publiés à ce jour sur le sujet très général du contrôle de la transpiration par les stomates des plantes en conditions de sécheresse, nous essaierons dans la première partie de cet article de mettre en valeur, d'une part les résultats les plus significatifs et de présenter, d'autre part, les aspects modernes des relations entre la conductance stomatique et le déficit hydrique. Dans une seconde partie, nous analyserons la possibilité d'utiliser les réponses stomatiques dans les processus de sélection de plantes cultivées mieux adaptées aux conditions de sécheresse.

4.1. LES REPONSES DES STOMATES A LA SECHERESSE

4.1.1. Relation entre potentiel hydrique et conductance stomatique.

Le potentiel hydrique (ϕ) des plantes bien irriguées décroît pendant la journée de 0,5 à 1,0 MPa (-5 à -10 bars) sans dommages apparents pour la plante. Il existe une large gamme de valeurs de potentiels hydriques pour laquelle la conductance stomatique (g_s) n'est pas affectée. En dessous d'une valeur seuil de potentiel hydrique, la conductance des stomates diminue de façon linéaire ou curviligne jusqu'au voisinage de 0. A ce stade, il ne reste que la conductance cuticulaire qui cependant peut être elle-même modifiée par la sécheresse (SCHÖNHERR, 1982). La figure 1 extraite d'une synthèse de DAVIES et al (1981) illustre la réponse de différentes espèces étudiées. Sur la partie gauche de la figure, la conductance est reliée au potentiel hydrique foliaire ϕ . On remarquera que la sensibilité des stomates à la diminution de ϕ varie largement suivant les espèces. Sur la partie droite, la conductance est reliée au potentiel de turgescence. La gamme de valeurs de ce potentiel entre le début et la fin de la fermeture stomatique est beaucoup plus étroite (maximum 0,4 MPa) que celle des potentiels hydriques. Il apparaît donc que les plantes diffèrent largement dans leur capacité à diminuer leur potentiel osmotique de manière à maintenir leur potentiel de turgescence positif pendant que le potentiel hydrique s'abaisse. On pourra également remarquer que le potentiel hydrique en lui-même n'est qu'une indication de l'état thermodynamique de l'eau dans la plante mais ne donne pas d'informations sur l'effet de la contrainte hydrique sur la physiologie.

4.1.2. Comparaison des réponses stomatiques de plantes cultivées en conditions contrôlées et au champ.

La figure 2 est extraite d'un travail de LUDLOW (1980) et met encore une fois en valeur la notion de potentiel hydrique seuil de fermeture qui diffère largement suivant que les plantes sont cultivées en pots ou au champ. La sensibilité plus réduite à l'abaissement du ϕ des plantes cultivées au champ peut être liée aux VPD plus grands qui sont habituellement rencontrés dans ces conditions de culture. Toutefois la raison principale est probablement la vitesse d'abaissement du potentiel hydrique. Les plantes cultivées en pots, en conditions contrôlées, n'ont qu'une quantité d'eau disponible limitée et, par conséquent, le potentiel hydrique chute très rapidement. Au contraire, les plantes cultivées au champ ont un système racinaire plus développé qui peut explorer un volume de sol beaucoup plus important. Aussi le potentiel hydrique, s'abaisse-t-il plus lentement et les plantes peuvent alors accumuler des solutés vacuolaire, pour maintenir leur potentiel de turgescence positif et conserver leurs stomates partiellement ouverts pour des potentiels hydriques plus bas.

4.1.3. Réponses stomatiques aux variations de l'humidité de l'air.

Les stomates de nombreuses espèces qui croissent et survivent dans les zones arides et semi-arides réagissent directement aux variations d'humidité de l'air. Ces stomates se ferment alors que le VPD augmente, indépendamment du potentiel hydrique foliaire. Toutefois, les stomates des plantes soumises à la contrainte hydrique peuvent aussi être plus ou moins sensibles aux variations du VPD. Ces réponses sont illustrées sur la figure 3 pour le Kenaf (*Hibiscus cannabinus*) d'après un travail de MUCHOW et al, 1980. Au champ, l'augmentation du VPD entre la feuille et l'air conduit à la fermeture des stomates de plantes bien irriguées alors que le potentiel hydrique foliaire reste sensiblement constant. En situation

de contrainte, la sensibilité, stomatique est diminuée et le mouvement de fermeture n'a lieu que pour des VPD très importants.

4.1.4. Mécanismes de la réponse stomatique pendant la sécheresse.

4.1.4.1. L'ajustement stomatique

Les stomates peuvent modifier leur potentiel osmotique (ajustement osmotique) et ainsi rester partiellement ouverts pendant que la contrainte hydrique s'installe. Ce type de comportement suppose pour la plante une certaine tolérance à la déshydratation. Le tableau qui suit est une synthèse de quelques données tirées de l'étude des effets de la sécheresse sur l'ajustement osmotique de plantes soumises à une contrainte hydrique qui permet d'atteindre le seuil de conductance stomatique nulle au champ et en conditions contrôlées (LUDLOW, 1980).

La survie de certaines espèces comme le Siratro et le Kenaf est essentiellement liée à une stratégie d'évitement de la déshydratation avec une capacité faible sinon nulle pour l'ajustement osmotique. Par voie de conséquence, les stomates de ces espèces réagissent très fortement à l'abaissement de ϕ . L'ajustement osmotique peut être mis en évidence aussi bien chez les plantes au métabolisme en C3 que chez celles en C4. La plus grande capacité d'ajustement du sorgho et des plantes cultivées tropicales comparativement au maïs et aux céréales des zones climatiques tempérées est probablement lié à la distribution écologique de ces espèces.

De nombreux travaux ont montré par ailleurs que les stomates pouvaient rester ouverts alors que la feuille avait perdu sa turgescence.

Tableau : L'Ajustement stomatique est déterminé par la différence entre les valeurs maximales et minimales du potentiel hydrique (bars) pour lesquelles la conductance stomatique atteint 0. Les variations sont établies en comparant les témoins et les plantes mises en contrainte, cultivées au laboratoire ou au champ. Les valeurs données sont les plus élevées mesurées, celles entre parenthèses sont des valeurs moyennes. D'après LUDLOW, 1980.

Espèce	Maximum	Minimum	Différence
C 4			
<i>Zea mays</i>	-11	-18	7
<i>Sorghum bicolor</i>	-15	-28	13
<i>Panicum maximum</i>	-17	-30	13(11)
<i>Cenchrus ciliaris</i>	-18	-37	19(15)
<i>Heteropogon contortus</i>	-17	-53	36(34)
C3			
<i>Hibiscus cannabinus</i>	-21	-21	0
<i>Macroptilium atropurpureum</i> -13		-15	2
<i>Vicia faba</i>	-6	-10	4
<i>Triticum aestivum</i>	-14	-19	5
<i>Helianthus annuus</i>	-17	-27	10
<i>Glycine max</i>	-16	-29	13(11)
<i>Gossypium hirsutum</i>	-30	-43	13(8)

Cependant, il ne faut pas oublier que les stomates sont des cellules isolées au milieu de l'épiderme et qui possèdent leurs propres mécanismes de régulation de la turgescence. Aussi, leur fonctionnement peut être relativement indépendant de la turgescence du mésophylle. Ceci est illustré sur la figure 4 établie à partir d'une étude sur le riz (HENSON, 1983) mais de nombreuses plantes présentent des réactions similaires (GOLLAN et al 1986; SCHULZE, 1986). Cependant, cette conductance mesurée alors que la feuille a perdu sa turgescence pourrait être également due à une conductance cuticulaire importante.

4.1.4.2. Réponses à l'humidité de l'air pendant la sécheresse

La réponse de fermeture des stomates lors de l'augmentation du déficit de saturation de l'atmosphère peut être expliquée par le mécanisme de "feedforward" décrit par FARQUHAR (1978). Schématiquement, la perte d'eau par le tissu épidermique et le degré de turgescence de ce tissu jouent un rôle déterminant sur le degré d'ouverture des stomates, indépendamment de la transpiration stomatique et de l'état hydrique du mésophylle. Par conséquent, le déficit en eau de l'appareil stomatique précède celui du reste de la feuille. Ce type de réponse est rapide, réversible et n'a que peu d'arrière effets sur la croissance. Cette réponse apparaît comme un caractère adaptatif très important pour la plante dans la mesure où elle évite une déshydratation rapide de la plante et permet également une augmentation de l'efficacité de l'eau, car les échanges gazeux sont favorisés essentiellement le matin et en fin d'après-midi (LUDLOW, 1980). Cette réponse à l'augmentation du VPD de l'atmosphère peut être également intéressante pour les plantes qui ne tolèrent pas la déshydratation. Cette réaction ne peut toutefois pas s'expliquer par des mouvements passifs d'eau liés à des augmentations ou des diminutions du VPD air-feuille. La conductance cuticulaire peut également être modifiée par l'hydratation des polymères constituant la cuticule (SCHÖNHERR, 1982). Par ailleurs, quelques travaux sur ce thème suggèrent que la réponse des stomates à l'humidité de l'air dépend de mouvements hydropassifs qui initieraient un ajustement métabolique dans les cellules de garde des stomates (LÖSCH, 1979; SHACKEL et BRINCKMANN, 1985; MEIDNER, 1986).

4.1.4.3. Rôle du taux d'ABA dans les feuilles

Au cours des 10-15 dernières années, de nombreux auteurs ont décrit une accumulation d'ABA dans les feuilles des plantes soumises à la sécheresse (DAVIES et al, 1981). QUARRIE (1983) a donc proposé de sélectionner les plantes résistantes à la sécheresse selon leur capacité à accumuler cette hormone, l'augmentation d'ABA étant supposée être étroitement corrélée à la conductance des stomates. Toutefois, HENSON (1983) montrait que la biosynthèse d'ABA était trop lente pour expliquer la rapidité de la réponse de fermeture des stomates, de même que RASCHKE et HEDRICH (1985) établissaient que la quantité d'ABA contenue dans les feuilles n'était pas toujours corrélée au fonctionnement des stomates.

Quelques années plus tard, ZHANG et al (1987), utilisant le système de l'appareil racinaire divisé en deux ("split root system") démontrait que, lors de la contrainte hydrique, la synthèse d'ABA se produisait dans les racines qui jouent alors le rôle de capteurs de l'état de sécheresse du sol. Cet ABA racinaire est alors transporté par le flux d'eau transpiratoire jusqu'aux stomates où il agit.

Ces travaux ont été confirmés par GOLLAN et al (1986), puis GOLLAN et SCHURR (1989) qui ont utilisé un système beaucoup plus sophistiqué : une chambre à pression contient le système racinaire et permet ainsi de maintenir le potentiel hydrique foliaire au voisinage de 0 pendant toute la durée de l'assèchement du sol. La figure 5 montre l'évolution de la conductance foliaire chez le blé lorsque le sol s'assèche avec ou sans pression au niveau du système racinaire. Dans les deux cas, et indépendamment de la valeur élevée du ϕ (proche de 0), la conductance foliaire diminue quand le système racinaire ou une partie seulement sont soumis à un déficit hydrique. Ce mouvement de fermeture stomatique est la preuve de l'existence d'une communication racine-feuille, qui repose essentiellement sur une forte augmentation du taux d'ABA transporté dans le xylème lorsque le sol s'assèche. Par ailleurs, les feuilles âgées qui sont habituellement les premières à disparaître en cas de déficit hydrique joueraient le rôle d'amplificateur du signal racinaire (DAVOES, communication personnelle).

4.2. CONTROLE DE LA PHOTOSYNTHESE PAR LES STOMATES PENDANT LA SECHERESSE.

Ici encore, le nombre de travaux publiés sur le thème de la réduction de la transpiration des plantes en relation avec leur état hydrique et la réduction de la photosynthèse est considérable. La conductance foliaire et l'assimilation photosynthétique sont étroitement liées lors de modifications des facteurs de l'environnement.

La figure 6 (KOPPERS et al, 1988) a été établie sur *Vigna unguiculata* pendant une période d'assèchement lent ou rapide du sol. La conductance stomatique et l'assimilation sont étroitement corrélées dans tous les cas. Pendant la contrainte, la diminution de la fixation du CO_2 est supposée dépendre à la fois d'une inhibition de la photosynthèse proprement dite (composante non stomatique) et de la fermeture des stomates (composante stomatique). Ce double effet du déficit hydrique explique la difficulté de quantifier le degré exact de l'inhibition des échanges photosynthétiques causés par la diminution de la conductance stomatique. CORNIC et al (1983), puis JONES (1985) ont proposé une méthode de partition des deux effets par la technique des courbes A/C_i . Toutefois, cette méthode a surtout été employée lors d'études sur des plantes C_3 cultivées en conditions contrôlées. Par ailleurs, des analyses fines réalisées au cours des deux dernières années montrent clairement que l'appareil photosynthétique lui-même est probablement moins sensible au déficit hydrique qu'on ne l'avait supposé (CORNIC et al, 1989). De plus, des études récentes ont également montré que les valeurs de CO_2 interne (C_i) calculées pouvaient être entachées d'erreur en raison de l'hétérogénéité des ouvertures stomatiques sur une même feuille qui peut présenter des îlots de stomates ouverts à côté d'autres qui restent fermés ("Patchiness"). DOWNTON et al (1988) ont pu mettre en évidence ces îlots sur au moins trois espèces.

4.3. UTILISATION DU FONCTIONNEMENT DES STOMATES COMME CRITERE EFFICACE DE SELECTION POUR LA RESISTANCE A LA SECHERESSE.

On peut résumer le problème en quelques mots: Une bonne fermeture stomatique pendant la sécheresse peut-elle constituer un critère de sélection d'espèces ou de variétés plus résistantes ?

4.3.1. Sélection des variétés selon leur conductance stomatique

- Le premier type de sélection peut reposer sur la vitesse de fermeture des stomates lorsque la plante est soumise à la sécheresse. MARKHART (1985) a comparé le comportement stomatique de deux *Phaseolus* soumis à une contrainte hydrique (Fig. 7). *P. vulgaris* espèce sensible à la sécheresse garde ses stomates partiellement ouverts alors que le ϕ atteint des valeurs de l'ordre de -1 à -1,4 MPa. Au contraire, *P. acutifolius* (Tepary bean) ferme ses stomates dès que le potentiel hydrique atteint -1 MPa. Ce comportement est typique d'une stratégie d'évitement de la déshydratation ("drought avoidance"). Une analyse plus détaillée de ce comportement a été réalisée par LORENT et al (1989) sur le même matériel. La possibilité pour *P. acutifolius* de faire face à un approvisionnement en eau restreint durant la période végétative est importante pour le rendement final de la culture. MARKHART (1985) a montré en particulier que la profondeur de pénétration des racines était une caractéristique importante de cette espèce pour une meilleure capacité d'extraction de l'eau. LORENT et al (1989) ont pu montrer également sur cette espèce une osmorégulation plus importante que chez le haricot.

- L'évolution de la conductance stomatique lors de l'abaissement du ϕ peut être utile pour le choix des espèces de palmier à huile. ADJAHOSSOU et al (1984), dans une étude comparative, ont analysé les productivités de plusieurs cultivars soumis à la sécheresse. La figure 8 montre de larges différences entre les espèces quant à leur possibilité de maintenir les stomates ouverts pour un potentiel hydrique donné. Ces travaux aboutissent aux conclusions suivantes : un bon rendement en fruits après une sécheresse peut être obtenu soit sur des plantes présentant une fermeture stomatique précoce associée avec une faible tolérance à la déshydratation, soit sur des plantes présentant une fermeture stomatique tardive associée à une tolérance protoplasmique plus élevée.

- Cependant des difficultés peuvent surgir quand l'étude porte sur la comparaison de variétés entre elles. Le cas est particulièrement significatif chez le mil, *Pennisetum americanum*. Nous choisirons deux exemples. Dans le premier, l'étude porte sur deux variétés en provenance du Burkina et originaires de zones climatiques très différenciées présentant des pluviométries de l'ordre de 300 et 600 mm/an. Dans ce cas, des différences notables de comportement stomatique sont enregistrées (courbes semblables à celles de la figure 1). Dans le second cas, deux variétés ont été sélectionnées à Sadoré, Niger, et sont supposées résistantes (ICMVIS 86330) et sensibles (ICMVIS 85327) à la sécheresse. Il apparaît qu'une étude comparative dans les conditions contrôlées du laboratoire ne permet pas d'établir de différences significatives entre les deux variétés aussi bien sur le plan de l'évolution des conductances stomatiques (Fig. 9) que celui des capacités photosynthétiques en conditions de contrainte hydrique (LAFFRAY et al, 1989). Il en va de même pour les caractéristiques hydriques à la fin de la période de sécheresse. La capacité d'ajustement osmotique chez les deux variétés est faible (≈ 0.2 MPa) comme pour toutes les variétés de mil et la perte de turgescence est atteinte pour des contenus relatifs en eau du même ordre de grandeur. L'analyse des résultats des expérimentations conduites en plein champ a permis de montrer que les différences de rendement qui avaient conduit à supposer les deux variétés résistantes et sensibles n'étaient pas liées à une adaptation physiologique particulière mais plutôt à des différences morphologiques. La possibilité, sur la variété résistante, de maintenir davantage de talles fertiles explique les différences de rendement en grains par m².

- Quand les stomates sont complètement fermés, certaines espèces (palmier à huile, cocotier) perdent une quantité d'eau importante par la voie cuticulaire. SINCLAIR et LUDLOW (1986) ont également proposé de prendre le critère "faible transpiration cuticulaire" en compte dans les programmes de sélection des plantes.

4.3.2. Sélection pour l'aptitude à l'ajustement osmotique.

Les périodes de sécheresse sont le plus souvent le fait de l'irrégularité des pluies. Une adaptation progressive des plantes à des phases de sécheresse de courte durée alternant avec des périodes de réhydratation peut leur permettre de maintenir une conductance élevée pour un potentiel hydrique donné. ACKERSON (1980) a décrit ce type d'accoutumance chez le cotonnier pour les stomates des feuilles jeunes et des feuilles âgées (fig. 10). -

REJEB (même volume) a trouvé chez le caroubier soumis à des cycles de sécheresse une adaptation stomatique similaire. Les ouvertures stomatiques mesurées lors de la seconde période de contrainte sont alors plus élevées pour un niveau donné de ϕ (fig. 11). Ainsi les plantes peuvent être sélectionnées pour leur capacité à supporter la déshydratation et à diminuer la sensibilité de leurs stomates à la sécheresse, ce qui permet de maintenir une activité photosynthétique à condition qu'il reste de l'eau à extraire dans le sol.

4.3.3. Arrière-effets de la contrainte hydrique sur les stomates

Lors de la réhydratation, le potentiel hydrique augmente, en l'espace de quelques heures pour atteindre le niveau de ϕ du témoin irrigué. Dans le même temps, on enregistre généralement un déphasage pour la réouverture stomatique. Les vitesses de réhydratation et de réouverture stomatique peuvent dépendre de l'aptitude de la plante à supporter la déshydratation mesurée par la résistance protoplasmique.

CONCLUSION

Lorsqu'on parle de résistance à la sécheresse, on doit d'abord préciser le type de sécheresse à laquelle la plante est soumise. La fermeture stomatique n'est que l'un des aspects de la réponse globale de la plante, réponse qui inclut des processus métaboliques et morphogénétiques.

La phase du cycle de développement de la plante au cours de laquelle survient la sécheresse présente également une grande importance. La carence hydrique n'a pas les mêmes effets sur le rendement des céréales lorsqu'elle survient pendant la phase végétative, l'induction florale ou le remplissage du grain. La plupart des articles sous-estiment cet aspect, spécialement quand les plantes sont cultivées en conditions contrôlées.

Les études sur la résistance à la sécheresse doivent être réalisées et adaptées à chaque type de zone climatique. Ainsi, un certain nombre de données statistiques concernant le climat et l'agronomie sont nécessaires : type de sol, réserve en eau utile, probabilité la plus élevée pour l'occurrence de la sécheresse au cours du cycle de développement de la plante cultivée, durée et intensité du stress.

De manière à mieux comprendre les mécanismes de résistance à la sécheresse, il est probablement plus important de comparer des cultivars sensibles ou non plutôt que des

espèces entre elles. Le cycle de développement de ces cultivars doit être adapté à la longueur moyenne de la période pluvieuse de la localité. Ainsi, il semble plus opportun de comparer soit des plantes à cycles longs soit des plantes à cycles courts entre elles plutôt que des plantes à cycles longs et à cycles courts.

En accord avec les conclusions de JONES (1987) sur la sélection des plantes en fonction de leurs réponses stomatiques, il est clair que le comportement stomatique "utile" pour les plantes n'est pas aussi simple qu'on pouvait l'espérer. Notre connaissance des rôles physiologique et écologique des stomates en liaison avec la sécheresse demeure encore incomplète. La résistance à la sécheresse est un système complexe comportant plusieurs mécanismes possibles d'adaptation. Les productivités et rendements optimums nécessitent une augmentation des performances photosynthétiques qui dépendent, en définitive, de la conductance stomatique. D'autre part, une faible conductance stomatique limitant les pertes en eau de la plante, constitue une solution efficace pour la survie de la plante mais qui a par contre l'inconvénient de limiter la productivité. Des différences génotypiques au niveau des réponses stomatiques de plantes soumises à la contrainte ont été mises en évidence sur plusieurs espèces et leur sélection selon ce paramètre est intéressante, bien que longue à réaliser. La conductance foliaire peut être un outil important dans la sélection des variétés mais cette technique présente parfois des limitations et ne peut donc être généralisée à toutes les variétés. Aussi, quelques auteurs (MATIN et al, 1989) ont proposé de sélectionner les cultivars à la fois selon leurs contenus relatifs en eau et leur résistance stomatique.

L'ajustement osmotique joue certainement un rôle plus important encore que celui de permettre d'extraire plus d'eau du sol. En raison de la relativement faible capacité d'ajustement osmotique de nombreuses plantes cultivées, ce mécanisme reflète probablement des modifications du métabolisme au niveau de la plante entière qui permettent à celle-ci de supporter une certaine déshydratation. Pour une sécheresse passagère et de courte durée, une fermeture rapide est probablement une solution très efficace. Pour de longues périodes, elle n'a que peu d'intérêt. Si la plante possède aussi une forte tolérance protoplasmique, les effets post-sécheresse seront minimisés. Une récupération rapide peut être aussi une caractéristique intéressante probablement liée à la tolérance protoplasmique mais ce point reste à démontrer.

On peut conclure que s'il reste toujours un peu d'eau disponible dans le sol pour la plante, il est certainement plus avantageux de conserver des stomates partiellement ouverts ; s'il ne reste plus d'eau extractible en quantité suffisante, alors une fermeture complète assure à la plante une protection efficace contre la déshydratation. *Vigna unguiculata* présente à la fois une fermeture stomatique très rapide associée à une forte tolérance protoplasmique. Ces deux "stratégies" ne semblent donc pas nécessairement opposées et les sélectionneurs devraient en tenir compte dans leurs choix des critères physiologiques de sélection.

Références citées

- ACKERSON R.C., 1980-Stomatal response Of cotton to water stress and abscisic acid as affected by water stress history. *Plant Physiol.*, 65, 455-459.
- ADJAHOSSOU F., P. LOUGUET, J. VIEIRA DA SILVA, 1984 - Corrélations entre les résistances stomatiques de divers croisements de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) et la tolérance à la sécheresse. *Acta Oecol.10ecol. Plant.*, 5, 2, 63-78.
- CORNIC G., J.L. PRIOUL, G. LOUASON, 1983 - Stomatal and nonstomatal contribution in the decline in leaf CO₂ uptake during rapid water stress. *Physiol. Plant.*, 58, 295-301.
- CORNIC G., J.L. LE GAOUELLEC, J.M. BRIANTAIS, M. HODGES, 1989 - Effect of dehydration and high light on photosynthesis of two C3 plants (*Phaseolus vulgaris* L. and *Elatostema repens* (Lour.) Hall f.). *Planta*, 177, 84-90
- DAVIES W.J., J.A. WILSON, R.E. SHARP, O. OSONUBI, 1981 Control of stomatal behaviour in water-stressed plants. In *Stomatal Physiology*, Society for Experimental Biology, SS8, PG Jarvis & TA Mansfield Eds, pp 163-185.
- DOWNTON W.J.S., B.R. LOVEYS, W.J.R. GRANT, 1988 - Non uniform stomatal closure induced by water stress causes putative non stomatal inhibition of photosynthesis. *New Phytol.*, 110, 503-509.
- FARQUHAR G.D., 1978 - Feedforward responses of stomata to humidity. *Aust. J. Plant Physiol.*, 5, 787-800.
- GOLLAN T., J.B. PASSIOURA, R. MUNNS, 1986 - Soil water status affects the stomatal conductance of fully turgid wheat and sunflower leaves. *Aust. J. Plant Physiol.*, 13, 459-464.
- GOLLAN T., U. SCHURR, 1989 - The effect of drying soil on leaf conductance - changes in the xylem sap composition of intact plants. *Colloquia Pflanzenphysiol.*, Humboldt Universität Berlin, Stomata 89. ISSN 0232-6930.
- HENSON I.E., 1983 - Absciscic acid and water relations of rice (*Oriza sativa* L): Effects of drought conditioning on abscisic acid accumulation in the leaf and stomatal response. *Ann. Bot.*, 52, 247-255.
- JONES F.G., 1985 - Partitioning stomatal and non stomatal limitation to photosynthesis. *Plant Cell Environ.*, 8, 95-104.
- JONES H.G., 1987 - Breeding for stomatal characters. In *Stomatal function*, E. Zeiger, G.D. Farquhar & I.R. Cowan Eds, pp 431-444.
- KOPPERS B.I.L., M. KOPPERS, E.D. SCHULZE, 1988 - Soil drying and its effect on leaf conductance and CO₂ assimilation of *Vigna unguiculata* (L) Walp. I - The response to climate factors and to the rate of soil drying in young plants. *Oecologia*, 75, 99-104.
- LAFFRAY D., L. NUNES DE PINHO, C. DA SILVA Jr, P. LOUGUET, 1989 - Stomatal responses and water stress in sorghum and pearl millet. *Colloquia Pflanzenphysiol.*, Humboldt Universität Berlin, Stomata 89. ISSN 0232-6930.
- LORENT G., R. LANNOYE, VIEIRA DA SILVA J., 1989 - Effets d'une contrainte hydrique sur les relations hydriques et la conductance stomatique de *Phaseolus acutifolius* A. Gray et *Phaseolus vulgaris*. *Stratégies adaptatives*. Plant Physiology and Biochemistry, sous presse.
- LÖSCH R., 1979 - Responses of stomata to environmental factors in experiments with isolated epidermal strips of *Polypodium vulgare*. II Leaf bulk water potentiel, air humidity and température. *Oecologia*, 39, 229-238.
- LUDLOW M.M., 1980 - Adaptive significance of stomatal responses to water stress. In : *Adaptation of plants to water and high température stress*. Turner NC & Kramer PJ Eds, Wiley Inter-sciences NY., pp 123-138.

- MARKHART A.H., 1985 - Comparative water relations of *Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus acutifolius* Gray. *Plant Physiol.*, 77, 113-117.
- MATIN M.A., J.H. BROWN, H. FERGUSON, 1989 - Leaf water potentiel, relative water content and diffusive résistance as screening techniques for drought résistance in barley. *Agir. J.*, 81, 1, 100-105.
- NOEIDNER H., 1986 - Cuticular conductance and the humidity response of stomata. *J. Exp. Bot.*, 37, 517-525.
- MUCHOW R.C., M.J. FISHER, M.M. LUDLOW, J.K. MYERS, 1980 - Stomatal behaviour of kenaf and sorghum in a semi arid environment. II - During the day. *Aust. J. Plant Physiol.*, 7, 621-628.
- QUARRIE S.A., 1983 - Genetic différences in abscisic acid physiology and their potential uses in agriculture. In: *Absciscic acid*, F.T. Addicott Ed, NY., Praeger, pp 365-419.
- RASCHKE X., R. HEDRICH, 1985 - Simultaneous and independent effects of abscisic acid on stomata and the photosynthesis apparatus in whole leaves *Planta*, 163, 105-118.
- SCHÖNHERR J., 1982 - Resistance of plant surfaces to water ; loss transport properties of cutin, suberin and associated lipids. In *Physiological Plant Ecology, II - Water Relations and Carbon Assimilation*, Lange O., Nobel P.S., Osmond C., Ziegler H. Eds, Springer Verlag, Vol 12b, pp 154-179.
- SCHULZE E.D., 1986 - Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 37, 247-274.
- SHACKEL K.A., E. BRINCKMANN, 1985 - *In situ* measurement of epidermal cell turgor, leaf water potentiel and gas exchange in *Tradescantia virginiana* L. *Plant Physiol.*, 78, 66-70.
- SINCLAIR T.R., M.M. LUDLOW, 1986 - Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Aust. J. Plant Physiol.*, 13, 329-341.
- ZHANG J., U. SCHURR, W.J. DAVIES, 1987 - Control of stomatal behaviour by abscisic acid which apparently originates in the roots. *J. Exp. Bot.*, 38, 1174-1181.

V. Les stratégies de lutte contre la sécheresse (voir chapitre sur l'économie de l'eau)

VI. Liste des documents consultés

- Annerose D. et Cornaire B., 1991 : Premiers acquis du CERAAS sur la physiologie de l'adaptation à la sécheresse de quelques espèces cultivées, 13 p.
- Bidinger F. R. et al., 1987 : Assessment of Drought résistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). I. Factors affecting yields under stress ; *aust. J. Agric. Res.*, 38, 37-48
- Do, F. et al. (non daté) : Etude des mécanismes de résistance du mil à la sécheresse (cas d'un stress hydrique terminal) ; 10 p.
- Dollon F. 1992 : Analyse des échanges gazeux en réponse à un stress hydrique post-floral chez deux variétés de mil cultivés au champ ; Mémoire de fin d'étude de l'ENSAM-Montpellier, 45 p.
- Henson I. E. et al., 1982 : Stomatal response of pearl millet (*pennisetum americanum* (L.) Leeke) to leaf water status and environmental factors in the field ; *Plant, Cell and Environment*, 5, 65-74.
- Katerji . et Hallaire M., 1984 : Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures ; *Agronomie*, 4 (10), 999-1008.

Katerji N., 1989 : L'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère ; in « l'expérimentation agricole et l'alimentation en eau des plantes » ; Colloque AFMEX, versaille 25-26/01/1989 ; p 9-23.

Khalfaoui J.L., 1991 : Premiers acquis du CERAAS sur la génétique de l'adaptation à la sécheresse de quelques espèces cultivées, 13 p.

Laffray D. et Louguet P., 1989 : L'appareil stomatique et la résistance à la sécheresse ; Rev. Rés. Amélior. Prod. Agr. Milieu Aride, 1, 31-46

Météo France et INRA, 1990 : Dictionnaire encyclopedique d'agrométéorologie

Réseaux Lutte contre la sécheresse (Laffray D. et Carbonnier J.), 1986 : Recherches et applications dans le domaine des antitranspirants; 237 p.

Sivakumar M.V.K., 1991 : Durée et fréquence des périodes sèches en Afrique de l'Ouest ; Bulletin de Recherche n° 13 de l'ICRISAT ; 139 p.

Squire G.R., 1979 : The response of stomata of pearl Millet (*Pennisetum typhoides* S. and H.) to Atmospheric Humidity ; Journ. Of exp. Bot., vol 30, n° 118, pp 925-933

Liste des figures utilisées

Figure 1 : Fonctionnement théorique d'un végétal (d'après Saintout et al. 1986).

Figure 2 : Influence sur le rendement du maïs d'une restriction de moitié de son alimentation en eau. D'après ROBELIN dans Saintout et al. 1986.

Figure 3 : Evolution au cours du temps du contenu relatif en eau de la variété de mil HKP. D'après Dollon F., 1992.

Figure 4 : Evolution au cours du temps du potentiel hydrique foliaire, comparaison IC30s/HKPs. D'après Dollon F., 1992.

Figure 5 : Exemples de valeurs de résistances stomatiques des feuilles de mil pour les jours 253 et 261, 1992. D'après Amadou M. 1994.

Figure 6 : Comparaison des valeurs moyennes de coefficient cultural du mil déterminées suivant plusieurs expériences. D'après Wallace et al., 1993.

Figure 7 : Evolution de la conductance foliaire de plusieurs espèces pour un même niveau d'éclairement, en fonction de (a) le potentiel hydrique et (b) le potentiel de turgescence du tissu foliaire. D'après DAVIES, 1981.

Figure 8 : Relations entre le potentiel hydrique foliaire et la conductance stomatique chez *Heteropogon contortus* pour un cycle de sécheresse de plusieurs jours pour les plantes cultivées en pot en conditions contrôlées (CER), et durant 5 semaines pour les plantes cultivées au champ. Au cours de la période de sécheresse les modifications sont suivies sur des talles (pointillés) qui ont été coupés, mis à réhydrater puis soumis une déshydratation après 1, 3 et 5 semaines d'assèchement du sol au champ. D'après LUDLOW, 1980.

Figure 9 : Relation entre la conductance stomatique g_s (traits pleins) et le déficit de saturation de l'air des plants de Kenaf irrigués (○) et non irrigués (◊). Les potentiels hydriques correspondants sont également indiqués pour les irrigués (○) et les non irrigués (◐). D'après MUCHOW et al. 1980.

Figure 10 : Relation entre la conductance foliaire et le potentiel de turgescence de la feuille pour des plants de riz, variétés IR20, témoin (A) ou soumises à la sécheresse (B). D'après HENSONS, 1983.

Figure 11 : Relations entre le contenu en eau du sol (E) et la conductance foliaire (g), la succion du sol (O) et la pression d'équilibre (P) chez le blé. D'après Schulze et al. 1987, adapté de Gollan et al. 1986.

Figure 12 : Relation entre l'activité photosynthétique (A_{max}) et la conductance stomatique (G_{max}) lors de la diminution de la quantité d'eau extractible du sol (W_e). Symboles ouverts ou assèchement lent ; symboles pleins = assèchement rapide. D'après Koppers et al. 1988.

Figure 13 : Evolution en fonction de l'abaissement du potentiel hydrique de la résistance stomatique des faces adaxiales et abaxiales de *phaseolus vulgaris* (Pv) et *phaseolus acutifolius* (Pa). D'après Markhart, 1985.

Figure 14 : Evolution de la conductance stomatique en fonction du potentiel hydrique chez plusieurs cultivars de palmiers à huile. D'après Adjahossou et al. 1984.

Figure 15 : Relation entre la conductance stomatique et le potentiel hydrique d'une variété «sensible» ICMVIS 85327 et d'une variété «résistante», ICMVIS 86330 de mil, *Pennisetum americanum*. D'après Laffray et al. 1989.

Figure 16 : Relations entre le potentiel hydrique foliaire et la conductance stomatique de plants de coton soumis à différents traitements de sécheresse. Etude comparative des réponses des feuilles jeunes et âgées. D'après ACKERSON, 1980.

Figure 17 : Influence du potentiel hydrique sur la conductance foliaire chez des caroubiers originaires de Sfax, Tunisie et soumis à 2 cycles de sécheresse. Communication personnelle, REJEB, 1989.

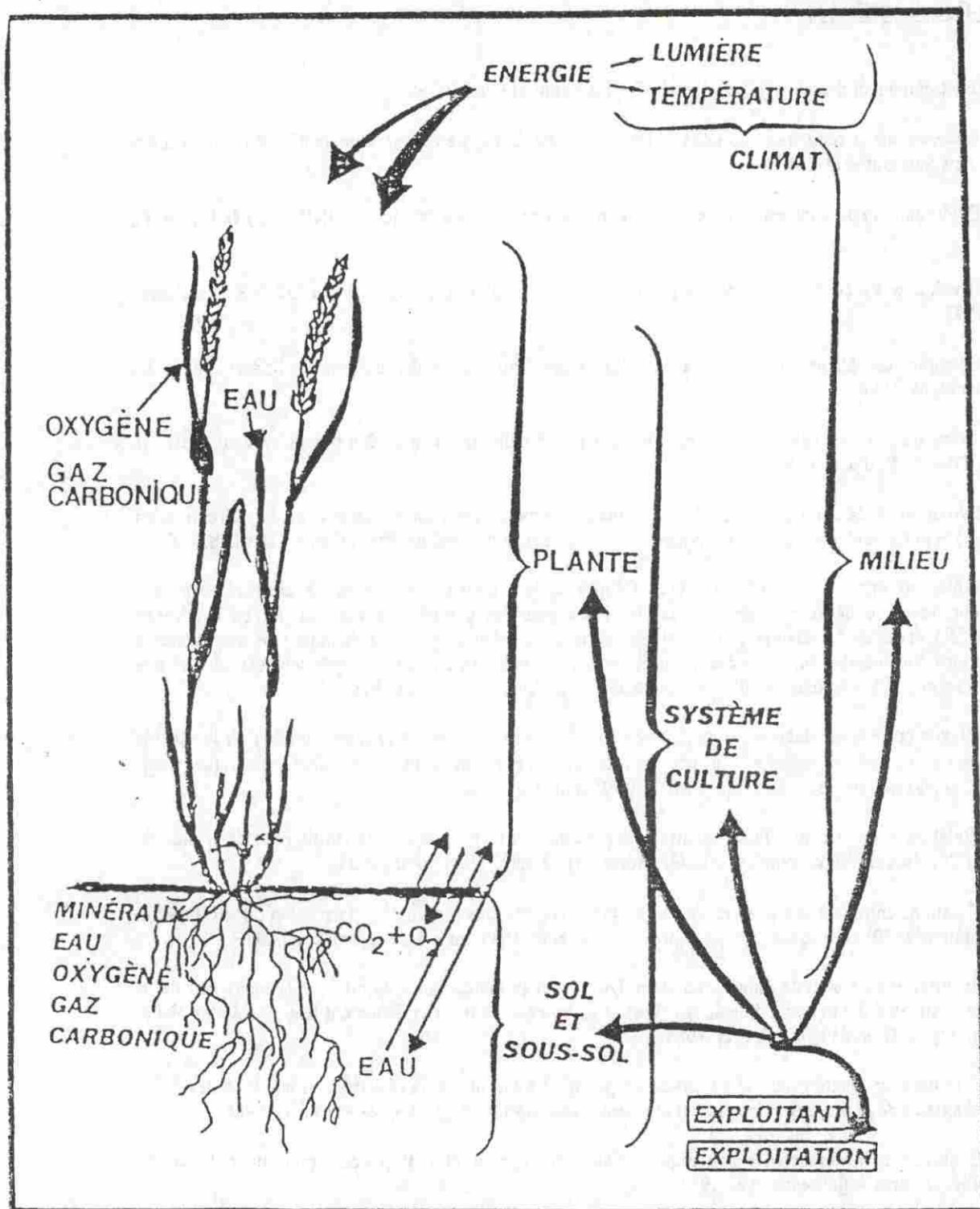


Figure 1: Fonctionnement théorique d'un végétal.
(Saintout et al. 1986).

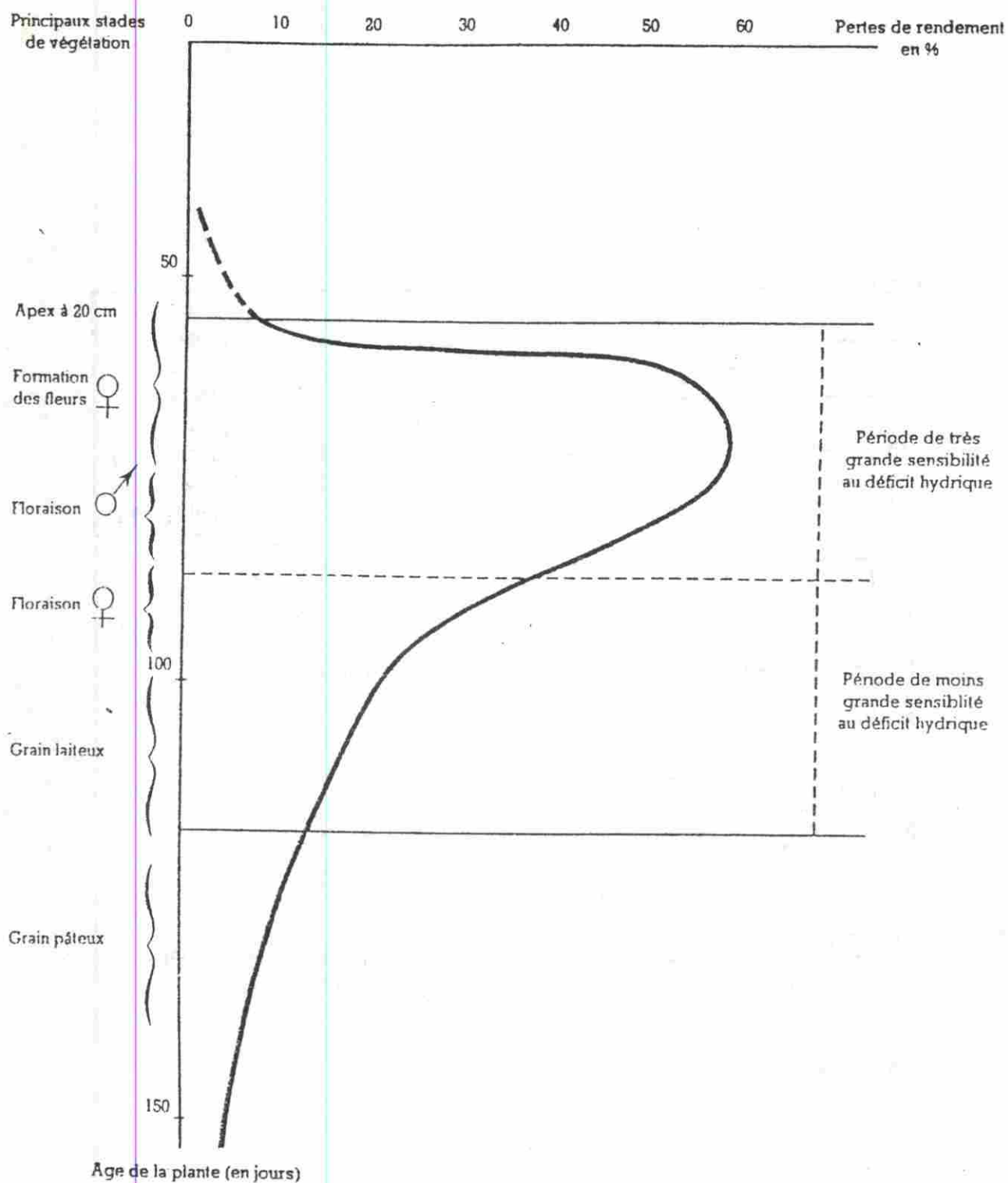


Figure 2 : Influence sur le rendement du maïs d'une restriction de moitié de son alimentation en eau.
(D'après ROBELIN dans Saintout et al. 1986).

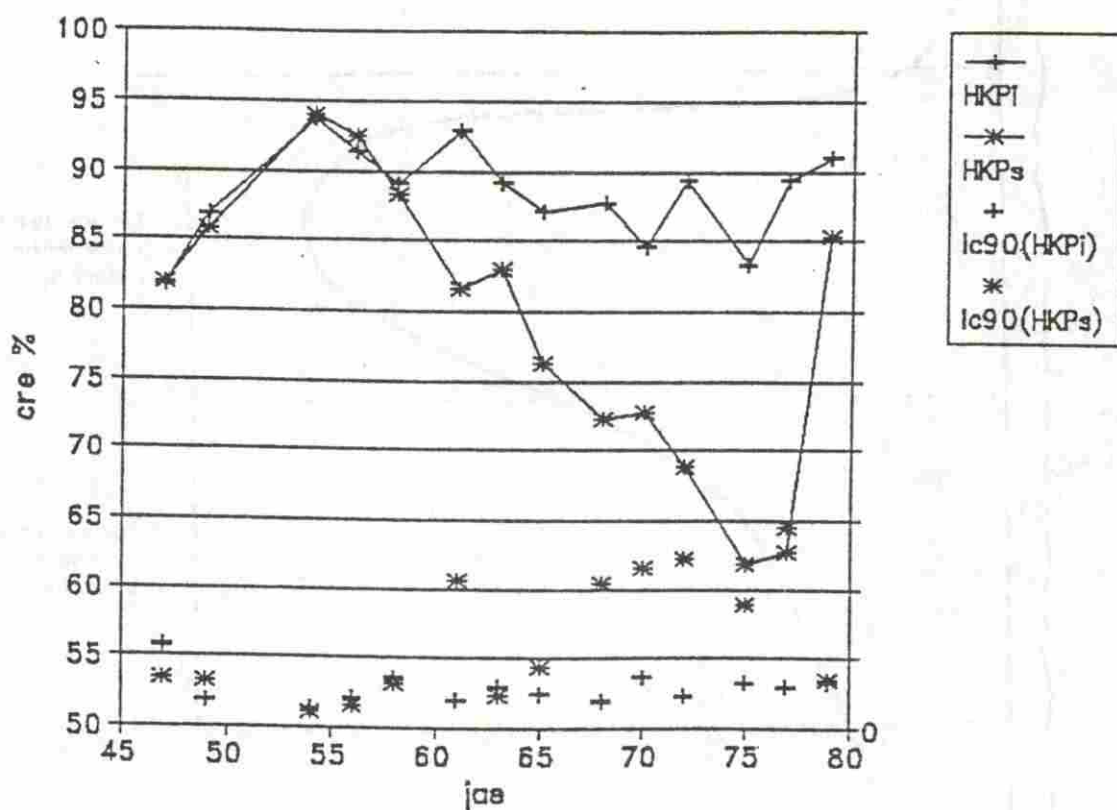


Figure 3 : Evolution au cours du temps du contenu relatif en eau de la variété de mil HKP (Dollon F., 1992).

ic90: intervalle de confiance à 90%

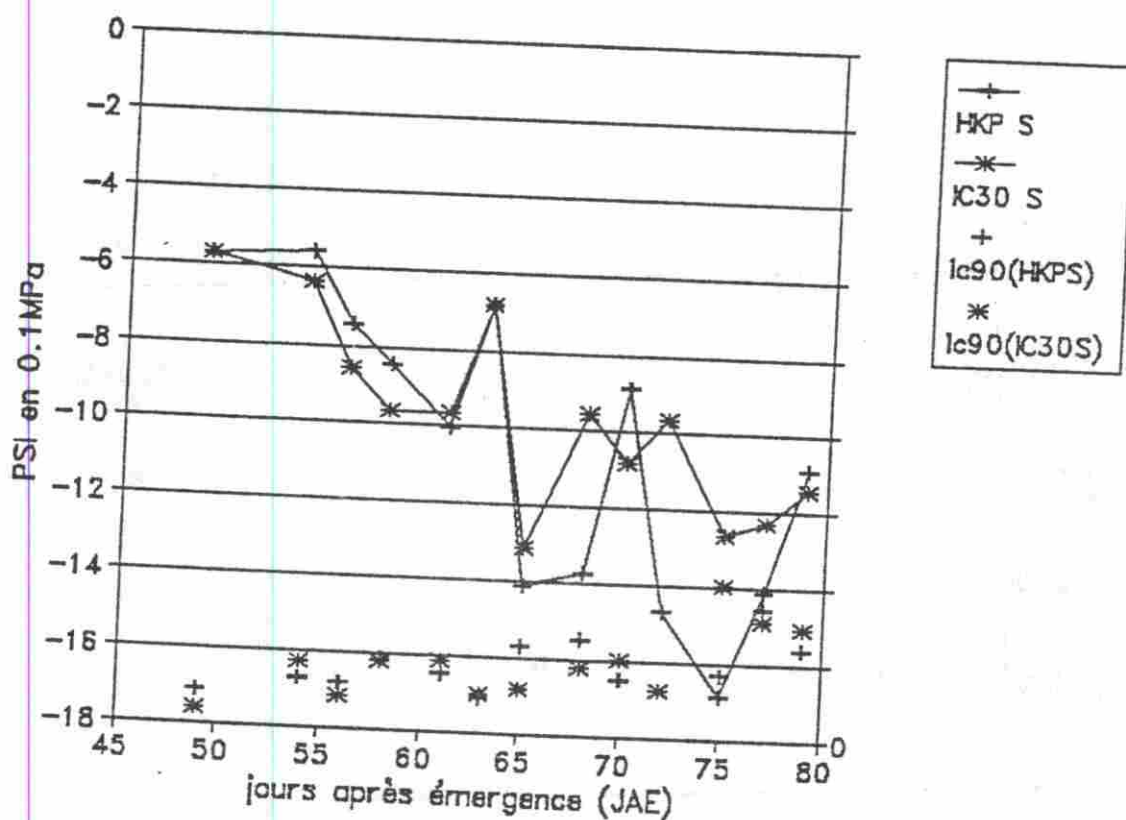


Figure 4 : Evolution au cours du temps du potentiel hydrique foliaire, comparaison IC30s/HKPs (Dollon F., 1992).

ic90: intervalle de confiance à 90%

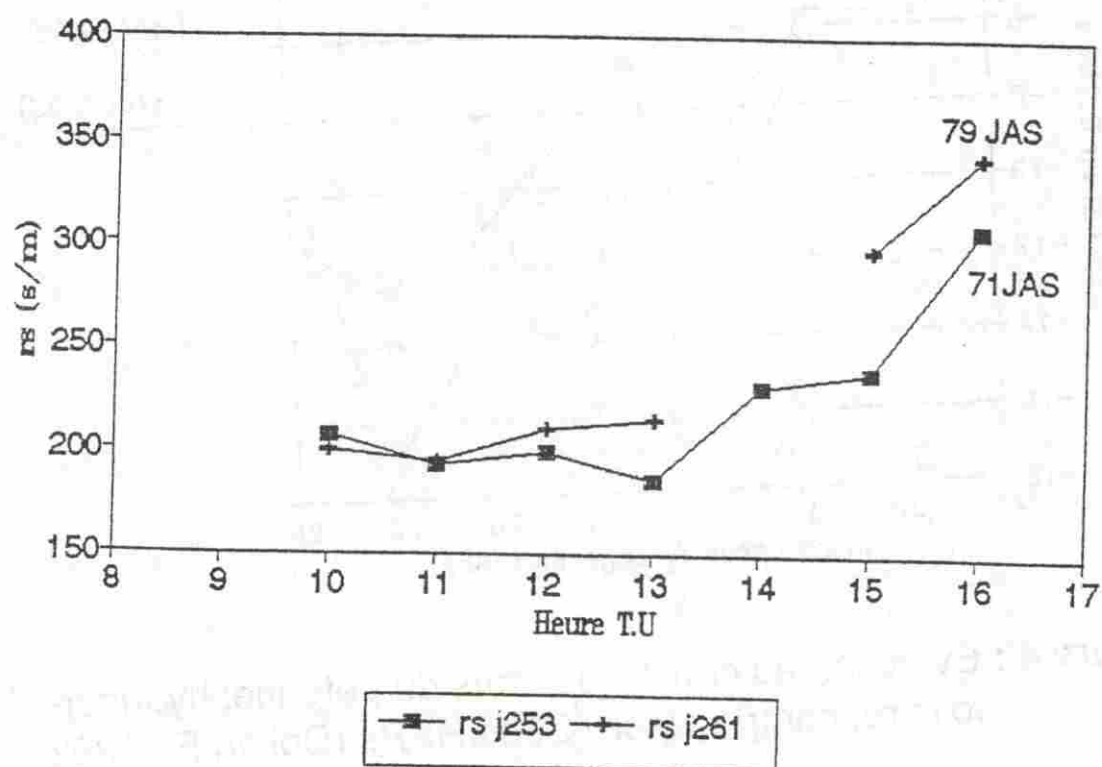
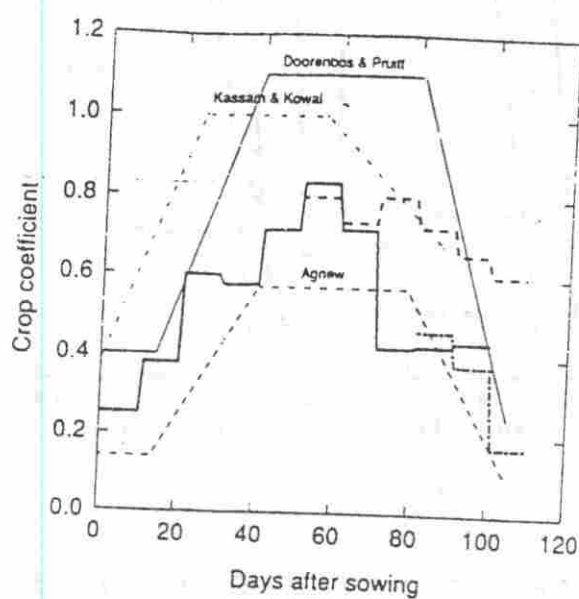


Figure 5 : Exemples de valeurs de résistances stomatiques des feuilles de mil pour les jours 253 et 261, 1992 (Amadou M. 1994).

EVAPORATION FROM MILLET IN NIGER



A comparison of 10 day average crop coefficients calculated as the ratio E_a/E_p in 1985 (- - -), 1986 (- - -) and 1987 (—). For comparison the millet crop coefficients given by Agnew (1991), Kassam and Kowal (1975) and Doorenbos and Pruitt (1977) are also shown.

Figure 6 : Comparaison des valeurs moyennes de coefficient cultural du mil déterminées suivant plusieurs expériences (Wallace et al., 1993).

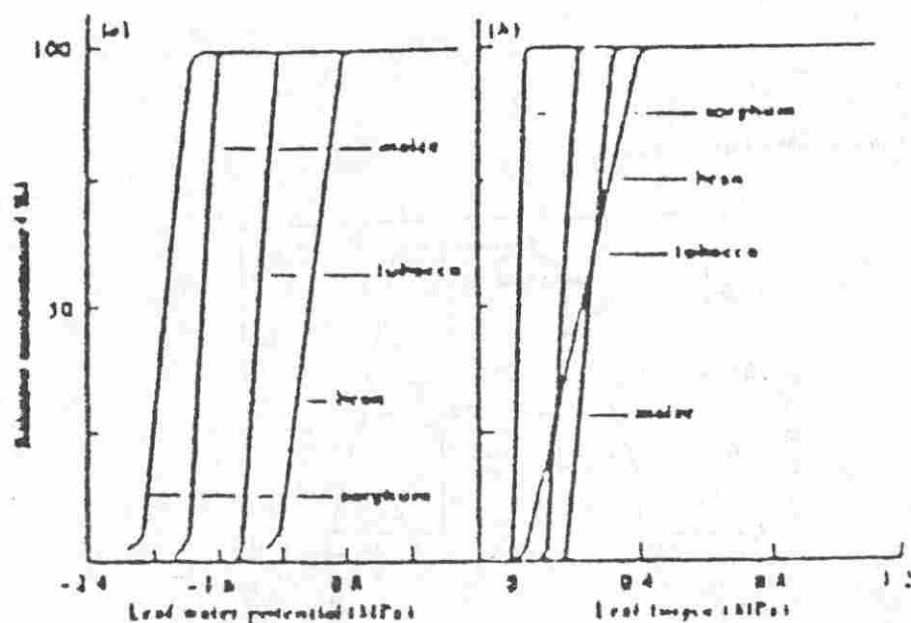
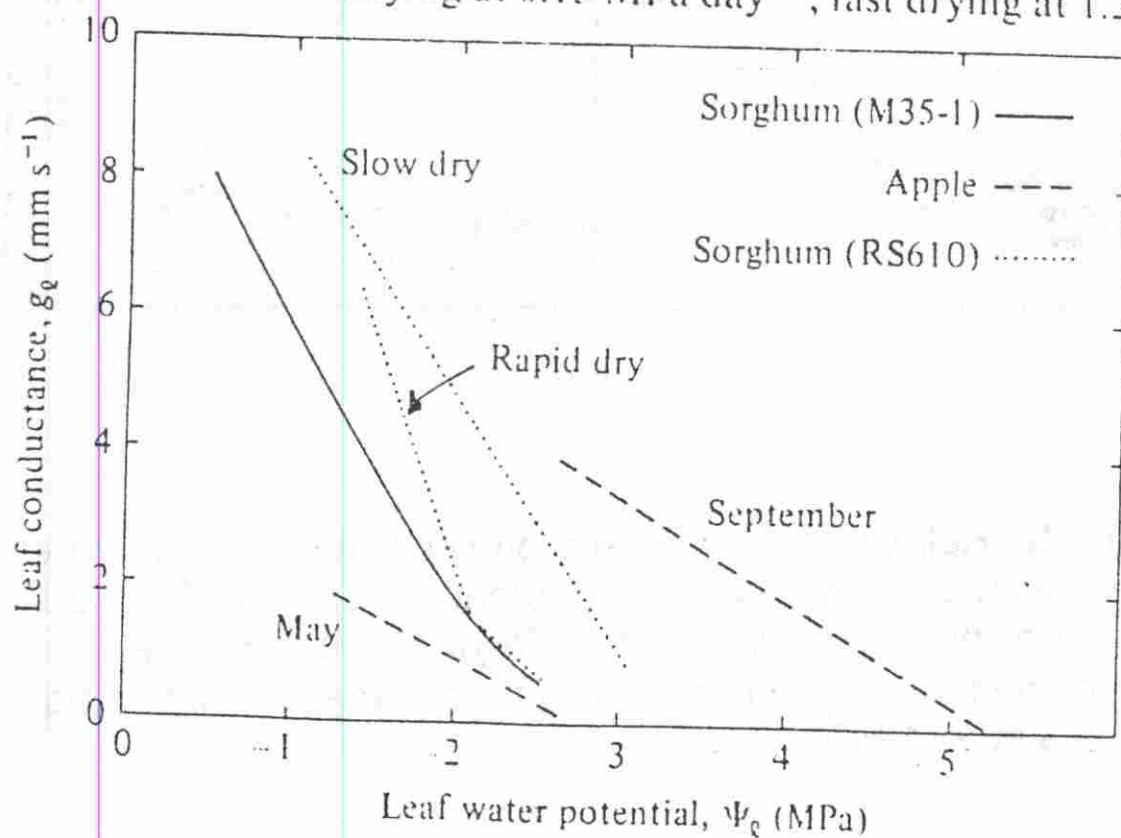


Figure 7 : Evolution de la conductance foliaire de plusieurs espèces pour un même niveau d'éclairement, en fonction de (a) le potentiel hydrique et (b) le potentiel de turgescence du tissu foliaire. (DAVIES, 1981).

Fig. 6.9. Relationships between g_L and Ψ_L for apple (after Lakso 1979) and sorghum (data from Henzell *et al.* 1976, and Jones & Rawson 1979). Slow drying at $0.15 \text{ MPa day}^{-1}$, fast drying at 1.2 MPa day^{-1} .



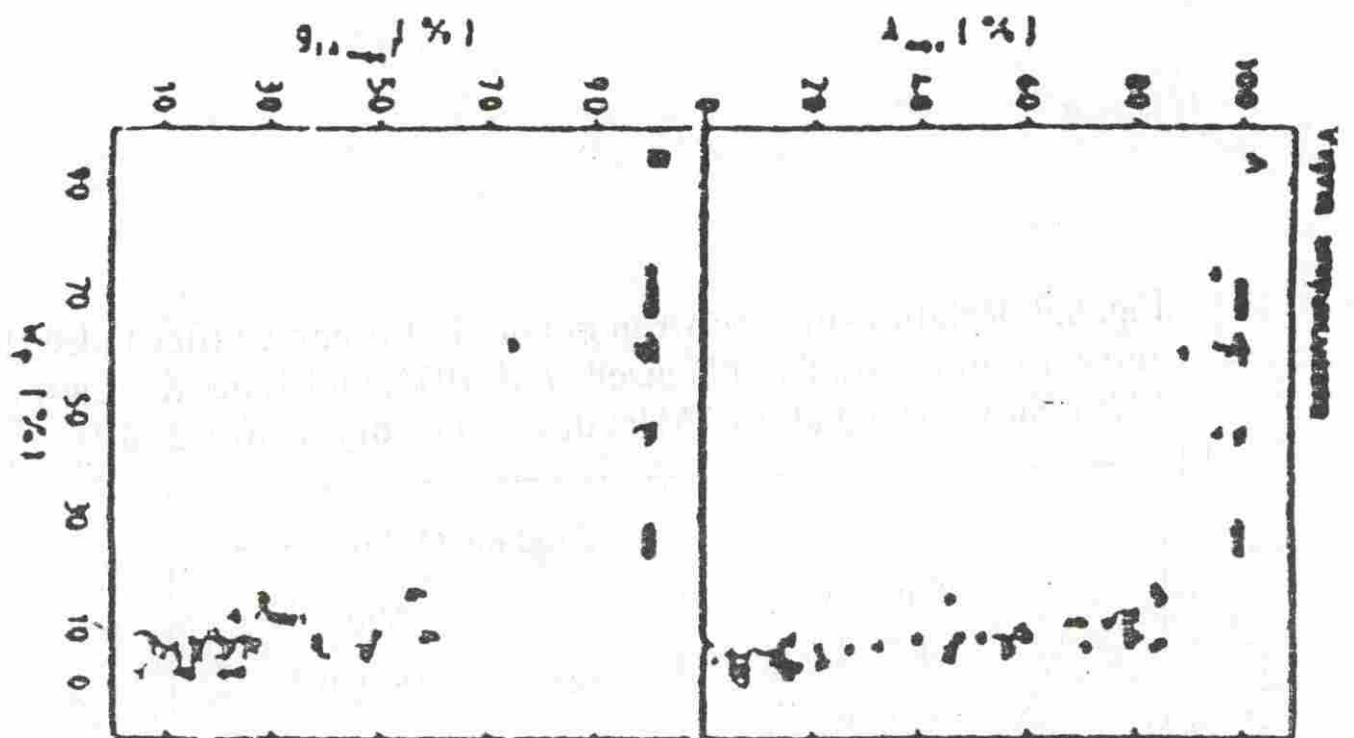


Figure 12 :Relation entre l'activité photosynthétique (A_{max}) et la conductance stomatique (G_{max}) lors de la diminution de la quantité d'eau extractible du sol (W_e). Symboles ouverts ou assèchement lent ; symboles pleins = assèchement rapide (Koppers et al. 1988).

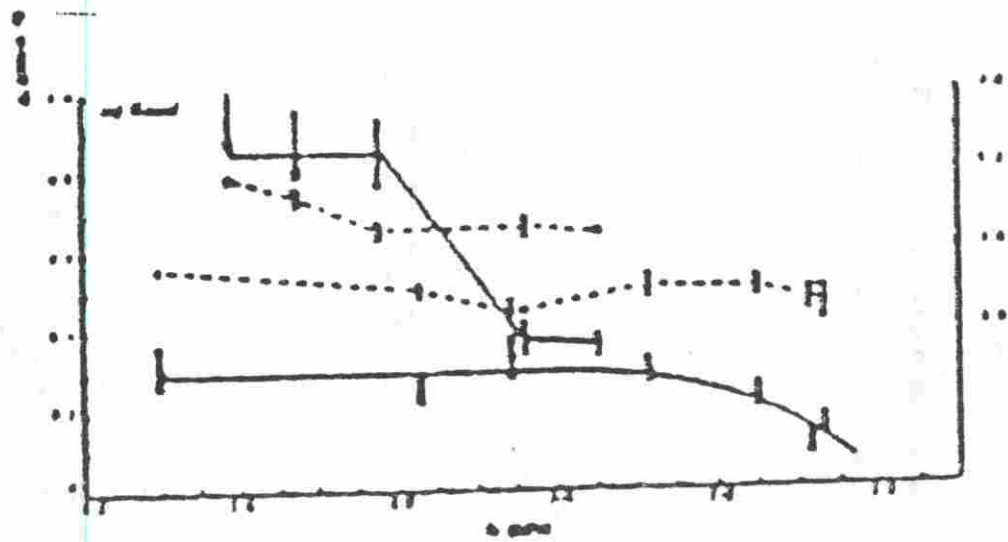


Figure 9 : Relation entre la conductance stomatique g_s (traits pleins) et le déficit de saturation de l'air des plants de Kenaf irrigués (\square) et non irrigués (\blacksquare). Les potentiels hydriques correspondants sont également indiqués pour les irrigués (O) et les non irrigués (\bullet) (MUCHOW et al. 1980).

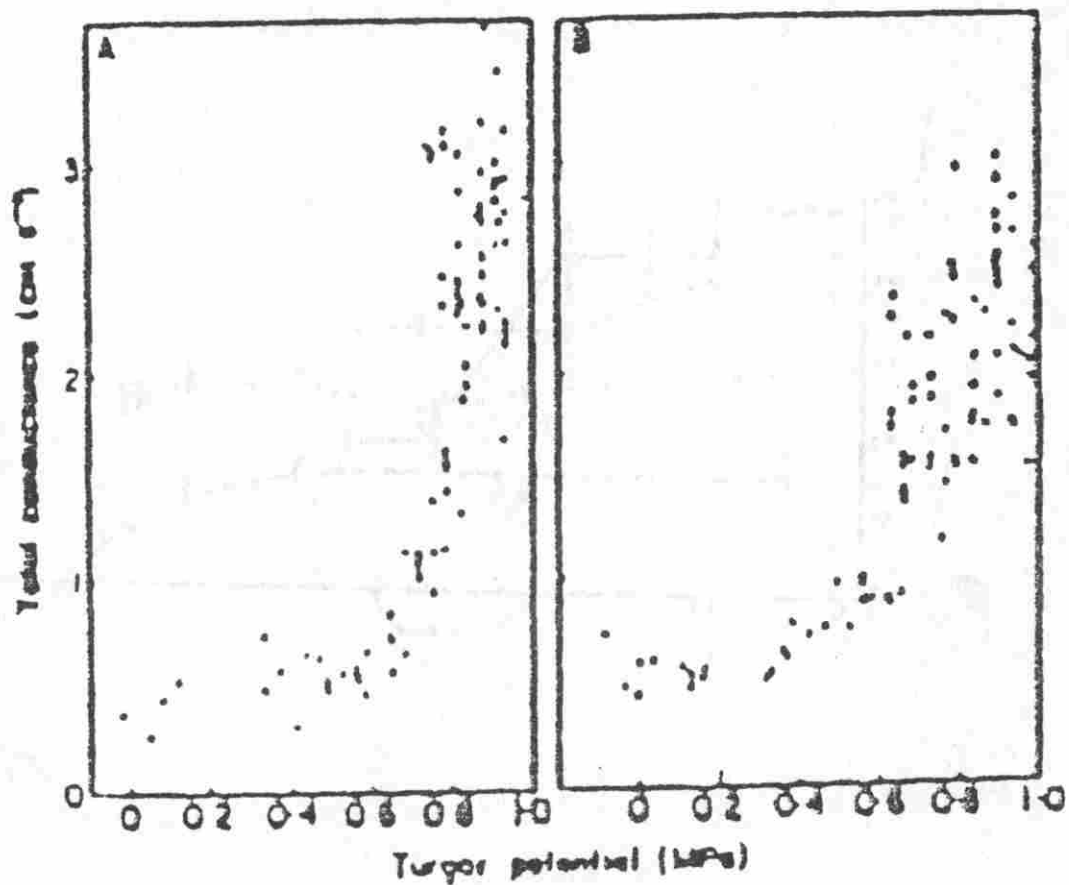


Figure 10 : Relation entre la conductance foliaire et le potentiel de turgescence de la feuille pour des plants de riz, variétés IR20, témoin (A) ou soumises à la sécheresse (B) 'HENSONS, 1983).

THEME IV

BESOINS EN EAU DES CULTURES CALCUL DES DÉBITS DE POINTE

Octobre 1999

MOSSI MAÏGA ILLIASSOU
INRAN/NIGER

I. INTRODUCTION

Qu'est ce que l'irrigation ?

L'irrigation est un ensemble de techniques culturales destinées à fournir aux végétaux par le truchement du sol toute l'eau mais seulement l'eau dont ils ont besoin pour se développer. Cette technique est tantôt appliquée comme appoint pour faciliter la croissance d'une culture pluviale en période de sécheresse, tantôt systématique dans le cas d'une culture dont le développement dépend de cet apport. L'irrigation peut se faire par submersion, par infiltration, par aspersion, etc.

Pourquoi la plante a-t-elle besoin d'eau ?

Selon l'espèce à laquelle elle appartient, 60 à 90% du matériel végétal de la plante est constitué d'eau. C'est l'eau qui permet l'absorption et la translocation des sels minéraux contenu dans le sol. C'est elle qui permet la photosynthèse en alimentant les cellules des feuilles et encore elle qui favorise la turgescence des fleurs pour permettre leur fécondation et donner ainsi de bonnes graines et semences.

Qu'est ce qui détermine les besoins en eau des cultures ?

Il en va pour nos plantes que pour nos vêtements, les plantes sèchent d'autant plus vite que la température s'élève, que la lumière du soleil est plus intense, que le vent souffle plus fort et que l'air est moins humide. Ce sont donc les facteurs météorologiques qui déterminent le potentiel d'évapotranspiration des cultures. Pour déterminer donc les besoins en eau des cultures, il faudrait tenir compte de tous les éléments ci-après : climat, cultures, système agronomique et intensité culturale, eau disponibles dans le sol, fertilité du sol, méthodes et pratiques culture et d'irrigation.

Calcul des besoins en eau des cultures.

Il est toujours nécessaire de connaître les données relatives aux besoins en eau des cultures quand il s'agit de planification régionale préliminaire des projets ou de calculer les besoins moyens et les besoins de pointe en vue de la conception générale d'un projet d'irrigation.

II. DEFINITIONS

1) Evapotranspiration potentielle : ETP

Elle représente la quantité d'eau nécessaire et suffisante à un gazon homogène, continu et fauché dont l'alimentation en eau n'est pas limitée, étant entendu que le végétal est sain et bien développé.

Pour prédire l'évapotranspiration ; on utilise des méthodes basées sur des variables climatiques. On distinguera ainsi les méthodes suivantes :

- Blaney Criddle
- Rayonnement
- Penman
- Evapotranspiration de Bac.

En fonction des données climatiques disponibles, on utilise l'une ou l'autre des méthodes.

2) Evapotranspiration maximale : ETM

C'est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif donné et dans des conditions climatiques données.

3) le coefficient cultural : Kc

Pour tenir compte de l'effet des caractéristiques culturales sur les besoins en eau des cultures, on propose des coefficients culturaux (Kc) qui permettent d'établir la relation entre l'ETP et l'évapotranspiration de la culture. Il s'exprime par la relation suivante :

$$Kc = ETM/ETP$$

Pour une même culture, il varie essentiellement avec :

- le stade végétatif ;
- la variété ;
- la densité de plantation.

Ils sont déterminés pour presque toutes les cultures d'une certaine importance économique.

4) la pluviométrie efficace : Pe

Il s'agit de la différence $Pe = P - R$ (pluie réellement infiltrée)

Si $P < 20 \text{ mm}$

$R = 0$

$Pe = P$

Si $P > 20 \text{ mm}$

$Pe = 0,9P$

5) Percolation

Elle constitue le volume d'eau infiltré après stabilisation de l'infiltration. Elle varie de 1 à 2 mm/jour pour des sols particulièrement imperméables, de 5 à 8 mm/jour pour des sols moyennement imperméables.

III. DETERMINATION DES BESOINS EN EAU AU NIVEAU D'UN PROJET

On appelle besoin en eau la valeur maximale d'eau permettant :

- aux cultures d'évapotranspirer à l'ETM ou au moins l'évapotranspiration optimale ;
- de couvrir les besoins de saturation du sol, de submersion, de drainage et de renouvellement de l'eau (riziculture)
- de couvrir les besoins de lessivage (irrigation aux eaux saumâtres).

Un tableau résume la démarche de calcul des besoins.

1) Pas de temps de calcul

Il est nécessaire de prendre pour le calcul de bilan hydrique, le pas de temps le plus réduit possible. Le pas de temps habituel est le mois ou mieux le stade végétatif. Il est possible selon les données dont on dispose de descendre à un pas de temps décadaire ou pentadaire.

2) Choix de la pluviométrie

Le problème consiste à choisir une pluviométrie de référence comme base de calcul des besoins en eau. L'aménagement hydro-agricole est réalisé pour subvenir aux besoins en eau non seulement les années moyennes ou les années humides mais également les années les plus sèches que l'on étudie statistiquement en se basant sur un échantillon avec des données tirées sur une période d'années la plus grande possible.

Dans les conditions soudano-sahéliennes, la saison humide ne dure que quelques mois dans l'année. Les aménagements sont conçus pour produire non seulement en saison humide mais aussi en saison sèche. Calculés pour une période où l'ETP est maximale et la pluviométrie nulle, le dimensionnement suite aux besoins en eau n'est pas affecté par le choix de la période de retour.

Ainsi donc le calcul fréquentiel prendra la pluviométrie quinquennale pour le dimensionnement du réseau.

3) Choix des ETP

L'ETP représentant une faible variabilité inter-annuelle, c'est l'ETP moyenne qui est utilisée pour les calculs des besoins en eau.

4) calcul des besoins globaux

a) Les besoins nets

Les besoins nets correspondent aux besoins définis précédemment calculés par pas de temps. L'expression des besoins nets peut se simplifier sous la forme :

$$BN = ETM - Pe$$

En riziculture :

$$BN = ETM + s + h + Perc. - Pe$$

+s = variation de la lame d'eau

+h = lame d'eau de saturation

Perc = percolation

b) Les besoins bruts

Il s'agit de la quantité qu'il faut réellement mobiliser pour satisfaire aux besoins nets et qui tient compte des pertes dans le transport de l'eau jusqu'à la plante.

$$BB = BN / \text{Eff.}$$

Eff. : efficience du réseau

IV. DETERMINATION DES DEBITS CARACTERISTIQUES

1) Débits fictifs continus : DFC

C'est le débit unitaire que devrait transporter le réseau s'il fonctionnait 24 h/24 tous les jours.

$$DFC = Q_m \times 1000 / 86400 \times n_j \text{ en l/s/ha}$$

Q_m = volume total en m^3 /ha

N_j = nombre de jours d'irrigation

2) débit maximum de pointe : DMP

C'est le débit réel pour lequel le réseau devra être calibré. Il tient compte de la durée réelle de l'irrigation. Il s'exprime par la relation suivante.

$$DMP = DFC \times 24/Nh/j \text{ en l/s/ha}$$

Nh/j = nombre d'heures d'irrigation par jour.

C'est à partir de ces débits qu'est déterminé le quartier hydraulique qui correspond à l'ensemble des parcelles pouvant être irriguées à partir d'une main d'eau.

$$W = m/DMP$$

W = quartier hydraulique

M = main d'eau

DMP = débit maximum de pointe.

V. APPLICATION

Le calcul du bilan hydrique, la détermination des besoins en eau peut et doit être synthétiser sous la forme d'un tableau de calcul

L'application se portera sur le périmètre rizicole de Karaigorou où nous essayerons de calculer les besoins en eau du riz sur les 2 campagnes.

Le périmètre de Karaigorou couvre une superficie de 144 ha dont 7,6 ha de pépinière. Il est situé à environ 30 km de Niamey

Pour le calcul des besoins et la détermination des débits caractéristiques, nous aurons besoins des données suivantes.

- L'ETP ;
- La pluviométrie ;
- Les coefficients culturaux ;
- La percolation ;
- L'efficience du réseau

Elles sont récapitulées dans les tableaux suivants :

Campagne sèche

MOIS	NOVE	DECE	JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI
DUREE	15,0	31,0	31,0	28,0	31,0	30,0	31,0
ETP	62,4	124,0	129,9	141,4	176,4	189,6	203,7
Kc	0,8	0,9	1,0	1,2	1,2	1,0	0,9
ETM	49,9	111,6	129,9	169,7	211,7	189,6	183,3
Peff	0,4	0,0	0,0	0,2	2,1	4,9	32,2
ETM-Peff	49,5	111,6	129,9	169,5	209,6	184,7	151,1
SATURATION	100,0		100,0				
LAME d'EAU			50,0		50,0		
PERCOLATION	7,5	15,5	15,5	14,0	15,5	15,0	15,5
BN (mm)	157,0	127,1	295,4	183,5	275,1	199,7	166,6
BB(eff. 70%)	224,3	181,6	422,0	262,1	393,0	285,3	238,0
BB (m3/ha)	2243,1	1815,7	4219,9	2621,1	3929,5	2852,9	2380,0
DFC	1,7	1,7	1,6	1,1	1,5	1,1	0,9
DMP							

Rappel :

$$ETM = ETP \times Kc$$

$$BN = (ETM) - Pe + Perc. + s + h$$

$$BB = BN \times 10 / eff.$$

$$Eff. = \text{efficience} = 70\%$$

$$DFC = Qm \times 1000 / nj \times 86400$$

$$DMP = DFC \times 24 / nh$$

$$\text{Percolation} = 0,5 \text{ mm/jour}$$

Campagne sèche

MOIS	Nove	Dec	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai
DUREE	15,0	31,0	31,0	28,0	31,0	30,0	31,0
ETP	62,4	124,0	129,9	141,4	176,4	189,6	203,7
Kc	0,8	0,9	1,0	1,2	1,2	1,0	0,9
ETM	49,9	111,6	129,9	169,7	211,7	189,6	183,3
Pe	0,4	0,0	0,0	0,2	2,1	4,9	32,2
ETM-Pe	49,5	111,6	129,9	169,5	209,6	184,7	151,1
SATURATION	100,0		100,0				
LAME d'EAU			50,0		50,0		
PERCOLATION	7,5	15,5	15,5	14,0	15,5	15,0	15,5
BN (mm)	157,0	127,1	295,4	183,5	275,1	199,7	166,6
BB(eff. 70%)	224,3	181,6	422,0	262,1	393,0	285,3	238,0
BB (m3/ha)	2243,1	1815,7	4219,9	2621,1	3929,5	2852,9	2380,0
DFC	1,7	1,7	1,6	1,1	1,5	1,1	0,9
DMP							

Calculer les besoins en eau et les débits caractéristiques pour la campagne d'hivernage.

Campagne d'hivernage

MOIS	Juin	Juil	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
DUREE	20,0	10,0	21,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0
ETP	125,8	52,3	109,8	142,9	149,4	154,1	124,8	124,0
Kc	0,9	0,9	0,9	1,0	1,2	1,2	1,0	0,6
ETM	113,2	47,1	98,8	142,9	179,3	184,9	124,8	74,4
Pe	77,0	45,1	94,7	176,0	74,7	12,1	0,4	0,0
ETM-Pe								
SATURATION	100,0		100,0					
LAME D'EAU			50,0		50,0			
PERCOLATION								
BN (mm)								
BB (eff.70%)								
BB (m3/ha)								
DFC								
DMP								

THEME V

COURS D'INITIATION A L'UTILISATION DU LOGICIEL CROPWAT

Octobre 1999

MOSSI MAÏGA ILLIASSOU
INRAN/Niger

INTRODUCTION

L'irrigation joue un rôle très important dans l'effort d'accroître et de soutenir la production alimentaire face à la croissance rapide de la population. Ceci implique le maintien des conditions optimales d'humidité du sol par une application opportune de l'eau ainsi que le drainage de toute eau en excès.

Le planning et la gestion des irrigations comportent des décisions concernant l'étude des projets d'irrigation et la gestion conséquente de l'eau à tous les niveaux du projet, couvrant la détermination des plans de distribution individuelle c'est à dire la décision sur **quand** irriguer, **où** irriguer et **quelle quantité** d'eau appliquer ?

Ces décisions sont basées sur la relation entre l'utilisation de l'eau par une culture et la capacité de stockage de l'eau du sol. Les taux d'utilisation de l'eau par une culture sont à leur tour, en rapport très étroit avec les conditions atmosphériques. Ainsi, le processus comporte une connaissance de la météorologie, des caractéristiques physiques du sol et des caractéristiques de la culture.

Le CROPWAT est un logiciel de calcul des besoins en eau des cultures et des besoins d'irrigation à partir des données concernant le climat et les cultures. En outre, il permet l'élaboration de programme d'irrigation pour différentes conditions de gestion et de calcul de l'approvisionnement en eau d'un périmètre pour différents plans de culture.

Le programme est conçu comme un outil pratique pour aider les ingénieurs et les agronomes à faire les calculs standards pour la conception et la gestion de périmètres irrigués. Il permettra en outre le développement de recommandations pour une amélioration des pratiques d'irrigation et la planification des programmes d'irrigation dans des situations variées d'approvisionnement en eau.

Ce cours vise un double objectif :

- familiariser les stagiaires à l'environnement dudit logiciel ;
- assurer la maîtrise dudit logiciel par les stagiaires pour les calculs de l'évapotranspiration de référence, des besoins en eau des cultures (riz et autres cultures) ainsi que le pilotage des irrigations.

Rappel :

Evapotranspiration de référence (ET_o) : l'évapotranspiration de référence est définie comme étant la consommation idéale d'une plante couvrant bien le sol, alimentée d'une façon optimum et en pleine végétation.

Mesure et calcul de l'ETP :

Mesure : une estimation de l'ETP peut être réalisée en mesurant l'évapotranspiration des lysimètres sur lesquels est maintenu du gazon croissant sous des conditions requises de référence. Les alentours du lysimètre doivent être couverts par le même gazon sur une

superficie suffisamment grande pour que les effets d'advection sur les lysimètres soient négligeables.

Calcul : les mesures de l'ETP nécessitant la mise en place d'installations lourdes et coûteuses, les chercheurs ont essayé de trouver des relations entre l'ETP d'une part et les conditions climatiques et la culture d'autre part. C'est ainsi que parmi les méthodes de calcul il y a la **méthode de Penman** généralement utilisée par la FAO car faisant intervenir plusieurs paramètres à savoir : **la température, l'humidité, la vitesse du vent et des heures d'insolation effective ou du rayonnement** et qui permettent de donner des résultats satisfaisants pour estimer l'effet du climat sur les besoins en eau des cultures.

Le coefficient cultural : pour tenir compte de l'effet des caractéristiques culturelles sur les besoins en eau des cultures, on propose des coefficients culturaux (K_c) qui permettent d'établir la relation entre ETo et l'évaporation de la culture, ET (culture). Le K_c représente le rapport entre l'évapotranspiration de la culture, $ET(culture)$, et l'évapotranspiration de la culture de référence, ETo , l'une et l'autre étant cultivées dans de vastes champs et dans des conditions de croissances optimales. $ET(culture)$ s'obtient donc en calculant : $K_c \times ETo$.

Précipitation :

Définitions de la précipitation :

Précipitation moyenne mensuelle : moyenne déterminée mathématiquement pour une série de relevés pluviométriques. Cette donnée est la plus communément disponibles. Elle est utilisée pour le calcul des besoins en eau des cultures lorsqu'on veut représenter les conditions climatiques moyennes.

Précipitation de projet : la quantité de précipitation sur laquelle on peut compter 3 années sur 4 ou 4 années sur 5. Elle correspond à une probabilité de dépassement de 75% ou 80% et représente une année "normale" sèche. La précipitation ayant une probabilité de dépassement de 80% est utilisée dans le dimensionnement d'un réseau d'irrigation.

Précipitation en année humide, normale et sèche : définie comme étant la pluie ayant une probabilité de dépassement respectivement de 20, 50 et 80%, représentant une année humide, normale et sèche. Les trois valeurs sont utiles pour la programmation de l'alimentation en eau d'irrigation et pour la simulation de la gestion de l'eau d'irrigation. Les précipitations en année normale (probabilité de 50%) sont, d'une manière générale, bien représentées par les précipitations moyennes.

Pluie efficace : elle est définie comme étant la fraction, des précipitations qui est effectivement utilisée par la culture après déduction des pertes par ruissellement de surface et par percolation profonde. La pluie efficace est utilisée pour déterminer le besoin d'irrigation de la culture concernée.

Besoins nets d'irrigation : ils sont déterminés par la relation : $ET(culture) - Peff$

CROPWAT : un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation

Menu principal :

- 1- Calculs de ETo Penman-Monteith**
- 2- Besoins en eau des cultures**
- 3- Pilotage des irrigations**
- 4- Alimentation en eau des périmètres**

Ces options correspondent aux opérations suivantes :

- 1- calcul de l'évaporation de référence, ETo, selon la méthode de Penman-Monteith ;
- 2- calcul des besoins en eau des cultures ;
- 3- calcul de la programmation (pilotage) des irrigations à partir des résultats obtenus à l'option 2 ;
- 4- la 4^{ème} option bien que prévue n'est pas exécutée par le programme CROPWAT

I. calcul de l'évapotranspiration de référence (ETo)

Dans le menu principal, on choisit l'option 1. Le programme propose alors 2 possibilités :

- a) entrée de données climatiques pour le calcul de ETo
- b) extraction de données se trouvant sur le disque

1. : entrée de données climatiques :

Les caractéristiques de la station où les données ont été collectées doivent être précisées :

nom du pays :
station climatique :
altitude (mètre) :
latitude (0 – 80°L) :
longitude (0 –180L) :

ainsi que **le nombre de mois** sur lesquels les calculs vont être faits.

Ensuite, il faut procéder à l'entrée des données climatiques dont :

La température ;
L'humidité de l'air ;
La vitesse du vent ;
L'ainsolation journalière.

Les températures : elles sont données en degrés Celcius comme température moyenne ou comme températures maximale et minimale à partir desquelles la moyenne est calculée.

L'humidité de l'air : elle peut être introduite sous 2 formes :

- humidité relative exprimée en pourcentage (10-100) ;
- pression de vapeur en Kpa (1-9)

Le programme distingue automatiquement entre pression de vapeur (<10Kpa) et humidité relative (10-100).

Insolation journalière : elle peut être introduite sous 2 formes :

- pourcentage (20-100) du rapport insolation/longueur du jour ;
- fraction (0-1) : insolation/longueur du jour ;
- heure d'insolation (1-20).

Les valeurs >20 sont interprétées comme insolation journalière en % ; les valeurs >1 et <20 comme insolation en heures.

La vitesse du vent : la vitesse du vent peut être introduite sous deux formes : km/jour (10-500) ou m/s (0-10).

Les valeurs >10 sont interprétées comme vitesse du vent en km/jour ; les valeurs <10 sont interprétées comme vitesse du vent en m/s. Toutes les valeurs concernent des moyennes de la course journalière du vent mesurée sur 24 heures.

Application 1 : calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_o)

Soit les données suivantes :

Projet : Saga		Station climatique : Niamey		
Latitude : 13 LN		Altitude : 200 mètres		
	Température (°C)	Humidité (%)	Vitesse du vent (km/j)	Insolation journalière (heures)
Janvier	25	37	0	9.6
Février	27	31	0	9.4
Mars	30.6	33	0	9.2
Avril	33.1	44	0	8.1
Mai	33.6	57	0	8.7
Juin	31.8	77	0	8.8
Juillet	28.9	82	0	8.5
Août	27.3	88	0	8.2
Septembre	28.3	81	0	8.6
Octobre	30.2	73	0	9.1
Novembre	28.4	41	0	9.4
Décembre	25.2	42	0	9.0

A partir du logiciel CROPWAT, calculer l'ET_o.

1-2 : Extraction des données se trouvant sur le disque :

Cette option permet d'utiliser des données d'ET_o ayant été auparavant sauvegardées sur le disque dur. Le programme affiche l'ensemble des fichiers de données disponibles avec une extension .PEN.

Pour chacune de ces deux opérations, le programme pose les questions suivantes :

- Voulez-vous imprimer les données climatiques ?
- Y-a-t-il des modifications ? si oui, précisez le nombre de mois sur lesquels doivent porter les corrections.
- Voulez-vous sauvegarder les données concernant l'ETo ? si oui, il faut donner le nom sans extension.
- Voulez-vous retourner au menu principal ? si oui, le programme retourne au menu principal :

Menu principal :

1. **Calculs de Eto Penman-Monteith**
2. **Besoins en eau des cultures**
3. **Pilotage des irrigations**
4. **Alimentation en eau du périmètre**

2. Calcul des besoins en eau des cultures :

Cet élément du programme forme la partie centrale du logiciel CROPWAT et est subdivisé en trois parties distinctes :

- 1- l'entrée et le traitement des données mensuelles concernant l'évaporation et la précipitation ;
- 2- l'entrée des données concernant la culture et la date de plantation ;
- 3- le calcul des besoins en eau des cultures.

2-1 : entrée des données climatiques :

Pour le calcul des besoins en eau des cultures, les données mensuelles concernant l'évapotranspiration de référence (ETo) et les précipitations sont requises. L'entrée des données concernant l'ETo et les précipitations, peuvent s'effectuer de quatre façons différentes :

- 1- entrées des valeurs mensuelles de ETo et de pluies sur clavier ;
- 2- lecture des valeurs de ETo et de pluies à partir d'un fichier climatique (*.CLI) sauvegardé auparavant. Une liste des fichiers climatiques disponibles sur disque sera affichée ;
- 3- lecture des valeurs de ETo se trouvant sur un fichier Penman (*.PEN) et entrée des valeurs mensuelles de pluies sur clavier. Une liste des fichiers disponibles de ETo sera affichée ;
- 4- retour au programme Penman-Monteith pour calculer ETo à partir des données climatiques : la température, l'humidité, l'insolation et la vitesse du vent.

N.B : Lors de la sélection des données climatiques mensuelles, une considération spéciale doit être donnée aux précipitations. Pour la planification, on prend normalement les valeurs moyennes mensuelles, tandis que pour la conception on utilise des valeurs plus extrêmes correspondant à une certaine probabilité de dépassement (70-80%). Dans ce cas, l'analyse des séries d'observations de longue durée est nécessaire.

2-2 : Entrée des données concernant la culture et la date de plantation :

Les données sur la culture concernent : la durée des phases de croissance et les coefficients culturaux (K_c) pour les différentes phases.

Pour procéder au pilotage des irrigations qui est l'option 3 du menu principal, des données additionnelles sont nécessaires. Il s'agit de la profondeur d'enracinement aux différents stades de croissance, de l'épuisement admissible et les coefficients de réponse des rendements.

- la profondeur d'enracinement (P) : le volume d'eau qui peut être utilisée effectivement par la culture, défini comme étant la Réserve d'humidité du sol Facilement Utilisable (RFU), dépend directement de la profondeur d'enracinement de la culture. Deux valeurs sont requises :

- la profondeur d'enracinement à la phase initiale, normalement prise égale à 0.25 – 0.30 m, représentant la profondeur du sol à laquelle les jeunes plants peuvent extraire leur eau ;
- la profondeur d'enracinement à la phase de plein développement, au début de la mi-saison. Pour la plupart des cultures de plein champ irriguées les valeurs varient entre 1.0 et 1.4, celles des légumes entre 0.5- 1.0 ;
- la profondeur d'enracinement aux stades de développement et d'arrière-saison est interpolée par le programme et ne doit pas être introduite par l'utilisateur.

- le tarissement admissible (p) représente le niveau critique de l'humidité du sol à partir duquel le stress dû au manque d'eau se fait sentir, affectant l'évapotranspiration et la production de la culture. Les valeurs sont exprimées en fraction de l'humidité totale disponible du sol et varie normalement entre 0.4 et 0.6, avec des valeurs inférieures pour des cultures sensibles à système racinaire limité dans des conditions d'évaporation élevée, et des valeurs supérieures pour des cultures à enracinement profond et dense et dans des conditions de faible évaporation.
- Le coefficient (k_y) de réponse du rendement pour estimer les réductions dues au stress hydrique ; les coefficients de réponse des rendements doivent être donnés pour les différentes phase de croissances

Application 2 : calcul des besoins en eau des cultures

Soit à calculer les besoins en eau de deux cultures : le riz et le sorgho.

Les tableaux suivants résument les données sur ces cultures :

Données concernant le riz :

Culture : riz Phase de Croissance	Durée de la phase	Coefficient Cultural
Pépinière	30 jours	1.20
Préparation du sol	20 jours	-----
Phase initiale (A)	20 jours	1.10
Phase de développement (B)	30 jours	-----
Mi-saison ©	40 jours	1.05
Arrière-saison (D)	30 jours	0.80
Total	150 jours	
Superficie des pépinières	10%	
Préparation du sol	180 mm	
Taux de percolation	3.0 mm/jour	

Données concernant le sorgho :

Culture : sorgho						
Phase de croissance		Initiale	Dévelop	Mi-saison	Arrière saison	Total
Durée	[jours]	20	40	30	30	120
Coefficient cultural	[coeff.]	0.40	---	1.15	0.50	
Profondeur d'enracinement	[mètre]	0.30	---	1.40	1.40	
Tarissement admissible	[fract.]	0.60	---	0.50	0.80	
Coeff. De réponse du rendement	[coeff.]	0.20	0.40	0.55	0.20	0.90

Soit les données climatiques suivantes collectées à Niamey par la météorologie nationale :

	Eto moy./jour (mm)	Pluviométrie /mois (mm)
Janvier	4.19	-
Février	5.05	-
Mars	5.69	-
Avril	6.32	18.5
Mai	6.57	15.3
Juin	6.29	94.8
Juillet	5.23	170.9
Août	4.61	209.2
Septembre	4.98	70.2
Octobre	4.97	-
Novembre	4.16	-
Décembre	4.00	-

3. Pilotage des irrigations

Le pilotage des irrigations se fait après le calcul des besoins en eau des plantes sauf pour le riz. Ainsi donc après le calcul des besoins, il apparaît un menu qui comprend entre autre :

- procéder au pilotage des irrigations du sorgho
- corriger la date de plantation du sorgho
- choisir une autre culture
- choisir une nouvelle série de données climatiques

Le calcul du pilotage des irrigations est basé sur le bilan d'eau dans le contrôle des flux d'eau entrant et sortant (évaporation, pluie, irrigation) dans la zone des racines est fait sur une base journalière. Les données requises pour les calculs concernent l'évaporation, les précipitations, la culture et le sol.

Les données concernant l'évaporation, les précipitations et la culture vont servir pour le calcul des besoins en eau de la culture qui ont été abordées par ailleurs.

Données concernant le sol :

Les paramètres du sol sont très importants pour le pilotage des irrigations. Pour l'entrée des données concernant le sol, nous avons le menu suivant :

Entrer de nouvelles données

Extraire les données concernant le sol du disque

Rappel :

4. **l'eau utilisable (EU ou Sa)**, définie comme étant la différence entre la teneur en humidité du sol à la capacité au champ et au point de flétrissement. Exprimée en mm/m, elle représente la quantité maximum d'eau disponible à la culture et dépend de la texture, de la structure et de la teneur en matière organique du sol. Des valeurs indicatives pour les différentes classes de texture du sol sont :

Grossier	Sableux	Limoneux	Argileux		
EU	60	100	140	180	mm/m

5. **Le tarissement initial de l'humidité du sol (%EU)** indiquant l'assèchement du sol au début de croissance. Une valeur par défaut de 0% représente un profil du sol entièrement humide, 100% est un sol au point de flétrissement. Dans la plupart des cas, seule une estimation peut être faite sur des conditions initiales d'humidité du sol, de la culture et des périodes précédentes de sécheresse.

Une fois que les données sont rentrées, apparaît cette boîte de dialogue qui correspond à l'option de fréquence et qui se rapporte à la question "à quel moment l'irrigation doit elle être appliquée" :

EVALUATION ET SIMULATION

1. Chaque irrigation est définie par l'utilisateur

IRRIGATION OPTIMALE

2. Irrigation au tarissement critique
3. Irrigation en dessous ou au-dessus du tarissement critique (%RFU).

IRRIGATION PRATIQUE

4. Irrigation par intervalles fixés par phase
5. Irrigation à un degré fixé de tarissement (mm)

IRRIGATION DEFICITAIRE

6. Irrigation à une réduction donnée de Et culture (%)
7. Irrigation à une réduction donnée de rendement (%)

CULTURE PLUVIALE

8. Pas d'irrigation, uniquement les précipitations

Pour l'évaluation et la simulation

Option 1 : Les tours d'eau sont définis par l'utilisateur. Cette option est utilisée pour évaluer les pratiques d'irrigation, pour simuler tout programme alternatif d'irrigation et en particulier pour affiner la programmation des irrigations développée dans d'autres options.

Pour l'irrigation optimale

Option 2 : l'eau d'irrigation est appliquée chaque fois que le niveau critique de l'humidité du sol est atteint et que l'humidité du sol facilement utilisable (RFU) est épuisée. Elle est définie comme étant égal à 100% de la RFU.

Irrigation lorsque la RFU est épuisée à 100%

Option 3 : l'eau d'irrigation est appliquée chaque fois qu'un certain niveau de l'humidité du sol, défini comme étant un pourcentage de RFU est atteint. Utile pour fixer un niveau de sûreté au-dessus de l'humidité du sol critique (par exemple 80% de RFU) ou pour permettre un certain niveau de stress (par exemple 120% de RFU).

Pourcentage fixé de RFU auquel l'irrigation est nécessaire (%) ? 80

Pour une irrigation pratique où le pilotage est ajusté à la méthode d'irrigation du champ et aux conditions d'alimentation en eau :

Option 4 : l'eau d'irrigation appliquée à des tours d'intervalles fixés. Appropriée en particulier dans un système d'irrigation par gravité avec une distribution rationnelle de l'eau comme on le rencontre dans la majorité des périmètres irrigués. Quoiqu'il peut en résulter une sur-irrigation dans les phases initiales et sous-irrigation dans la saison de pointe, des tours d'irrigation fixés présentent d'importants avantages opérationnels.

Option 5 : l'eau d'irrigation est appliquée chaque fois qu'une quantité prédéterminée d'eau a été épuisée. Cette option convient en particulier pour ajuster le programme des irrigations à la méthode d'irrigation au champ. Une quantité fixée d'eau est donnée dans chaque tour d'eau.

Donner le tarissement fixé en mm ? 40

Pour une irrigation déficitaire : en raison des insuffisances de l'alimentation en eau, nous visons une alimentation restreinte en eau tout en minimisant les réductions de rendement.

Option 6 : eau d'irrigation appliquée chaque fois qu'une réduction critique de l'évapotranspiration est atteinte. Elle est prédéterminée par l'utilisateur pour chaque phase en pourcentage de la réduction de l'évapotranspiration :

Réduction de ET : phase A (%) : ? 10 phase B (%) : ? 10
phase C (%) : ? 0 phase D (%) : ? 10

Option 7 : eau d'irrigation appliquée chaque fois qu'est atteint un niveau critique de la réduction du rendement. Celle-ci est déterminée par la sensibilité de la phase de croissance.

Donner le niveau du déficit de rendement (%) : ? 10

Option 8 : culture pluviale. L'irrigation n'est pas appliquée, seule les précipitations mensuelles données dans le fichier climat sont considérées.

Chaque fois qu'une option est choisie dans les options de fréquence, il apparaît cette boîte de dialogue qui indique les options d'application à choisir et qui se rapporte à la question "quelle quantité d'eau doit-on donner par tour d'irrigation" :

Option d'application de l'irrigation

Objectif : option d'application

EVALUATION ET SIMULATION l'utilisateur

1. Chaque dose d'application est définie par

IRRIGATION OPTIMALE

2. Arrosage jusqu'à la capacité au champ
3. Arrosage jusqu'en deçà ou au-dessous de la capacité au champ.

IRRIGATION PRATIQUE

4. Dose d'application fixée selon la méthode d'irrigation
5. Retour aux options de fréquence

Pour l'évaluation et la simulation

Option 1 : la dose est spécifiée par l'utilisateur pour chaque tour d'irrigation (déterminée à partir des données de terrain ou des données simulées). L'entrée des doses d'irrigation est réalisée en combinaison avec l'option 1 des fréquences.

Retour à l'option 1 du menu des fréquences pour définir chaque dose d'irrigation

Pour des irrigations optimales

Option 2 : la dose ramènera la teneur en humidité du sol à la capacité au champ. Elle correspond donc à la quantité d'humidité du sol épuisée dans la zone racinaire. Comme le taux d'épuisement dans la zone des racines varie normalement sur la saison de croissance, les doses peuvent varier substantiellement au cours de la saison.

Option 3 : la dose ramènera la teneur en humidité du sol à une quantité fixée au-delà ou en deçà de la capacité au champ. Cette option permet de prendre en compte le lessivage pour le contrôle de la salinité (application dépassant la capacité au champ) ou de s'accommoder aux précipitations possibles (application en deçà de la capacité au champ).

Donnez la dose d'application (+) ou (-) mm par rapport à la capacité au champ : ? 20

Pour une irrigation pratique, là où l'application est restreinte par une ou plusieurs conditions fixées par le système d'irrigation :

Option 4 : la dose est fixée par l'utilisateur et est normalement adaptée à la méthode d'irrigation. c'est la condition prédominante dans la plupart des systèmes d'irrigation par gravité qui ne permettent pas de grandes variations de dose. Cette option offre des avantages opérationnels considérables.

Donnez la dose d'irrigation fixée (mm) ? 40

Dose d'irrigation fixée : des valeurs indicatives pour différentes méthodes d'irrigation sont données ci-dessous :

Irrigation de surface :	irrigation par bassin	: 50 – 150 mm
	irrigation par sillons	: 30 – 60 mm
	irrigation par planche	: 40 – 80 mm
Irrigation par aspersion		: 30 – 80 mm
Irrigation au goutte à goutte		: 10 – 30 mm

Résultats du pilotage des irrigations

Les résultats du pilotage des irrigations sont résumés dans des tableaux. Ils présentent le calendrier des irrigations, l'utilisation totale de l'eau et les rendements des cultures.

Les tableaux présentent le calendrier des irrigations, l'utilisation totale de l'eau et les rendements des cultures. Ceci permet d'évaluer l'efficacité du pilotage choisi.

Calendrier des irrigations

Informations générales sur les données utilisées :

- avec des détails sur la culture, la date de plantation et les données concernant le sol ;
- les options de fréquence et critères d'application sélectionnés.

Pour chaque application, le tableau suivant :

- le numéro d'ordre du tour d'irrigation (N°. Irr.) ;
- l'intervalle entre deux tours (Int.) ;
- la date du tour d'irrigation (Date).

Pilotage des irrigations											
Station climatique :						fichier du climat :					
Culture :						date de plantation :					
Sol :						eau utilisable :					
Humidité initiale du sol :											
Option sélectionnées de l'irrigation :											
Fréquences :											
Applications :											
Efficience de l'application au niveau du champ : 70%											
N°Irr	Int	date	phase	Tar.	TX	Eta	App Net	Déficit	Per- tes	App Brut	Débit
	jour			%	%	%	mm	mm	mm	mm	L/s.ha

- la phase de la culture pendant laquelle a lieu le tour d'irrigation (phase) :
 - A. : Phase initiale
 - B. : Phase de développement
 - C. : Mi-saison
 - D. : Arrière-saison
- le degré de tarissement (Tar) en pourcentage de la réserve totale d'humidité du sol disponible (EU) ;
- le taux d'évapotranspiration réelle (TX) le jour précédant l'irrigation, exprimé en pourcentage de l'évapotranspiration potentielle de la culture ;
- l'évapotranspiration réelle moyenne (Eta) calculée sur la période d'intervalle d'irrigation et exprimée en pourcentage de l'évapotranspiration potentielle de la culture ;
- le déficit (Déficit) qui indique le degré de tarissement de l'humidité du sol après irrigation :
 - Une valeur zéro représente une recharge jusqu'à la capacité au champ ;
 - Une valeur positive représente une sous-irrigation. Elle est équivalente à la quantité d'eau nécessaire après irrigation pour recharger la zone des racines jusqu'à la capacité au champ.
- les pertes (Pertes), l'eau en excès perdue par percolation profonde lorsque les apports par irrigation et précipitations rechargent le sol au-delà de la capacité au champ ;
- les apports net et brut d'irrigation définis par l'option d'application (Apport Net et Apport Brut) ;
- les apports bruts convertis en un débit permanent (Débit), représentant un écoulement continu pour satisfaire les besoins d'irrigation sur la période de l'intervalle considéré.

Utilisation totale de l'eau et réduction des rendements

Le tableau présente également les données d'utilisation de l'eau et de réduction des rendements :

Irrigation totale brute	628.6 mm	Précipitation totale	13.3 mm			
Irrigation totale nette	440.0 mm	Pluie efficace	13.3 mm			
Pertes totales d'irrigation	64.1 mm	Pertes totales de pluie	0.0 mm			
Déficit d'humidité à la récolte	16.7 mm					
Utilisation réelle de l'eau par la culture	361.1 mm	Besoins réels d'irrigation	348.6 mm			
Utilisation potentielle de l'eau par la culture	362.0 mm					
Efficiencia du programme d'irrigation	85.4 %	Efficiencia de la pluie	100.0 %			
Déficiencia du programme d'irrigation	0.2 %					
REDUCTIONS DES RENDEMENTS						
	Phase	A	B	C	D	Saison
Réduction de l'évapotranspiration		3.1	0.0	0.0	0.0	%
Coefficient de réponse du rendement		0.40	0.60	1.00	0.80	
Réduction des rendements		1.2	0.0	0.0	0.2	%
Réductions cumulées des rendements		1.2	1.2	1.2	1.2	%

i. l'efficiencia de l'alimentation en eau d'irrigation peut être évaluée à partir des variables suivantes :

- L'alimentation en eau d'irrigation totale nette et brute.
- Les pertes de l'irrigation totale nette qui sont la somme des applications d'irrigation en excès ; celles-ci n'interviennent pas dans l'estimation de l'efficiencia de l'irrigation définie dans les données d'entrée (voir chapitre 7.2.3.).
- Le déficit de l'humidité du sol à la récolte, représentant le tarissement de l'humidité du sol à la fin de la saison et qui permet de vérifier si la dernière irrigation était réellement requise.
- L'irrigation nette totale + rétention de l'eau du sol représentant le volume total d'eau utilisé par la culture plus les pertes éventuelles.
- Le volume total net d'eau utilisée par la culture.
- Le besoin potentiel global d'irrigation qui est égal au total des besoins en eau de la culture moins les précipitations efficaces.

- L'efficience de l'eau d'irrigation fournie qui est exprimée par le rapport entre l'utilisation de l'eau par la culture et l'alimentation nette en eau.
- La déficience de l'alimentation en eau d'irrigation qui est une mesure du stress hydrique de la culture déterminé par le rapport entre l'utilisation réelle de l'eau par la culture et l'utilisation potentielle de l'eau par la culture.

ii. Les réductions de rendements dues au stress de l'humidité du sol sont indiquées par saison et par phase de croissance :

- Si aucun stress ne se produit, le tableau sera supprimé.
- Les réductions d'évapotranspiration sont calculées pour chaque phase de croissance et sur toute la saison de croissance. Elles sont exprimées en pourcentage de l'évapotranspiration potentielle de la culture.
- Les réductions de rendements sont exprimées de deux manières :
 - Pour chaque phase de croissance, séparément ;
 - La réduction cumulée du rendement.

Les valeurs de réduction du rendement donneront seulement une indication des réductions possibles de rendement et il reviendra à l'utilisateur d'interpréter l'exactitude de ces résultats en se basant sur son expérience propre.

iii. L'efficience des précipitations peut être évaluée à partir des informations sur :

- les précipitations totales ;
- les pertes de pluie déterminées à partir des précipitations dépassant la capacité de recharge du sol (percolation profonde) et des précipitations dépassant le taux maximum journalier d'infiltration (pertes par ruissellement) ;
- la pluie efficace qui est la pluie totale moins les pertes ;
- l'efficience de la pluie calculée par le rapport entre les précipitations efficaces et totales. L'évaluation de l'efficience des précipitations fournit un moyen d'établir des corrélations des précipitations efficaces.

Evaluation du pilotage des irrigations

L'efficience du pilotage des irrigations peut être évaluée sous deux aspects :

- i. **Efficience de l'approvisionnement en eau d'irrigation.**
- ii. **Réduction du rendement due au stress d'humidité.**

L'utilisateur doit évaluer les différents coefficients d'efficience et les comparer à l'ensemble des options de fréquence et d'application. En variant les options et les paramètres d'entrées, il est généralement possible d'obtenir de meilleures efficiences.

Normalement, un certain nombre d'essais est nécessaire avant qu'un programme d'irrigation satisfaisant soit obtenu. Une séquence typique sera :

7. Un pilotage d'irrigation optimal avec une option de fréquence correspondant à 100 % de la RFU et une application jusqu'à la capacité au champ.
8. Un pilotage d'irrigation pratique avec un intervalle de temps fixé, par exemple 10 jours ou 7 jours et un apport fixé d'irrigation déterminé par la méthode d'irrigation. Plusieurs fréquences et apports peuvent être essayés.

Les résultats montrent une tendance qui est typique de plusieurs systèmes d'irrigation à la parcelle : une sur-irrigation au début de la saison et une sous-irrigation durant la mi-saison conduisant à un stress modéré.

9. Un pilotage simulé dans lequel des raffinements supplémentaires peuvent être appliqués en variant les fréquences et les applications au cours de la saison de croissance.

	10. Imprimer le pilotage
Votre option : 2	2.. Modifier les options de pilotage
	11. Revoir les données d'entrée
	12. Retour au Menu Principal

BIBLIOGRAPHIE

FAO.1992 CROPWAT, un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation n° 46, FAO, Rome, 133 p.

FAO. 1986 Les besoins en eau des cultures n° 24, FAO, Rome, 197 p.

FAO. Réponses des rendements à l'eau n°33, FAO, Rome, 235 p.

FAO, OMM Application de données climatiques à la planification et à la gestion efficace de l'irrigation, manuel d'enseignement 176 p.

THEME VI
DIAGNOSTIC HYDRIQUE DES CULTURES
INITIATION A L'UTILISATION DU LOGICIEL DHC4

Octobre 1999

ISSAKA LONA
Filière Formation en Agrométéorologie
Centre Régional AGRHYMET
Niamey (Niger)

INTRODUCTION

La prévision du rendement des cultures vivrières dans les pays des zones sahélienne et soudano-sahélienne constitue une préoccupation majeure pour les responsables et décideurs chargés de la gestion des stocks céréaliers, du contrôle de flux et du déclenchement de l'aide alimentaire.

Les techniques statistiques basées sur les enquêtes et les sondages sont jusqu'à présent largement utilisées pour atteindre cet objectif. Leur mise en œuvre reste cependant lourde sur le terrain et les résultats définitifs sortent souvent tardivement.

En vue d'améliorer ces prévisions, il est dorénavant possible de recourir à des méthodes déterministes basées sur la connaissance des relations entre le climat et le fonctionnement des cultures en particulier le mil, largement majoritaire dans l'ensemble de ces régions.

Le Diagnostic hydrique des cultures (DHC), basé sur la détermination dans le temps de l'évapotranspiration réelle de la plante, en fonction de l'humidité du sol et de la demande évaporative fournit des indicateurs pertinents permettant de répondre aux objectifs de suivi opérationnel de la campagne agricole et d'établissement de bilan prévisionnel avant la fin de la campagne.

DONNEES D'ENTREE DU MODELE

Les données d'entrées du modèle sont de deux types :

données climatiques :

- ♦ **pluviométrie journalière** : elle est lue directement dans les bases de données CLIMBASE pour le bilan HISTORIQUE, dans SUIVI et CLIMBASE pour le bilan PREVISIONNEL, et enfin dans SUIVI pour le bilan ANNUEL. Les données pluviométriques issues de la base SUIVI doivent être vérifiées et corrigées si possible, mais la lecture des fichiers est possible malgré l'absence de quelques données qui sont alors considérées comme nulles. Les données historiques stockées dans CLIMBASE doivent être impérativement complètes pour une série d'années homogènes, sans quoi les stations incomplètes ne seront pas traitées.
- ♦ **ETP décadaire**: les valeurs d'ETP sont lues dans la base de données ATLAS à partir de 36 grilles décadales interpolées à la maille de 0.25° permettant l'accès aux valeurs ETP décadales moyennes pour n'importe quel site géoréférencé (ces données d'ETP sont issues de l'ATLAS ETP MOREL au cours de la période 1951-1980;

paramètres agronomiques :

Pour la simulation du bilan hydrique au niveau d'une station, les paramètres suivants sont définis :

- ♦ **la réserve utile des sols** : Trois classes de réserve utile représentant les types de sol rencontrés dans la région : réserves utiles faible, moyennes, et forte.
- ♦ **la culture** : la culture principale et une culture secondaire avec leur durée de cycle.
- ♦ **la dates de semis** : La date de semis peut être fixée en entrée, trois dates peuvent être choisies compte tenu des informations de terrain : précoce, normale, et tardive, ou bien elle peut être déterminée par le modèle suivant deux méthodes:

Méthode seuil ou semis réussi en humide:

A partir de la date de début de simulation, on recherche la première date de semis possible c'est à dire quand le stock hydrique du sol est supérieur à 10 mm dans les 15 premiers cm de sol.

Le modèle teste alors la réussite du semis pendant les 20 premiers jours, en prenant comme critère une satisfaction des besoins en eau de la culture (ETR/ETM) supérieure à 0,5 pendant cette période. Si cette condition n'est pas remplie, le modèle recherche une autre date de semis possible pour laquelle la somme des pluies de la pentade considérée est supérieure à 10 mm, le test de réussite du semis est alors répété.

La date de semis ainsi déterminée est celle du semis réussi en humide qui peut alors être identique à la première date de semis possible. Le semis a donc réussi dès les premières pluies, ceci correspond dans certains terroirs à la réussite des semis pratiqués en sec. Si les deux dates diffèrent, on peut penser que les semis, s'ils ont effectivement eu lieu, ont probablement échoué, et que les paysans ont dû les refaire.

Toutefois, les informations de terrain sont précieuses pour confirmer les hypothèses formulées: les semis ont-ils effectivement eu lieu aux dates proposées par le modèle.

Méthode semis optimal:

A partir de la date de semis réussi en humide, le bilan hydrique est calculé sur l'ensemble du cycle en testant dix dates de semis: les 10 pentades suivantes. La date retenue comme date optimale de semis, sera celle pour laquelle la valeur de l'indice de rendement espéré IRESP est la plus grande.

RAPPELS THÉORIQUES SUR LE BILAN HYDRIQUE DES CULTURES PLUVIALES

L'objet n'est pas de refaire un cours complet sur le bilan hydrique, mais de donner quelques définitions utiles pour la suite de l'exposé.

II.1. Définitions

L'aETM : Evapotranspiration maximale de la culture. C'est la quantité d'eau maximale que peut consommer une culture durant son cycle ou en d'autres termes ses besoins en eau. L'ETM dépend évidemment de la plante (durée de cycle, appareil végétatif) et du climat local (demande évaporative).

Elle peut se calculer comme suit :

$$ETM = Kc \times ETP$$

avec Kc : coefficient cultural déterminé de façon décadaire ou pentadaire.

ETP : Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Penman. Elle correspond à la demande évaporative du lieu où l'on se trouve. On peut la définir comme la quantité d'eau consommée par un gazon recouvrant entièrement le sol en conditions hydriques non limitantes.

Ruissellement (RUIS) : ce terme est classé dans les sorties mais pourrait très bien correspondre à une entrée d'eau. Il correspond dans le cas d'une sortie à la fraction de la pluie ruissellant en surface et ne pénétrant pas le sol.

Drainage (DR) : drainage en profondeur au delà des horizons atteints par les racines les plus profondes. C'est de l'eau directement perdue pour l'extraction racinaire qui ira alimenter les nappes aquifères. Il pourrait être aussi classé dans les entrées, on parlerait alors de remontée de nappe ou de remontée par capillarité.

L'équation du bilan s'écrit donc :

$$PLU + IRR - RUIS - ETR - DR = \Delta S \quad \text{entre } t \text{ et } t+1$$

$\Delta S = (St_{i+1} - St_i)$: est la variation du stock d'eau dans la tranche de sol considérée ; elle sera positive si les entrées d'eau sont supérieures aux sorties, et négative dans le cas contraire.

Modélisation de la cinétique de l'eau dans le sol

La descente du front d'humectation est simulée à partir du remplissage des horizons supérieurs par les apports en eau jusqu'à la profondeur de sol correspondant à la capacité maximale de stockage du réservoir sol RUM.

Modélisation de la croissance racinaire

Le volume de sol exploité par les racines dépend de la descente du front racinaire cm/j et de la valeur maximale de la profondeur d'enracinement correspondant à RUM. Si l'offre en eau ne permet pas la descente du front d'humectation, la descente du front racinaire est alors stoppée car celui-ci ne peut pas aller au delà du front d'humectation.

La croissance racinaire a été fixée à 2 cm/j et la capacité de rétention du sol à 0,8 mm/cm. Compte tenu de ces deux paramètres, à chaque valeur de RUM caractérisant un type de sol donné, correspond une profondeur maximale d'enracinement et une durée de croissance racinaire.

30 < RUM < 50 mm	sols sableux grossiers à texture très limitante ou sols sur cuirasse superficielle
50 < RUM < 80 mm	sols sur dépôts sableux éoliens à texture limitante ou sol ferrugineux sur glacié à texture argilo-sableuse
80 < RUM < 120 mm	sols ferrugineux bruns sur bas glacié ou argilo-sableux sur dépôts sableux éoliens en bas de toposéquence ; sols hydromorphes
RUM > 120 mm	vertisols ou sols d'alluvions ; sols à tendance argileuse sans limitation pédologique

La RUM : Réserve en eau Utile Maximale du sol. Cette variable fait intervenir la texture (granulométrie et nature des éléments constituant le sol : gravier, sable, limon, argile) et la structure du sol (essentiellement sa profondeur).

On la définit comme la quantité d'eau échappant à l'action de la gravité (capacité au champ) et la quantité au delà de laquelle les plantes sont incapables d'absorber l'eau restante (point de flétrissement) :

$$RUM = \sum_{i=1}^{imax} p_a \times (R-h) \times z/100$$

avec : R : capacité au champ exprimée en % de masse de terre sèche ;
h : point de flétrissement exprimé en % de masse de terre ;
z : tranche de sol considérée en mètre ;
i : rang de la tranche considérée ;
RUM : exprimée en millimètre ;
p_a : densité apparente sèche de la tranche de sol considérée.

RUM : permet de calculer le taux d'humidité du sol (HR)

HR, pour la pentade i, est le rapport entre la quantité d'eau présente dans la couche de sol colonisée par les racines (S_i), et la quantité d'eau maximale accessible à la plante que peut contenir cette même tranche de sol (RUR_i).

$$HR_i = \frac{S_i}{RUR_i} - \text{retard} ;$$

RUR_i : Réserve Utile Racinaire = "stock à la capacité au champ" - "stock au point de flétrissement permanent" dans le volume de sol colonisé par les racines;

"retard": coefficient pondérateur après un stress hydrique appliqué si le stock d'eau de la pentade précédente était inférieur à 10 mm (les 5 premières pentades après le semis ne sont pas concernées).

II.2. Equation générale du bilan hydrique

L'équation du bilan hydrique n'est autre que l'équation de continuité ou de conservation de la masse. Si on considère une tranche de sol intéressant l'extraction racinaire, et que l'on fasse le bilan des entrées et des sorties d'eau concernant cette tranche dans un intervalle de temps t, on aura:

entrées : Pluies (PLU)
et/ou Irrigation (IRR)

sorties : Evapotranspiration réelle du système sol-plante (ETR)

- Phase 1: **IDV: levée (Kc début ou minimal)**
IDV: levée (Kc début ou min.)
- Phase 2: - **développement végétatif jusqu'à l'apparition du panicule dans le cornet.**
 - *développement végétatif jusqu'à la floraison utile*
 (Le coefficient cultural est déterminé par interpolation linéaire entre Kcmin et Kcmax).
- Phase 3: - **pleine végétation (Kc maximum)**
FL1: floraison entre la montaison et la pollinisation
FL2: formation de l'épi
 - *pleine végétation,*
FL1: floraison utile, dont les fleurs peuvent se transformer en gousses)
FL2: remplissage des gousses.
- Phase 4: **MAT: maturation et sénescence.**
MAT: maturation et sénescence.
 (le coefficient cultural est déterminé par interpolation linéaire entre Kc max et Kc fin).

L'ETR : Evaporation réelle de la culture. C'est la quantité d'eau réellement consommée par la culture durant son cycle compte tenu des conditions d'humidité du sol et de la demande évaporative (ETP). Elle est calculée dans le modèle qui vous est présenté au pas de temps pentadaire par la formule d'Eagleman (cf. figure 2).

Ce paramètre sera donc compris entre 0 (conditions de sécheresse extrême pour lesquelles la plante atteint son point de flétrissement permanent) et l'ETM, conditions hydriques non limitantes pour la culture.

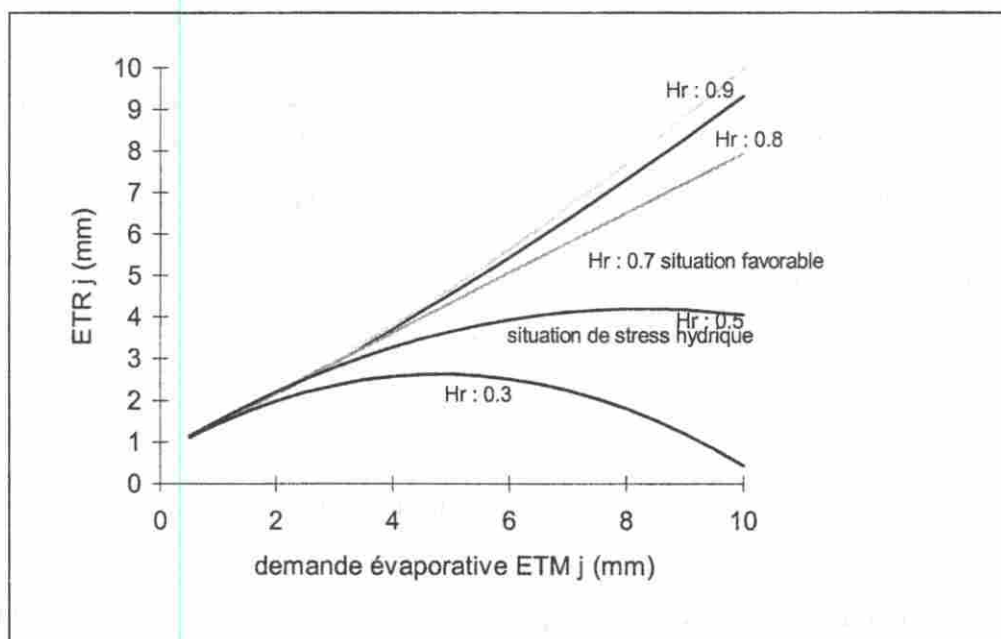


Figure 2 : Relation entre l'évapotranspiration réelle journalière et la demande ETMj en fonction de l'humidité disponible dans le sol

On peut également utiliser les évaporations du bac "classe A", avec de nouveaux coefficients culturaux.

L'équation devient :

$$ETM = K_c \times E_{\text{bac}}$$

(cf. Valorisation agricole des ressources pluviométriques ; Synthèse de l'atelier IRAT - CIEH de Ouagadougou, 1983).

K_c : Les coefficients culturaux sont généralement déterminés en station de recherche dans des casiers lysimétriques où l'on mesure l'évapotranspiration maximale en condition non limitante, c'est à dire quand les besoins en eau sont toujours satisfaits à 100%. Pour cela, le sol contenu dans les casiers est maintenu à la capacité au champ par des arrosages fréquents.

L'aETM est alors déterminé par la quantité d'eau qu'il faut rajouter dans le casier pour que le sol soit de nouveau à la capacité au champ.

L'évolution des coefficients culturaux dans le temps peut être rapportée au développement végétatif de la culture suivant le schéma ci-après :

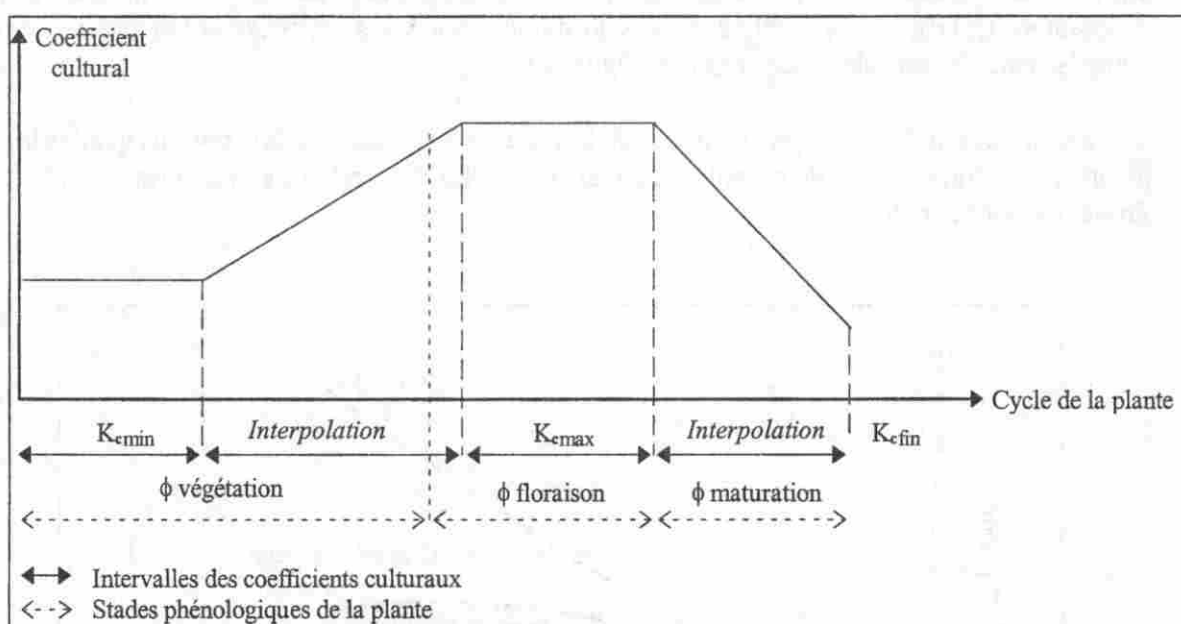


figure 1: Schématisation des Kc en fonction du temps

Le découpage en différentes phases de Kc correspond aux différents stades phénologiques des céréales ou des légumineuses comme suit :

- Cycle végétatif des céréales (mil, sorgho, maïs, riz)
- Cycle végétatif des légumineuses (arachide, niébé ...)

La modélisation de la cinétique de l'eau dans le sol et de la croissance racinaire se présente comme suit (cf. figure 3) :

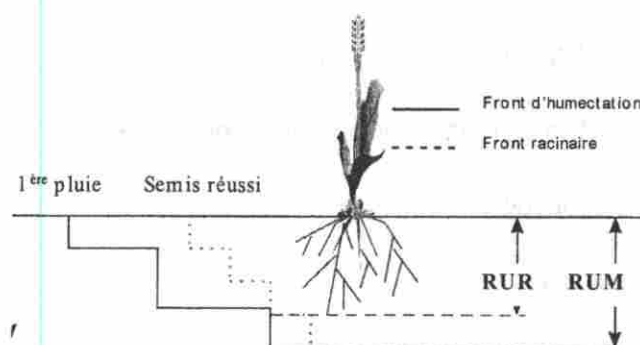


Figure 3: modélisation de la cinétique de l'eau dans le sol et de la croissance racinaire.

II.3. Intérêt agronomique

Le bilan hydrique, fait par des mesures in situ (tarrière, sonde à neutron, tensiomètre) ou calculé par simulation, trouve des applications directes en agronomie, à savoir, entre autres :

- la détermination des besoins en eau des cultures ;
- l'étude de la résistance à la sécheresse de nouvelles variétés ;
- le pilotage des irrigations ;
- le suivi des cultures en saison des pluies.

Pour notre part, le bilan hydrique sera utilisé comme un outil de diagnostic de l'état du peuplement végétal et en particulier des cultures céréalières durant la saison des pluies.

MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE

III.1. Intérêt de la modélisation

Le modèle permet de décrire une situation réelle en faisant une formulation mathématique des mécanismes obligeant néanmoins à faire certaines hypothèses et simplifications.

Le principal intérêt réside dans la puissance de calcul offerte par les moyens informatiques actuels permettant de simuler sur l'ensemble des régions agricoles les conditions hydriques pour la croissance des cultures prévalant durant une période donnée.

Nous ne rentrerons pas ici dans le détail des contraintes de modélisation. Nous allons simplement essayer de formuler le problème.

III.2. Position du problème

III.2.1. Paramètres d'entrée

Les paramètres d'entrée du modèle sont :

- la pluviométrie journalière de la station considérée ;
- la réserve utile ;
- pentade de début de simulation ;
- la culture ;
- les dates de semis.

III.2.2. Variables à modéliser

- la principale variable modélisée est l'humidité du sol, soit encore, en reprenant la formulation du modèle, le taux de remplissage du réservoir sol encore appelé taux d'humidité du sol. Le modèle utilise ensuite une fonction d'extraction de l'eau dans le sol faisant intervenir trois paramètres : l'ETM, l'ETR et le taux d'humidité du sol (HR) au pas de temps considéré Δt .

III.2.3. Variables de sorties

Les variables de sorties du modèle concernent les termes du bilan hydrique de l'équation générale écrite plus haut.

Soient :

- l'ETR calculée au pas de temps considéré t_i ;
- le stock d'eau restant dans le sol au pas de temps Δt .

A partir de ces deux variables calculées à chaque pas de temps, il est possible de calculer les principaux paramètres décrivant le régime hydrique de la culture. On retiendra 6 paramètres de sortie du DHC pertinents pour l'analyse des conditions hydriques des cultures en cours de campagne :

- l'Indice de satisfaction des besoins en eau de la décade d'actualisation (IndDec) ;
- le taux de satisfaction des besoins en eau de la culture considérée, c'est à dire le rapport de la consommation en eau du couvert (ETR) aux besoins en eau de la culture (ETM), est calculé de la façon suivante :

$$\text{IndCu} = \text{ETR} / \text{ETM}$$

- l'Indice de satisfaction des besoins en eau cumulés depuis le début du cycle (ISBEcu).;
- l'Indice de satisfaction des besoins en eau au cours de la prochaine décade dans l'hypothèse qu'aucune pluie ne soit enregistrée (Ind+1) ;
- les Besoins en eau pour la prochaine décade (ETM+1) ;
- le Stock d'eau dans le sol en fin de décade (Stock) ;
- l'Excès d'eau calculé depuis le semis (DrCum) et en cours de décade (Drdec).

L'aIndDec, permet d'analyser les conditions hydriques de la culture durant la dernière décade ; il réagit beaucoup plus rapidement que l'ISBEcu (voir plus bas) et permet de suivre l'évolution de l'alimentation en eau de la culture (dégradation rapide ou remontée rapide) d'une décade à l'autre. Cet indice ne permet en aucun cas de faire des prévisions pour la prochaine décade, il peut néanmoins attirer l'attention sur l'amorce de stress hydrique.

L'aIndCu, traduit l'état de santé hydrique de la culture quelque soit son stade de développement. Il intègre les stress hydriques que la plante a pu subir au cours de son cycle. Ce paramètre est important à observer en début de cycle (1^{er} mois du stade végétatif) pour analyser les réussites des premiers semis et si nécessaire déclencher des resemis. Il est aussi utile pour l'analyse en fin de cycle (voir plus bas).

L'aETM+1 et le Stock, sont deux paramètres à analyser ensemble puisque le premier correspond aux besoins en eau de la prochaine décade et le second à l'offre en eau en cas d'absence de précipitation. Ils permettent donc de faire de la prévision à court terme sur les conditions hydriques pour la prochaine décade. Le Stock est intéressant à analyser en fin de cycle (faible probabilité de pluie importante surtout en zone sahélienne) pour estimer les chances de réussite des cultures semées tardivement.

Ind+1 complète l'analyse de ETM+1 et Stock et permet de mieux appréhender l'avenir de la culture si aucune pluie ne vient.

Le DrCum et le Drdec, caractérisent l'excès d'eau qu'a subi la culture depuis le semis et durant la décade. Ces termes sont importants à suivre au début du cycle au moment où les jeunes plantules sont les plus vulnérables pour les problèmes de fertilité (lixiviation des sols, départ de l'azote) et durant la phase de fructification (risque de verse) ou de récoltes (conditions de stockage et de travail dans les champs).

III.3. Formulation des équations

Le programme de bilan hydrique que nous utilisons pour le suivi d'hivernage a pour base le modèle BIP4 développé à l'IRAT Montpellier. Il est basé sur le calcul de l'évapotranspiration réelle de la culture (ETR) au pas de temps pentadaire suivant l'algorithme d'Eagleman (1971)

$$\begin{aligned} \text{ETR}_j = & 0,732 - 0,05 \times \text{ETM} \\ + & (4,97 \times \text{ETM} - 0,661 \times \text{ETM}^2) \times \text{HR} - (8,57 \times \text{ETM} - 1,56 \times \text{ETM}^2) \times \text{HR}^2 \\ + & (4,35 \times \text{ETM} - 0,88 \times \text{ETM}^2) \times \text{HR}^3 \end{aligned}$$

Algorithme D'EAGLEMAN

ETM = évapotranspiration maximale de la culture = $K_c \times \text{ETP}_p$
 K_c = coefficient cultural
 ETP_p = ETP Penman du jour calculée à partir de l'ETP décadaire issue de l'Atlas ETP MOREL (moyenne 1951-1980).
 HR = taux d'humidité de la tranche de sol considéré

III.4. Calage du modèle

III.4.1. Validation du modèle

Le calage ou la validation d'un modèle est une phase préalable indispensable avant son utilisation. La variable de contrôle pour la calibration du modèle est l'humidité dans le sol ou plutôt son évolution dans le temps et sur la profondeur de sol. Pour cela, des comparaisons systématiques sont faites entre les mesures d'humidité faites au champ et l'évolution des stocks hydriques donnés par les valeurs mesurées, mais ne seront pas abordées ici.

III.4.2. Paramètres sensibles

L'objet de cet exposé n'est pas de faire une étude de sensibilité du modèle aux différents paramètres qui rentrent dans le calcul. Nous donnerons cependant quelques paramètres sensibles sur lesquels l'utilisateur peut intervenir.

Les paramètres qui influencent de façon sensible le modèle (c'est à dire qui font varier de façon significative les principales sorties) sont :

- la RUM, réserve maximale utilisable pour la culture ;
- la date de semis ;
- la longueur du cycle de la culture.

Bien évidemment, il existe d'autres paramètres influençant les calculs, comme les coefficients de la croissance racinaire ou de l'évaporation du sol nu en début de cycle, les coefficients culturels, les différentes pondérations pouvant intervenir dans le calcul (reprise de l'extraction) qui sont cependant inaccessibles à l'utilisateur et ne seront donc pas étudiés ici.

Bilans proposés

Il est important de souligner que le démarrage des calculs a lieu systématiquement 30 jours avant la date de début de simulation, permettant de prendre en compte des pluies antérieures pour le calcul du stock d'eau dans le sol, celui-ci étant estimé initialement à 0 mm. Le stock en eau, disponible dans les 15 premiers cm de sol au moment du semis est alors calculé en tenant compte de l'évaporation sol nu pendant la période située entre la date du début des calculs (pentade début simulation - 6) et la date de semis.

Trois types de bilans hydriques sont possibles.

IV.1. le bilan annuel

Il permet de suivre l'état hydrique des cultures en cours de campagne pour plusieurs sites et dans plusieurs pays, et d'envisager, à partir de la date à laquelle s'est arrêté le bilan, les besoins en eau de la prochaine décade.

Le fichier pluviométrique lu dans ce cas est celui créé par le logiciel SUIVI.

Les termes du bilan hydrique calculés pour la période entre la date de semis et la date d'actualisation du bilan sont :

- la 1^{ère} date de semis possible et la date semis réussi en humide ;
- l'indice de satisfaction des besoins en eau, ETR/ETM, pour la période à partir de la date de semis ;
- l'ETR cumulée sur la période ;
- le stock hydrique du le sol à la fin de la période ;
- l'ETR de la dernière décade ;
- l'indice de satisfaction des besoins en eau ETR/ETM de la dernière décade ;
- l'indice ETR/ETM pour la prochaine décade si celle-ci ne reçoit aucune pluie ;
- l'ETM de la prochaine décade ;
- l'ETM pour la fin du cycle ;
- l'excès d'eau, DR Cumulé, sur la période ;
- l'excès d'eau, DR pendant le dernière décade ;

IV.1. le bilan historique

Il calcule les termes du bilan hydrique pour une série d'années homogènes sans donnée absente, stockées dans la base CLIMBASE. Pour chaque cas de simulation (un site, une culture, une date de semis, une RU) une analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique est effectuée aux occurrences 2 années sur 10, 5 années sur 10 et 8 années sur 10 (valeur atteinte ou dépassée). Ces termes sont:

- l'indice de satisfaction des besoins en eau pour l'ensemble du cycle ;
- l'ETR cumulé sur le cycle ;
- l'excès d'eau, Dr, cumulé sur le cycle ;
- l'indice de satisfaction des besoins en eau pour chaque phase IDV, FL1, FL2, MAT ;
- l'ETR cumulée pour chaque phase IDV, FL1, FL2, MAT ;
- l'indice de rendement espéré IRESP % ;
- le rendement espéré ;
- la 1^{ère} date de semis possible, la date de semis réussi en humide ou le semis optimale ;

VI.1 le bilan prévisionnel

Environ un mois avant la fin de la campagne agricole, couramment vers la fin août, on peut déjà donner une estimation des rendements en s'appuyant sur la simulation du bilan hydrique par le Logiciel DHC4

La simulation du bilan hydrique pendant tout le cycle de la culture choisie est possible en s'appuyant sur les données pluviométriques de l'année en cours complétées par les données de la série historique. Le bilan est effectué pour chacune des années de la série historique retenue, en remplaçant les données pluviométriques du début du bilan par les données de chacune des années de la série historique à partir de la date d'actualisation.

Si le bilan est bouclé à la date d'actualisation, le rendement espéré est calculé sur la base des termes du bilan hydrique simulé pour l'année en cours uniquement sans tenir comptes des données de la série historique.

Les variables calculées dans le cas du bilan historique sont les mêmes pour le bilan prévisionnel.

V. SORTIES ET VALORISATION DES RESULTATS

DHC4 permet de pré- traiter les résultats des simulations, en vue de leur valorisation. Il est en effet possible, en fonction des traitements souhaités, de choisir en extraction une partie des variables ou des situations simulées (date de semis, RU, stations etc...). Ces résultats peuvent être présentés sous forme de tableaux, de fichiers ASCII ou de fichiers DBASE.

1/ Tableaux

Les tableaux tels qu'ils sont édités par DHC4 sont prêts à l'impression ou à leur intégration dans un document édité sous traitement de texte.

2/ Fichiers ASCII

Les résultats sauvegardés dans un fichier ASCII, peuvent être facilement récupérables par n'importe quel logiciel de traitement de texte, de statistiques, de traitements graphiques, de cartographie etc...

3 / Fichiers DBASE

Pour créer une base de données à partir de vos résultats de simulation du bilan hydrique, vous pouvez sauvegarder vos résultats dans un fichier au format Dbase. Ces résultats auront été préalablement triés et les variables choisies. DHC4 sauvegardera votre fichier en lui donnant directement l'extension *.DBF.

La mise à jour de votre fichier dbase ne pourra être réalisée qu'en sélectionnant le même nombre de variables en sortie. Décades après décades vous pourrez ajouter les résultats de vos simulations qui devront bien entendu être basées sur les mêmes critères. A partir de ce fichier dbase vous pourrez par exemple réaliser un graphique de l'évolution de l'ETR ou de ETR/ETM au cours du temps pour une station donnée.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- Abdallah SAMBA 1997 : Diagnostic Hydrique des Cultures DHC appliqué aux pays du Sahel CRESA, Niamey , NIGER.
- X. GIRARD, C. BARON, B.CORTIER 1994 : Diagnostic Hydrique des Cultures DHC version4 : AGRHYMET , Niamey, NIGER.

THEME VII

LES STRATEGIES D'ECONOMIE AGRICOLE DE L'EAU AU SAHEL

Octobre 1999

Dr. Amadou Moustapha
DS/INRAN NIAMEY

LES STRATEGIES D'ECONOMIE AGRICOLE DE L'EAU AU SAHEL

L'utilisation efficiente de l'eau est une nécessité pour une production agricole durable en région sahélienne. Diverses stratégies sont utilisées à cet effet à différents niveaux d'intervention : atmosphère, sol ou couvert végétal. Selon une synthèse élaborée par Dancette 1989, ces techniques peuvent être classées ainsi qu'il suit :

- Les techniques de collecte et de stockage de l'eau pluviale ;
- La modification du climat local dans un sens favorable aux cultures ;
- La modification de l'état de surface en vue de réduire l'évaporation du sol nu ;
- L'amélioration du microclimat de la plante ;
- Le choix des espèces et des variétés économes en eau
- La lutte contre les adventices
- La valorisation de l'eau du sol
- L'apport de l'eau par irrigation

Les techniques visant à améliorer la collecte et le stockage de l'eau pluviale ;

Ce sont des techniques utilisées dans les zones où la pluviométrie est déficitaire par rapport aux besoins des plantes. Elle consiste à collecter l'eau qui ruisselle sur les pentes stériles et à l'acheminer vers les parties cultivées tout en veillant qu'elle ne provoque pas de dégâts par érosion et que le maximum de cette eau puisse s'infiltrer sans provoquer d'engorgement. Il s'agit des cordons pierreux, les banquettes, les diguettes, les demi-lunes, les bandes enherbées, le Zaï ou Tassa, le labour croisé, le sarclo-buttage croisé, etc. A titre d'exemple, l'utilisation de structures de stockage de l'eau sur des plateaux latéritiques du Continental Terminal (tranchées, trouaison, demi-lunes) ont permis l'établissement de la végétation tant herbeuse que ligneuse avec un taux de survie de 77 à 97 % pour *Acacia holosericea* (Manu et al., 1994).

2. La modification du climat local dans un sens favorable aux cultures ;

IL s'agit ici d'utiliser des arbres pour améliorer le climat local par la réduction de l'ETP, ce qui réduit la consommation en eau de la culture bénéficiant d'un tel dispositif. Au Sahel, l'*Acacia albida* est une espèce qui convient à cette pratique car elle a la particularité de perdre ses feuilles en saison pluvieuse (donc consomme moins d'eau et laisse passer le rayonnement solaire) et de les retrouver en saison sèche. Cependant, il faut se méfier de la concurrence hydrique de certains arbres plantés à forte densité et surtout dans les conditions de déficit hydrique. Une expérimentation de l'ISRA Bambey a montré des effets défavorables en année peu pluvieuse (autour de 350 mm) d'une ligne de brise vent de neem (*Azadirachta Indica*) avec des arbres séparés de 4 à 5 m sur la ligne, sur des parcelles de mil situées entre 2 m et 15 m de la ligne d'arbres. Le rendement grain moyen est de 650 kg, du fait de la concurrence hydriques des arbres. Des parcelles de mil situées entre 15 et 30 m, avaient eu un rendement moyen de 1100 kg/ha. Par contre, en année pluvieuse (550 mm), il n'y a pas eu de concurrence hydrique des arbres et les rendements ont été identiques au voisinage des arbres et entre 15 et 30 m (2050 kg/ha).

3. La modification de l'état de surface en vue de réduire l'évaporation du sol nu

Pour certaines cultures dites éparses comme le mil ou en attendant que le couvert végétal soit important et recouvre entièrement le sol, l'évaporation du sol nu intercalaire représente une fraction importante de l'évapotranspiration totale (ETR). De l'ordre de 40 % ETR pour le

mil. Comme l'ont souligné plusieurs auteurs, l'une des options pour accroître le rendement de ces types de culture serait de diminuer les pertes improductives d'eau (évaporation du sol) et d'augmenter les pertes productives (transpiration). Les stratégies utilisées vont du paillage (mulch pailleux) aux travaux du sol (sarclage, binage, etc.). Les sols sableux sont automulchants, c'est à dire qu'après une humectation, ils sèchent rapidement en surface (souvent en moins de 24 h) formant une couche superficielle de 2 à 3 cm qui joue le rôle d'isolant. L'humidité se conserve bien en dessous. Dans ce cas, le sarclage favorise une grande évaporation du sol. En effet, dans la première journée qui suit une averse, un sol nu sarclé perd environ 1 mm d'eau de plus qu'un sol à surface encroûtée (Lefèvre et al., 1994). Au niveau des sols limoneux et argileux, l'évaporation à la surface est plus importante et rapide qu'en sol sableux, du fait des remontées capillaires continues. On a donc intérêt à interrompre ces remontées capillaires et à supprimer l'évaporation, par des moyens physiques simples. On a coutume de dire « un binage vaut deux arrosages »

4. L'amélioration du microclimat de la plante

Cette amélioration du micro-climat peut se faire par l'utilisation du micro-relief du sol (billons, billons cloisonnés, etc.), par l'association des espèces hautes avec des espèces basses. L'association de 2 espèces ayant des exigences bien différentes au cours de leurs cycles de développement, permet de réduire notablement l'incertitude liée au climat (Baldy, 1996). Un exemple d'association couramment utilisé au Sahel est le semis des légumineuses à l'inter rang des céréales comme le mil ou le sorgho. Ici, on a souvent intérêt à orienter les lignes des plantes protectrices hautes, dans le sens Est-Ouest. En effet, la lumière peut pénétrer plus facilement dans les interlignes où se trouvent les plantes protégées et la photosynthèse est ainsi moins ralentie par l'ombre, aux heures où elle est la plus active : matin et fin d'après midi. A titre d'exemple, une association de mil et de niébé a donné une production supérieure de 20 à 40 % par rapport aux cultures pures prises isolément, et une efficacité d'utilisation de l'eau meilleure en association qu'en culture pure, lors d'un essai réalisé par Nouri et al. (1990) à Tarna et Kollo (Niger).

Il faut aussi signaler l'intérêt de l'Agroforesterie qui a non seulement un rôle dans l'amélioration du microclimat, mais également dans la mobilisation des eaux et nutriments de profondeur souvent non accessibles à la culture.

5. Le choix des espèces et des variétés économes en eau

Il s'agit ici de caler la longueur du cycle de l'espèce ou de la variété aux conditions pluviométriques du milieu. On essayera de faire en sorte que les besoins en eau puissent être satisfaits au moins dans 75 à 80 % des années (sinon plus). Pour cela un bon moyen est de se baser sur la pluviométrie dans 75 ou 80 % des cas. Dans les zones où l'on aurait par exemple que 80 % des chances d'atteindre ou de dépasser 400 mm, on choisirait donc de préférence des variétés de mil, arachide, niébé, etc. dont les besoins en eau seraient inférieurs à 400 mm. Ces stratégies anti-risques sont très efficaces au Sahel. Par exemple, il a été montré qu'il est possible d'augmenter et de sécuriser la production de mil au Niger de façon très significative par l'utilisation judicieuse de 3 cultivars ayant des durées de cycle de 70 jours, 90 jours et 110 jours, au lieu d'un seul cultivar dans une zone donnée. Pour cela, on choisira d'après Eldin, 1991 un cultivar à cycle long lorsque l'installation de l'hivernage est précoce, ou un cultivar à cycle court si l'installation de l'hivernage est tardive. Il s'agit là d'une stratégie très connue des paysans, mais faudrait-il encore leur garantir l'approvisionnement en ces semences améliorées.

6. La lutte contre les adventices

Un autre moyen très efficace d'économiser l'eau en faveur de la seule culture, est d'effectuer des sarclages sévères. Le démariage du mil joue également un rôle important dans l'économie de l'eau. Des comparaisons de consommation hydrique entre mil démarié précocement à 3 pieds par poquet (dès le 10^{ème} jour) ; et mil non démarié, ont montré qu'entre le 10^{ème} et le 30^{ème} jour, les différences pouvaient être assez grandes : mil démarié : de l'ordre de 2,5 mm/jour et mil non démarié : de l'ordre de 3,7 mm/jour.

7. La valorisation de l'eau du sol

La valorisation de l'eau du sol est envisagée en jouant sur l'espèce ou la variété, les propriétés physico-chimiques du sol. Au niveau de la plante, il convient de choisir des variétés à enracinement profond, vigoureux et rapide au moment du criblage lors des essais variétaux. On peut aussi favoriser les facultés d'enracinement : densité d'exploitation, rapidité d'implantation du système racinaire au moyen du travail de sol (Nicou, 1977 ; Chopart, 1973 ; Charreau, 1971, etc). Mais la stratégie la plus recommandée ici est l'enfouissement de la matière organique sous forme de fumier ou de compost dans les sols sahéliens fréquemment dégradés. Toutefois, il faut de grandes quantités, rarement disponible. L'effet de ces enfouissements organiques est faible en ce qui concerne l'augmentation de la capacité de rétention de l'eau. Cet effet se traduit par une augmentation de la transpiration et une réduction du drainage en profondeur (Forest, 1991). Heureusement, les autres effets sur le plan de l'amélioration de la fertilité chimique, sont plus spectaculaires. Par ailleurs, il faut noter qu'un excès de fumure organique peut avoir des effets pervers sur la production au cas où l'eau venait à manquer (Affholder, 1991). Donc, il conviendrait de trouver le mode d'application adéquat pour chaque condition pédoclimatique donnée. Dans cette perspective, Brouwer et Powell (1994) ont suggéré des applications plus fréquentes de petites quantités de fumure plutôt que de grandes quantités appliquées moins fréquemment.

Les cultures de relais, voir une deuxième culture (cultures successives) à enracinement profond, les rotations de cultures sont également d'autres alternatives pour valoriser l'eau du sol.

Nous insisterons ici sur les solutions artificielles qui ont été innovées pour retenir l'eau dans l'horizon colonisé par les racines des cultures et pour éviter que cette eau ne percole en profondeur et n'échappe aux racines : conditionneurs chimiques du sol, film plastique, films imperméable de bitumes. Les premières solutions proposées de cette catégorie de technique de valorisation de l'eau coûtaient effectivement chères, mais ces dernières années de nouveaux produits moins onéreux sont apparus sur le marché. Le plus spectaculaire de ces produits est le CMT ou "CoMonomer Technology"

le CMT est le nom commercial d'un polymère organique, biodégradable et super-absorbant, capable d'absorber de grandes quantités d'eau. Du fait de sa forte capacité d'absorption, une faible quantité de ce produit est nécessaire pour emblaver de grandes superficies (5kg/ha). Ce produit très malléable, a la propriété d'absorber des solutions organiques et minérales. Il peut de ce fait être adapté à plusieurs types d'utilisations, notamment en agriculture. Les applications agricoles visent surtout à créer un environnement favorable à la croissance de la plante par l'augmentation de la capacité de rétention en eau du sol, la création d'une couche de sol moins sensible à l'érosion hydrique et éolienne. Lorsque des semences en graines sont enrobées par une solution de CMT, leur taux de germination s'accroît, et le temps de cette germination diminue. Le CMT améliore la santé des jeunes plantules en favorisant un

enracinement précoce. Ce produit trouve également son application en foresterie, et surtout, en matière de reforestation des milieux arides, car en enrobant les racines des plants, il réduit les chocs lors des transplantations. C'est également un bon isolant thermique. Le CMT est insoluble dans l'eau, il peut en plus conserver sa capacité d'absorption pendant plusieurs années de suite (5 ans sur un sol sableux par exemple). Ce produit a été testé avec succès dans plusieurs pays et sur divers types de sols et de cultures. Les expérimentations conduites au Niger sur le mil, sur de jeunes plants de manguiers et de citronniers, sur des herbacées, ont confirmé sa grande capacité de rétention en eau.

Un autre moyen pour réduire les pertes par évaporation est donc paradoxalement de réduire la transpiration (ou plutôt d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau) par l'utilisation d'antitranspirants. L'utilisation de ces produits en zone sub-aride est très controversée. Les antitranspirants ont pour objet de réduire les fuites de l'eau notamment par les stomates (voie qui représente le plus gros poste de perte : 96 % de l'eau absorbée par les racines). La principale critique faite à l'usage d'antitranspirants stomatiques repose le fait que la fermeture stomatique limite les échanges gazeux, notamment l'entrée de gaz carbonique atmosphérique et, en conséquence, réduit le rendement photosynthétique. L'application de tels produits n'est envisageable que si le sol, par nature, par sa préparation ou par adjonction d'hydroréteneur, est susceptible de conserver l'eau économisée sur la transpiration ou si elle est absorbée par la plante voisine (densité de semis ou maintien d'adventices). Sinon cette économie est inutile puisque l'eau est perdue par évaporation.

Parmi les antitranspirants sensu stricto, il convient de distinguer deux types de produits selon leur manière d'agir : action mécanique ou activité métabolique. Les antitranspirants à action mécanique ou de type film sont des huiles ou des polymères qui réduisent à la fois la transpiration stomatique et la transpiration cuticulaire. Ils comprennent les corps gras, les silicones et autres polymères. Les antitranspirants métaboliques ou stomatiques provoquent une réponse plus nuancée. Il n'agit que sur le stomate dont le degré de fermeture dépend du dosage. Il y a donc possibilité de régulation. Ils sont applicables par pulvérisation dans le sol ou par addition à l'eau d'irrigation. Ce sont les hormones végétales dont l'acide abscisique (ABA), les hétérocycles azotés (atrazine, pyridazinones, etc.), les amides et amines, les dérivés halogénés, l'acétate de phénylmercure, les acides humiques et d'autres produits divers (certains sels comme le sulfate de cuivre à la concentration de 0,005 % appliqué par pulvérisation, l'aspirine (acide acétylsalicylique). D'après les résultats de nombreuses expérimentations faites avec ces produits, dont celle avec l'acide usnique au Niger, il est ressorti que ces produits peuvent provoquer la fermeture stomatique. Les véritables questions sont : à quelle dose ? ; à quel prix ? et avec quelles conséquences pour la vie de la plante.

8. L'apport de l'eau par irrigation

Enfin, la meilleure stratégie de lutte contre la sécheresse est l'apport de l'eau par irrigation. Dans des zones peu sèches (300 à 500 mm) un petit complément d'irrigation au moment opportun peut avoir des effets très bénéfiques. Mais il se trouve que les quantités d'eau apportée dépassent très souvent les besoins réels de la plante faute de connaissance de ces besoins ou du mode d'apport d'eau approprié. Dans la recherche des techniques d'économie de l'eau de jeunes plants de fruitiers, un projet de la place (PPODR) a introduit au Niger une nouvelle technique d'irrigation utilisant 3 litres d'eau par semaine et par plant (1 litre tous les 2 jours). Cette technique dénommée « IRRIGASC » ou l'irrigation par semi-conduite a été mise au point au Sénégal. Ces caractéristiques sont mentionnées ci-dessous (brochure IRRIGASC):

- Principe

Entretenir une réserve d'humidité exempte de toute perte d'eau

- Réalisation

Une gaine aux parois fines, enterrée verticalement ou obliquement contient un volume approprié d'éléments terreux puisés sur place. l'humidité est entretenue intérieurement par addition périodique d'eau dans le réservoir de la partie supérieure. L'eau percole à l'extérieur par les très fins orifices de la paroi (figure x).

- Effet obtenu

Les racines poussent très rapidement vers les niveaux humides profonds, tandis que les radicelles absorbent l'humidité au niveau de chaque orifice.

- Avantages

. Mise en œuvre facile;

. Economies très substantielles

+ d'eau (jusqu'à 90 % sur jeunes plants);

+ de temps de travail (arrosage et désherbage réduits);

+ d'engrais et pesticides (administration localisée de solutions nutritives et agro-pharmaceutiques racinaires);

+ d'équipement (exhaure et stockage de l'eau, maintenance simplifiés)

. Suppression du risque de stress hydrique;

. Développement végétatif rapide;

. Maintien d'un faible taux de salure dans la solution du sol, malgré la charge de sel de l'eau d'arrosage;

. Etalement des plantations sur toute l'année.

L'expérimentation de cette technique au Niger sur de jeunes plants de manguiers a montré :

- que la dose de 3 litres d'eau par semaine et par plant (1 litre tous les 2 jours), recommandée par le fabricant n'est pas suffisante pour assurer un développement satisfaisant des plants en serre (figure x).

- La dose de 9 litres d'eau par semaine et par plant (3 litres tous les 2 jours) est la dose la plus économique en eau assurant un développement satisfaisant des plants.

Les stratégies d'économie de l'eau ainsi évoquées ne sont pas exhaustives, mais la plupart présente divers avantages dont celui de préserver la durabilité des écosystèmes et d'être à la portée du paysan sahélien.

9. Liste de documents consultés

Amadou M. et al. 1998 : Revue bibliographique sur l'utilisation optimale de l'eau du sol au Niger : recherche, développement et perspectives, travail réalisé dans le cadre du consortium international «Optimizing Soil Water Use ou OSWU», 24 p.

Amadou M. et al. 1999 : Evaluation de 2 techniques d'économie de l'eau : la «Gaine IRRIGASC» et le «CMT», travail expérimental réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'INRAN et le projet «Petites Opérations de Développement Rural, (PPODR)», 15 P.

Amadou M., 1994 : Analyse et Modélisation de l'Evaporation-Transpiration d'une Culture de Mil en Région Aride Sahélienne", thèse de Doctorat en Sciences de l'Université de Paris-XI, Orsay (France), spécialité "Ecologie", 117 p.

Baldy C., 1986 : Agrométéorologie et développement des régions arides et semi-arides ; 113 p.

Dancette C., 1979 : Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau, en zone soudano-sahélienne : Etudes et Travaux ; Extrait de l'Agronomie Tropicale XXXIV-4, p 331-345.

Dancette C., 1990 : Valorisation agricole de l'eau : in Berrada A. et al. 1990 : les actes du séminaire national sur l'aménagement des sols, la conservation de l'eau, et la fertilisation ; p. 77-84

Forest F., 1991 : Intérêt et limites de l'apport de matière organique en zone soudano-sahélienne : Effet sur l'alimentation hydrique et sur le rendement de cultures d'arachide et de mil : in IFS ,1991 : Influence du climat sur la production des cultures tropicales ; p 93-104.

in Berrada A. et al. 1990 : les actes du séminaire national sur l'aménagement des sols, la conservation de l'eau, et la fertilisation ; p. 97-102.

INRAN, (non daté) : Essai de détermination des déficits relatifs d'alimentation en eau du mil à Tillabery et à Maradi ; rapport d'activité, 28 p.

INSAH, 1997 : Gestion des ressources naturelles au Sahel : Pratiques vulgarisées, ; 25 p..

Nicou R. et Chopart J.L., 1977 : les techniques d'économie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal, 18 p.

Nouri M. et al., 1990 : Utilisation de l'eau par le mil et niébé en culture pure et associée : in

THEME VIII

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DE LA GESTION DE L' EAU ET D'ÉVALUATION RAPIDE DES PERFORMANCES DES PÉRIMÈTRES IRRIGUÉS

Octobre 1999

RABIOU ALMADJIR

ONAHA NIAMEY / NIGER

INTRODUCTION

Sur les périmètres irrigués de la vallée du fleuve Niger en général et sur ceux étudiés par le PMI-Niger en particulier, les organisations paysannes responsables des modes de répartition et de partage de l'eau entre les usagers des périmètres, ne gèrent pas efficacement cette eau.

En effet, le diagnostic du PMI-Niger, notamment à travers l'analyse des données par le volet hydraulique, a abouti à des résultats quelque peu varié d'un périmètre à un autre.

Toutefois l'analyse de ces résultats a fait ressortir en ce qui concerne l'eau que celle-ci est mal gérée ; entraîne ainsi des charges élevées de pompe.

Cependant, une meilleure utilisation de cette eau passe par une gestion rigoureuse, laquelle implique une bonne organisation des utilisateurs et un mécanisme de suivi de la distribution.

Cela, afin de rentabiliser les investissements coûteux qui ont été consacrés aux Aménagements hydro-agricoles. Mais cette rentabilité repose fondamentalement sur une gestion rationnelle de cette ressource rare et des infrastructures par les organisations paysannes privilégiées qui sont bénéficiaires.

Le présent document comporte deux (2) parties :

1ère partie : Méthodologie Sectorielle d'analyse diagnostic

2ème partie : Méthodologie d'évaluation rapide des performances.

1ère partie :

**METHODOLOGIE SECTORIELLE D'ANALYSE
DIAGNOSTIC**

I. METHODOLOGIE D'ANALYSE DE LA GESTION DE L'EAU

Dans le cadre de l'approche globale de l'exécution du projet, le volet hydraulique a procédé à la collecte et à l'analyse des données de terrain en deux phases :

- Phase du diagnostic rapide
- Phase du diagnostic approfondi

- Phase du diagnostic rapide

Il s'agit au cours de cette phase conduite par toute l'équipe du projet, d'avoir une idée du fonctionnement du périmètre, de dégager les principales contraintes afin de formuler les axes de recherche.

Pour cela, de nombreuses données ont été collectées et analysées (voir méthodologie d'évaluation des performances des périmètres irrigués)

- Phase du diagnostic approfondi

Cette phase a pour objectif de mieux étudier les problèmes retenus à l'issue de la phase précédente, de leur chercher des solutions techniques et organisationnelles et de les tester au besoin.

Elle est bâtie sur les axes de recherche bien définis en première phase et s'est déroulée en deux (2) étapes : formulation des hypothèses et définition de la zone d'étude.

*** formulation des hypothèses**

Il s'agit de mieux circonscrire les problèmes retenus et de formuler les hypothèses de travail, c'est à dire des propositions provisoires que la recherche aura à confirmer, infirmer ou nuancer.

Exemple d'hypothèse formulée :

PROBLEME IDENTIFIE	HYPOTHESE DE TRAVAIL
Absence de modulation des volumes apportés pour réaliser des économies d'eau à l'arrosage	Les volumes apportés sont supérieurs aux besoins en eau du périmètre.

*** Définition de la zone d'étude**

C'est une des étapes importantes du diagnostic approfondi. Il s'agit en fonction des objectifs poursuivis et des moyens dont on dispose de déterminer le champ d'intervention. Pour cela, le Volet Hydraulique a mené son étude sur une maille assez représentative du périmètre, où l'on rencontre toutes sortes de problème (hydrauliques, sociaux, agronomiques, pédologiques...).

- La démarche

Trois phases fonctionnelles ont été mises aux point comme axe de recherche à savoir :

- A la ressource
- Au réseau d'irrigation
- A la parcelle.

A chaque niveau, l'analyse doit répondre aux questions suivantes :

1) Les apports d'eau sont-ils supérieurs aux besoins ?

- Si oui, quelle est la marge de progrès possible en terme de gestion de l'eau
- Si non, où se situe le déficit et quelle en est la cause ?

2) Y a-t-il équité dans la distribution de l'eau ? En cas d'inéquité, qu'elles peuvent en être les raisons ?

3) Les réseaux (irrigation, drainage et pistes) sont-ils fonctionnels et suffisamment bien entretenus pour garantir la pérennité de l'aménagement.

Après le choix de la maille d'étude représentative de l'ensemble des problèmes du périmètre, la démarche a consisté à examiner :

- La gestion de l'eau à la source à travers une comparaison entre les apports et les besoins ;
- La gestion de l'eau au niveau du réseau d'irrigation, c'est à dire la répartition de l'eau entre les secondaires d'un même canal principal, la gestion de l'eau à la maille et l'analyse de l'état physique du réseau ;
- La gestion de l'eau à la parcelle à travers une «photographie instantanée» des parcelles d'un même arroseur en vue de savoir l'existence ou non d'un tour d'eau.

II. GESTION DE L'EAU

L'efficacité de l'irrigation passe par un contrôle des apports d'eau. L'analyse de la gestion de l'eau a révélé que les organisations paysannes ne se préoccupent pas de ce contrôle, malgré les surcharges financières que cela entraîne sur la redevance.

- Part de l'eau et de l'énergie dans la redevance

Le volet hydraulique du PMI-Niger a utilisé l'indicateur de performance ci-dessous pour calculer les coûts de pompage d'eau sur les périmètres étudiés.

$$\text{Formule : } CE = \frac{\text{CTE}}{\text{APS}} = \text{FCFA/m}^3$$

CE = Coût du m³ d'eau (FCFA/m³)

CTE = Charges Totales liées à l'eau (FCFA/)

APS = Apports Saisonniers ou Volume pompé (m3)

Il découle de l'analyse que les coûts globaux sont de l'ordre de 2.3 à 6.0 FCFA/m3. Ils représentent la plus grande proportion (60 à 70 %) de la redevance (Tableau N°1).

Par analogie, la part de l'électricité dans la redevance vaut 20 à 40 % pour l'ensemble des périmètres.

Tableau n°1 : Coûts du mètre cube d'eau pompée

SAISON	SAGA		KOURANI BARIA I		TILLAKAINA I	
	Coût du m3 d'eau fCFA/m3	Part de l'eau dans la redevance %	Coût du m3 d'eau fCFA/m3	Part de l'eau dans la redevance %	Coût du m3 d'eau fCFA/m3	Part de l'eau dans la redevance %
SS92	2.38	65.70	-	-	3.44	59.0
SH92	4.70	60.72	2.58	60.24		
SS93	2.29	61.98	1.90	66.77		
SH93	4.24	59.58	-	-		
SS94	2.53	62.62	-	-	4.52	55.0
SH94	6.04	67.42	-	-		
SS95	4.26	59.17	-	-		
SH95	-	-	-	-		
MOY.						
SS	2.87	62.37	1.90	66.77	3.98	57.0
SH	4.99	62.57	2.58	60.24		

Source : PMI-Niger

L'amélioration des performances des périmètres irrigués passera donc forcément par une meilleure gestion de l'eau en vue de réduire les charges d'exploitation. En effet, l'énergie représente 30 à 60 % du coût total de l'eau qui, plus est l'élément compressible.

- Valeur culturelle par unité d'eau

Les résultats obtenus par le volet hydraulique du PMI-Niger indiquent par les valeurs de l'indicateur de performance ci-dessous que chaque mètre cube d'eau pompé produit en moyenne 0.28 (KBI) à 0.37 kg DE RIZ PADDY (Saga) en saison sèche et 0.23 (KBI) à 0.66 kg de riz (Saga) en saison humide pour une valeur monétaire évaluée entre 28.03 fCFA (KBI) et 36.58 fCFA (Saga) en saison sèche et 23.11 fCFA (KBI) et 66.14 fCFA (Saga) en saison humide.

Formule de PEI :

$$\text{Rmp. SI} \times \text{PU}$$

$$PEI = \frac{\text{-----}}{APS} = \text{fCFA/m}^3$$

- PEI = Productivité de l'eau d'irrigation (fCFA/m³)
 RMP = Rendement moyen de la campagne (kg/ha)
 SI = Superficie irriguée pendant la campagne (ha)
 PU = Prix unitaire aux producteurs (fCFA/kg)
 APS = Apports saisonniers ou volume pompé (m³)

Tableau n°2 : Valeur culturale par unité d'eau

Périmètre/Saison	Production totale (kg)	Valeur de la production (prix SS95)	Volume d'eau pompé (m ³)	Productivité du riz paddy (kg/m ³)	Production par m ³ d'eau pompée (fCFA/m ³)
SAGA					
SS92	1.604.610	160.461.000	5.682.900	0.28	28.24
SH92	1.934.940	193.494.000	2.486.970	0.78	77.80
SS93	2.083.689	208.368.900	6.015.140	0.35	34.64
SH93	1.966.500	196.650.000	3.216.020	0.61	61.15
SS94	2.093.040	209.304.000	5.908.130	0.35	35.43
SH94			3.112.600		-
SS95	1.861.240	186.124.000	3.875.820	0.48	48.02
SH95	1.800.820	180.082.000	3.027.690	0.59	59.48
Kourani-Baria I					
-	-	-	-	-	-
SH92	1.143.130	114.313.000	4.947.050	0.23	23.11
SS93	2.112.460	211.246.000	7.536.710	0.28	28.03
-	-	-	-	-	-
Moyenne					
Saga SS				0.37	36.58
SH				0.66	66.14
Kourani-Baria I					
SS				0.28	28.03
SH				0.23	23.11

Source : PMI-Niger

De la production totale enregistrée sur les périmètres et sa valeur d'une part et du volume d'eau pompé dans le système d'autre part, le volet hydraulique du PMI-Niger est arrivé à une estimation de la valeur culturale obtenue par mètre cube de l'eau pompée.

Ces chiffres présentés dans le tableau n°2 ci-dessus sont très bas et peuvent être améliorés. En effet, des observations sur le terrain du PMI-Niger, aucune indication montre que beaucoup trop d'eau est utilisé sur des parcelles individuelles, il semble que les raisons les plus vraisemblables pour ces chiffres bas de productivités d'eau sont :

- Rendements bas des cultures en raison des pratiques culturales défectueuses, particulièrement à Kourani-Baria I ;
- Pertes d'eau importantes dans les canaux d'irrigation.

Les pratiques paysannes défectueuses conduisent au non respect du calendrier cultural qui a des conséquences sur la gestion de l'eau. En effet l'ONAHHA a recommandé un calendrier cultural optimal pour tous les périmètres rizicoles, dont la saison humide devrait commencer autour du 1er Juillet et prendre fin environ du 20 Décembre, tandis que la saison sèche devrait commencer à partir de 20 Décembre et prendre fin vers le 30 Juin. Dans la pratique, le calendrier cultural qui est suivi par les exploitants est très différent de manière significative (surtout à Kourani-Baria) de celui prescrit par l'ONAHHA, pour diverses raisons dont : compétition des cultures dunaires, intérêt pour la parcelle, équipement insuffisant etc.....

Aussi le comportement des exploitants varie largement sur chaque périmètre. Les seules périodes où toutes les superficies cultivées dans les périmètres sont irriguées, se situent de mi-mars à fin Avril et de mi-septembre au début Novembre. Durant tous les autres mois, il y a seulement une irrigation partielle. C'est à dire en terme de gestion de l'eau l'utilisation des pompes doit être faite, soit en fonction du taux d'occupation des parcelles soit en fonction de la progression des récoltes.

Les observations du PMI-Niger ont permis de constater des différences entre le calendrier recommandé et ce qui se passe réellement sur le terrain. Par exemple à Kourani-Baria I, pendant la saison humide 1995, 50 % de repiquage ont été effectués après le 2 Septembre bien que les dates officiellement recommandées pour cette activité soient du 1er au 31 Juillet (voir graphique n°1). C'est pourquoi, la durée médiane de retard a été de 48 jours par rapport au calendrier officiel. Le temps d'achever 10 à 90 % du repiquage total devrait être d'environ 20 jours si le calendrier officiel était appliqué. Mais l'on constate qu'il est d'environ 46 jours.

En dehors du problème de compétition des cultures pendant la saison humide (évoqué plus haut), un autre problème particulier en rapport avec cette question de dates de repiquage est la pratique de la gestion commune des pépinières de riz. Au Niger, les paysans individuels n'ont pas généralement leurs propres pépinières. Leurs coopératives et l'ONAHHA les découragent de le faire parce qu'avec les pépinières privées, les exploitants adopteraient probablement des variétés de plants et le mélange en résultant causerait des difficultés plus tard aux étapes de la commercialisation et du traitement. Par conséquent, une zone d'environ 5 % de la superficie aménagée, dans chaque GMP est réservée à la production commune de plants dans les pépinières. Les semences dans les pépinières sont fournies aux GMP par leurs coopératives dans les années où ils décident de les renouveler, autrement elles sont produites localement au sein de chaque groupement.

Sous cette procédure, l'établissement et le semis des pépinières sont sous le contrôle de la coopérative tandis que le repiquage reste l'apanage de chaque exploitant individuel, qui peut venir à la pépinière le jour de son choix (malgré le plan de campagne établi) prendre un nombre de plants qui convient à sa propre parcelle. Ainsi, il est possible de conformer de manière raisonnable les dates d'établissement des pépinières au calendrier cultural officiel, même si les repiquages ne suivent pas les directives officielles. Une conséquence évidente de cela est que les plants seront trop vieux à la date de repiquage.

III. GESTION DES INFRASTRUCTURES

- Principe de fonctionnement du réseau

On retient les principes en usage sur les aménagements des cuvettes au Niger.

- Fonctionnement des canaux

Les canaux fonctionnent en commande par l'amont. On délivre en amont un débit déterminé suivant un calendrier préétabli. Ce débit doit obligatoirement être prélevé par dérivations vers les quartiers ou sous quartiers. On ouvre les prises des quartiers en aval avant de délivrer le débit en amont et on les ferme après la fermeture de la prise en amont. La gestion de l'eau doit tenir compte du temps de réponse des réseaux.

Par contre, un bief du canal principal fonctionne en commande par l'aval et sert de bief de régulation des pompes. Cette régulation est imposée par le fait que le débit fourni par les pompes ne peut être strictement égal au débit requis dans le réseau. En effet, ce débit est fixe alors que le débit pompé est multiple du débit des pompes qui, lui même, varie en fonction de la cote du plan d'eau du fleuve.

- Mode théorique de distribution de l'eau

La distribution de l'eau se fait en proportionnelle continue (les canaux principaux et secondaires étant toujours en eau). Le tour d'eau s'applique sur chaque secondaire, une rotation devant se faire entre les tertiaires d'un même quartier hydraulique.

Ce tour d'eau est basé sur cinq (5) principes simples et intangibles :

- Principe n°1 : le tour d'eau ne connaît pas le temps inférieur à ½ journée.
- Principe n°2 : le tour d'eau est hebdomadaire et est reconduit inchangé pour toutes les semaines de l'année.
- Principe n°3 : les arrosages s'adaptent aux variations saisonnières des besoins en eau par modulation de la durée d'irrigation
- Principe n°4 : En cas de panne d'irrigation, le tour d'eau est cependant maintenu, les rattrapages des pannes se faisant (pour celles inférieures à 48 heures, par prélèvements nocturnes sur la réserve des canaux sans pompe)
- Principe n°5 : le tour d'eau devant être fixe, il est matérialisé sur le terrain par une signalisation à la peinture sur le masque de chaque module préfabriqué. Les jours de la semaine sont chacun symbolisés par une couleur, un jour de marche local étant réservé au repos. Une demi-journée est symbolisée par une demi-bande de peinture.

- Module d'équipement

Les normes établies pour les cuvettes en bordures de plaine fixent le module d'équipement à 3 litres/s/ha pour les périmètres irrigués rizicoles

Cette valeur correspond à la satisfaction des besoins de pointe en irriguant 15 heures sur 24 heures et 6 jours sur 7.

$$Q_e = Q_{fcp} \text{ (l/s/ha)} \times \frac{24}{15} \times \frac{7}{6}$$

Q_e = débit d'équipement

Q_{fcp} = débit fictif continu de pointe

Aucun de ces tours d'eau n'était en application quant le PMI-N a conduit ses activités de recherche.

Dans le cadre du diagnostic approfondi, phase "test de solutions proposées", le volet hydraulique du PMI-Niger a effectué des efforts supplémentaires au niveau de chacun des périmètres (à part à Tillakaina) pour constituer de nouveaux calendriers de tour d'eau, dont la mise en oeuvre a eu lieu sur la maille hydraulique d'étude, où les exploitants se sont plaints de difficultés en approvisionnement d'eau. Ces calendriers étaient des tours d'eau de 7 jours. Aucun de ces nouveaux tours n'a survécu.

Le principe actuellement en vigueur dans les périmètres rizicoles est une forme d'irrigation à la demande. En fait, chaque GMP a un délégué chargé d'irrigation qui décide de façon quotidienne des parties des GMP qui sont dans un besoin immédiat d'irrigation sur base soit des demandes personnelles des exploitants soit d'une inspection. Les délégués informent le directeur du périmètre et/ou le pompiste. Ces derniers décident sur la durée de fonctionnement des pompes sur la base d'information des délégués d'irrigation.

Les raisons d'abandon de ces calendriers de tour d'eau (du moins après le départ de l'équipe du projet) peuvent avoir des sources variées. Une des raisons peut être qu'un intervalle d'irrigation de 7 jours n'est pas nécessaire dans ces périmètres. Par exemple à Saga, les intervalles d'irrigation observés sur le terrain sont plus grands (13 à 15 jours). Néanmoins, les rendements des cultures sont bons. Une irrigation avec un calendrier fixe de tour d'eau signifierait contrainte et présence régulière dans la parcelle.

Une autre raison qui ne favorise pas des tours d'eau fixes peut être le fait que tous ces périmètres comptent sur l'énergie électrique et en cas d'interruption électrique (supérieure à 48 heures : principe n°4), les exploitants qui sont sous le régime d'un calendrier strict peuvent être à cours d'eau pendant 7 jours. Une flexibilité est à rechercher dans ces conditions.

IV. CONCLUSIONS/RECOMMANDATIONS

Nous pouvons conclure que les exploitants ne veulent pas utiliser de tels calendriers ou trouvent quelque chose qui ne va pas en eux.

L'irrigation à la demande qu'ils pratiquent a les avantages, d'être flexible et sensible au besoin réel.

Elle convient bien aux périmètres rizicoles où le besoin d'irrigation est très facilement reconnu visuellement et peut-être prévu une semaine en avance pour que des groupes d'exploitants se trouvant le long du même canal tertiaire puissent être approvisionnés en même temps. C'est pourquoi, la méthode d'approche doit être ascendante pour mieux apprécier la gestion de l'eau paysanne par rapport à l'approche techniciste de préétablissement de gestion du réseau, puisqu'on passe d'une distribution au tour à une distribution à la demande.

Cependant, un tour d'eau même basé sur un consensus entre les paysans doit être appuyé par un processus de prise de décision dans la distribution de l'eau.

• Processus de prise de décision dans la distribution de l'eau

Cette démarche vise le renforcement de la structure existante, la mise en place d'un mécanisme de prise de décision et l'équité dans la distribution de l'eau. Cela permettra de réaliser une économie d'eau d'irrigation en procédant à une modulation (ajustage) des vannes des modules à masque placés en tête des secondaires en vue de mettre en adéquation l'offre en eau avec la demande «aval» paysanne.

Pour la bonne conduite de cette démarche, la coopérative devra se doter d'une structure adaptée à une rationalité.

Cette structure devra se servir d'un processus (mécanisme) de prise de décision dans la distribution de l'eau.

• La structure

Elle sera composée de la façon suivante :

- Au niveau de chaque tertiaire, un chef d'unité sera élu ;
- Au niveau de chaque quartier hydraulique, un chef de quartier sera élu. Il coiffera hiérarchiquement les chefs d'unité.
- Au niveau du GMP, un chef de zone sera élu. Il devra coiffer les chefs de quartier.
- Au niveau de toutes les mailles, le directeur du périmètre coiffe les chefs de zones en vue d'harmoniser la structure.

• Le processus

- Au niveau du canal tertiaire, le chef d'unité collecte par semaine la demande aval paysanne, c'est à dire qu'il dresse la liste des paysans désirant irriguer dans la semaine.
- Au niveau du quartier hydraulique, le chef de quartier collecte les listes dressées par les chefs d'unité.
- Au niveau du GMP, le chef de zone collecte toutes les "demandes en eau" provenant des chefs de quartiers.

NB : Lorsqu'un quartier hydraulique appartient à 2 GMP distincts, son chef de quartier rendra compte aux deux chefs de zones pour leur permettre de s'acquitter de leur tâche.

- Au niveau de la maille, le directeur du périmètre collecte les données auprès des chefs de zones en vue de les exploiter aux fins de déterminer le nombre de vannettes à ouvrir au niveau du module à masque.

L'ouverture des vannettes, des modules à masques des canaux secondaires va imposer celle des canaux primaires et celle des tertiaires, le nombre de pompes à mettre en marche au niveau des stations de pompage.

2^{ème} Partie

METHODOLOGIE D'EVALUATION RAPIDE DES PERFORMANCES

I. DEMARCHE CONCEPTUELLE

1.1. Les principes de base

La démarche pour rédiger cette méthodologie s'est appuyée sur les principes suivants:

Principe 1: La méthodologie doit être basée sur des indicateurs de performance.

Principe 2: On doit s'inspirer de l'expérience capitalisée par le Projet au cours des cinq années d'expérience de recherche - développement sur les périmètres irrigués de la vallée du fleuve Niger.

Principe 3: Construire des indicateurs propres à l'évaluation rapide des performances des périmètres irrigués au Niger. Calculer et proposer des valeurs de références en vue d'une comparaison avec les indicateurs de performances.

Principe 4: La méthodologie ne doit pas être lourde contrairement aux méthodes classiques de diagnostic qui sont longues et coûteuses.

Principe 5: Définir clairement les utilisateurs de cette méthodologie.

Après maintes réflexions, il a été décidé que les utilisateurs de la méthodologie soient à priori les directeurs de périmètres (D.P.) et les coopératives.

1.2. Les caractéristiques des indicateurs.

A partir de ces principes, l'équipe du Projet a construit des indicateurs de performance répondant aux principaux objectifs des irriguants et des organisations paysannes.

Les objectifs majeurs identifiés par l'équipe sont:

En Hydraulique

- Minimiser le coût de l'eau;
- Valoriser l'eau d'irrigation;
- Distribution équitable de l'eau d'irrigation (quantité et fréquence).

2. En Agronomie

- Mieux produire;
- Bien écouler la production;
- Améliorer le revenu

3. En Sociologie:

- Bonne cohésion sociale;
- Bonne capacité organisation des coopératives;
- Amélioration de la situation financière des coopérative

Les indicateurs de performance, pour qu'ils soient utiles et fonctionnels, doivent être basés sur les objectifs ci-dessus et doivent avoir les caractéristiques suivantes:

- mesurables avec les ressources disponibles:
- peu coûteux à calculer
- stables

Il y a trois catégories d'indicateurs :

- Les indicateurs de performance: sont ceux qui mesurent le résultat obtenu par le système. Ils indiquent si le système a atteint ses objectifs (exemple: niveau de rendement).
- Les indicateurs de processus: permettent de connaître si les opérations sont effectuées de façon satisfaisante, et donc d'expliquer l'indicateur de performance (exemple: la variété, les doses d'engrais, la quantité d'eau, etc... permettent d'expliquer le niveau de rendement obtenu). Si un indicateur de performance n'est pas satisfaisant (qui sous-tend l'objectif), on examine les indicateurs de processus pour tenter d'en expliquer la cause.
- Les indicateurs déterminants : sont des critères qui décrivent certaines conditions du système qui peuvent gêner ou influencer sa performance. (exemple: La capacité de la station de pompage (litre/seconde/hectare) est un déterminant ; les variables sont d'autres déterminants.

Partant des principes énoncés et des caractéristiques des indicateurs de performance, l'équipe du projet a retenu les principaux qui ont servi de base à la méthodologie.

La méthodologie proposée a été donc construite essentiellement autour des principaux indicateurs de performance (PIP).

II. METHODOLOGIE D'EVALUATION RAPIDE DES PERFORMANCES

Cette méthodologie comprend deux phases essentielles:

- la phase d'évaluation des performances: Elle s'adresse aux DP qui s'en serviront pour rédiger un rapport saisonnier;
- la phase de diagnostic rapide complémentaire: Elle s'adresse à la Cellule Suivi-Evaluation de l'ONAH

Le directeur de périmètre utilisera la plate forme minimale d'indicateurs de performance contenue dans ce document pour évaluer, au cours de chaque campagne, les performances de son aménagement et en faire un rapport destiné à être restitué aux coopérateurs.

La Cellule Suivi - Evaluation procédera à la fin de chaque campagne à la saisie informatique des indicateurs de performance de tous les périmètres afin de pouvoir effectuer une analyse pluri - annuelle de leur évolution; ce qui permettra de déterminer non seulement les périmètres les plus performants (y compris les raisons des bonnes performances) mais aussi et surtout les plus déficients. La connaissance des déficiences de performance des périmètres ainsi identifiées permettra à la Cellule Suivi-Evaluation de faire participer les directeurs des dits périmètres à une éventuelle analyse diagnostique approfondie (cf.

Conclusions & recommandations) en vue de déterminer les causes des déficits de performances, de formuler et mettre en œuvre des propositions d'amélioration.

La présente méthodologie mise au point par le projet management de l'irrigation au Niger est une innovation en ce sens qu'elle permet désormais d'entreprendre l'analyse-diagnostic et l'évaluation rapide des performances des périmètres irrigués.

2.1. L'évaluation des performances

La phase d'évaluation des performances est l'outil destiné aux DP.

Elle comporte trois étapes, à savoir : la collecte des données, le calcul des principaux indicateurs de performance et leur comparaison aux valeurs de références.

2.1.1. Collecte des données de terrain sur les paramètres des indicateurs de performance

Au cours de cette première étape, le directeur de périmètre (DP) va collecter au niveau du périmètre irrigué les données indispensables aux calculs des indicateurs de performance. Elles s'identifieront aux paramètres permettant de calculer les indicateurs de performances.

Ces données sont collectées à deux niveaux :

- ◆ Au niveau de la station de pompage on collectera les paramètres permettant le calcul des volumes d'eau pompés par campagne, ou apports saisonniers : on relèvera pour chaque jour de la campagne et pour chaque pompe, le débit et le nombre d'heures de service.

Le temps de fonctionnement des pompes se lit sur leurs compteurs horaires, tandis que la détermination du débit nécessite la connaissance de la cote du plan d'eau dans le fleuve. Ces deux paramètres sont toujours relevés dans des carnets de pompage.

- ◆ Au niveau du bureau de la coopérative, on s'intéressera aux paramètres ci-dessous :

- Besoins Saisonniers (B.S)
- Charge totale liée à l'eau (C.T.E)
- Superficie totale irriguée pendant la campagne (S.i.)
- Superficie totale aménagée (S.a)
- Rendement moyen sur le périmètre (R.m)
- Redevances dues au cours de la campagne
- Redevances collectées et arriérés au cours de la campagne
- Nombre de femmes exploitantes (N.f.e)
- Nombre total d'exploitants (N.t.e)
- Maîtrise des attributions (rôles) des responsables coopératifs
- Prix de vente du kg de riz paddy,
- Coût moyen des engrais utilisés par hectare,
- Coût des semences utilisées par ha pendant la campagne
- Coût du labour par hectare
- Coût de la main d'œuvre salariée par hectare
- Redevance d'exploitation par hectare.

2.1.2. Calcul des principaux indicateurs de performances (PIP)

Pour la détermination des paramètres permettant de calculer les indicateurs de performance, en ce qui concerne les mesures de terrain destinés au calcul de ceux-ci, on se référera à la partie "indicateurs" en annexe B.

Les paramètres ainsi collectés permettent de calculer les principaux indicateurs de performance (PIP) qui sont:

- *En Hydraulique*

1. Coût du m³ d'eau pompée (CE)
2. Productivité de l'Eau d'Irrigation (PEI)
3. Indice de Disponibilité de l'Eau (IDE)

- *En Agro-économie*

4. Valeur de la production totale (VP);
5. Rendement ;
6. Revenu Monétaire Net (RN)

- *En sociologie*

7. Taux de récupération globale des crédits.
8. Fréquence d'assemblées générales et existence des procès verbaux au niveau GMP;
9. Intégration de la femme;

Chaque indicateur est détaillé en annexe B y compris la méthode de calcul, ainsi que les paramètres nécessaires.

2.1.3. Comparaison des valeurs réelles des indicateurs aux valeurs de référence

C'est une étape décisive dans l'évaluation des performances des aménagements hydro-agricoles.

A chaque indicateur défini (voir annexe 3), correspond une valeur de référence déterminée soit par le PMI-Niger soit donnée par la recherche. Pour le cas du projet, chaque valeur de référence correspond à celle du meilleur indicateur de performance observé sur les sites étudiés. Les valeurs de références utilisées dans ce document pourraient être réactualisées au besoin.

Le directeur du périmètre procédera ensuite à la comparaison des indicateurs de performance calculés aux valeurs de référence, ce qui lui permettra de déterminer les écarts de performances (E.P).

* *Si les écarts de performance sont jugés acceptables,*
Le Directeur de Périmètre conclura que la situation est satisfaisante.

* *Si les écarts de performance sont importants,*

- En cas de tendance à l'amélioration, il identifiera, à partir des indicateurs ayant connu un accroissement, les points forts de la gestion du périmètre irrigué *par les paysans; une restitution leur sera faite.*
- Le cas contraire, les indicateurs objets de la régression seront déterminés par le directeur de périmètre en vue de formuler des hypothèses sur les causes éventuelles d'un tel relâchement.

2.1.4. Hypothèses sur les causes de déficiences de performance.

Les indicateurs pour lesquels les écarts de performance ne sont pas acceptables souffrent de déficiences qui appellent le D.P. à formuler des hypothèses en vue de leur élucidation à travers une phase de diagnostic rapide complémentaire.

A cette étape, le DP dispose des informations nécessaires pour rédiger son rapport saisonnier.

2.1.5. Rapport saisonnier:

Le rapport saisonnier peut avoir la structure suivante :

Titre :

<p>Périmètre de :</p> <p><u>RAPPORT DE FIN DE CAMPAGNE SS/SH</u></p> <p><u>Auteur :</u></p> <p><u>Date :</u></p>

Le titre correspond à la page de couverture du rapport.

2.1.5.1. Introduction

Le DP peut énoncer qu'il s'agit du rapport de routine qui présente les résultats du périmètre en fin de campagne, et les difficultés rencontrées.

2.1.5.2. Collecte des données

Le DP exposera ici comment il a procédé pour la collecte des données. Par exemple : pour le rendement, il a exposé des carrés ; pour l'intensité culturale, il a fait la somme des superficies repiquées par les paysans et apportées à la superficie physique du périmètre (déjà connue). La méthodologie de collecte des données et les mesures de terrain à effectuer sont développées dans la méthodologie d'évaluation des performances. Il est recommandé que le DP se serve de ces méthodes.

2.1.5.3. Résultats et commentaires

2.1.5.3.1. Calcul des indicateurs

Le DP indiquera ici les indicateurs de performance qu'il a calculé ; et en face de chaque indicateur, il montrera le processus de calcul.

2.1.5.3.2. Comparaison des indicateurs avec les valeurs des références

Un tableau comparatif peut être dressé à ce niveau. Un exemple pourrait être ainsi qui suit :

Tableau : Indicateurs de performance du périmètre, SS/SH

Indicateurs de performance	Valeur de référence	Valeur calculée	Ecart	Observations
1. Rendement	5 T/ha	4,5 T/ha	-0,5 T/ha	Dégâts d'oiseaux
2. Etc.....	

Le tableau peut être suivi de commentaires relatifs aux écarts de performance qui pourraient être des déficits ou des améliorations ou même une stagnation.

2.1.5.4. Restitution des résultats aux producteurs

Le DP peut faire une restitution des résultats obtenues aux responsables paysans (les délégués et les membres de comité de gestion). Cela nous permettra d'avoir leurs opinions et suggestions.

2.1.5.5. Conclusions et recommandations

Le DP tirera les conclusions et dira les difficultés rencontrés et ses suggestions.

2.2. Le diagnostic rapide complémentaire

Le diagnostic rapide et complémentaire s'adresse à la cellule suivi évaluation de l' ONAHA. Ce diagnostic se veut une phase de complément d'information à la suite de la première phase. Elle sera donc basée sur les résultats d'évaluations des performances. Cette phase ne sera exécutée que si l' ONAHA la juge nécessaire. Pour cette phase, l'ONAHA pourra dépêcher une équipe sur le terrain.

Les différentes étapes du diagnostic rapide sont les suivantes :

- Collecte des données de base
- Enquête rapides de terrain
- Traitement des données
- Identification des déficiences de performance
- Hiérarchisation des déficiences de performance en DIR, et DNIR, définition des points forts
- Restitution
- Proposition d'amélioration aux DIR (déficiences immédiatement résolubles)
- Hypothèse pour l'élucidation des déficiences non immédiatement résolubles (DNIR)

2.2.1. Collecte des données de base

Elle se fera au niveau des institutions spécialisées en matière d'irrigation et doit permettre une meilleure compréhension du fonctionnement du périmètre irrigué.

2.2.2. Enquête rapide de terrain

Au cours de cette phase, de petits guides d'entretien devront être élaborés pour interviewer les différents acteurs du périmètre. Chaque guide s'adressera à un aspect particulier (hydraulique, sociologie, système de production, pédologie, etc...) de la gestion du périmètre.

Ces entretiens seront complétés par des observations physiques sur le terrain (de préférence au cours de la campagne). Elles porteront essentiellement sur :

- l'état des infrastructures
- le respect du tour d'eau
- l'existence de zones inondées
- l'existence de zones à difficultés d'irrigation
- le respect de certains thèmes techniques (planage, repiquage en ligne, respect densité, etc..)

2.2.3. Traitement des données

En plus des indicateurs de performance déjà calculés, l'équipe procédera au dépouillement des données recueillies par interview, observations, et mesures rapides de terrain.

L'analyse sera donc non seulement d'ordre qualitatif mais aussi quantitatif. Au cours de l'analyse des données, des recoupements devront être faits sur les plans agro-socio-hydraulique pour une meilleure compréhension du fonctionnement du périmètre ; ce qui permettra d'éviter les incohérences, et mieux cerner les déficiences de performances et les points de la gestion du périmètre irrigué.

2.2.4. L'identification des déficiences de performances et des points forts

Les déficiences de performance étant ainsi déterminées, l'équipe vérifiera si elles sont toutes immédiatement résolubles. Si les déficiences sont toutes immédiatement résolubles, elle élaborera des recommandations qu'elle restituera aux coopérateurs, sinon elle procédera à leur hiérarchisation en déficiences immédiatement résolubles (DIR) et en déficiences non immédiatement résolubles (DNIR). Ainsi, l'équipe pourra proposer des solutions d'amélioration par rapport aux DIR.

A ce stade du diagnostic rapide une séance de restitution aux coopérateurs s'impose afin de recueillir leurs réactions non seulement par rapport aux déficiences de performances constatées et la hiérarchisation qui en est faite, mais aussi par rapport aux points forts de la gestion de leur périmètre irrigué.

Les discussions entre l'équipe et les coopérateurs permettront de dégager les solutions aux déficiences immédiatement résolubles (DIR) et de retenir celles non immédiatement résolubles (DNIR) de façon à permettre à l'équipe de formuler des hypothèses (axes de recherche) pour l'élucidation de ces dernières dans le cadre d'éventuelles études spéciales (voir Conclusion et Recommandations).

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La méthodologie d'évaluation rapide des performances des périmètres basée sur les indicateurs, permet de créer une base de données régulières, fiables et facilement exploitables. C'est pourquoi elle est proposée à l'ONAHA comme une méthode simple de suivi - évaluation des performances des périmètres irrigués pour combler un vide à ce niveau. L'existence d'une série de documents saisonniers réguliers aident beaucoup une évaluation de type réhabilitation et change la nature de celle-ci.

Donc, la méthodologie proposée constitue à notre avis un outil privilégié permettant à la Cellule Suivi - Evaluation de l'ONAHA d'effectuer avec l'appui des directeurs de périmètres, le suivi permanent des performances des aménagements hydro-agricoles au Niger. Ce tableau permettra une saisie par campagne ; et, pour chaque périmètre, les valeurs des principaux indicateurs de performance (PIP).

Après la saisie, on peut procéder à une classification des périmètres en périmètres performants et déficients.

- Pour les périmètres performants, l'Office peut (au besoin) identifier les raisons de leur bonne performance;
- pour les périmètres déficients, l'Office identifiera les indicateurs qui sont à la base des insuffisances ; et rechercher les causes

Les étapes de cette procédure de suivi-évaluation sont résumées en annexe C.

A l'issue de la phase d'évaluation des performances et de diagnostic rapide, des déficiences de performance importantes peuvent être relevées. Leur étude pourrait nécessiter un diagnostic approfondi qui est une évaluation spéciale. Son coût et le temps nécessaire sont certainement élevés. Elle doit être l'œuvre d'un organisme étatique ou d'un bureau d'études.

THEME IX

NORME DE L'IRRIGATION À MAITRISE TOTALE DE L'EAU (MTE) AU NIGER

Octobre 1999

ABDOU MOULAYE AHMED

ANPIP NIAMEY / NIGER

1) MAIN D'EAU , QUARTIER HYDRAULIQUES , TOUR D'EAU

1) Main d'eau ou module d'irrigation

La main d'eau ou module est le débit instantané disponible fourni par le réseau en l/s et maniable par l'irrigant .

Elle est fonction du type d'irrigation, du type de sol (léger ou lourd), l'on retiendra par expérience les valeurs suivantes :

TYPES D'IRRIGATION	SOLS LEGERS EN L/S	SOLS LOURDS EN L/S
Rigole de déversement (P.M)	20 - 40	15 -30
Callants à forte pente (P.M)	20 - 60	15 -60
Callants à forte pente (P.M)	40 - 100	25 -100
Bassins (riz)	40 - 100	20 -60
Sillons à forte pente	20 - 30	10 -20
Sillons à forte pente	20 - 40	15 -30
Maraîchage	10 - 15	

NB : Le choix d'une main d'eau est important car il conditionne le calibrage des canaux de distribution . Il est déterminé plus par expérience que par considérations purement technique: trop faible elle entraîne une perte de temps; trop forte, une perte d'eau.

On prendra toujours comme main d'eau, un nombre entier multiple de 5.

2°) Quartier Hydraulique (W)

Définition 1 :

En irrigation Gravitaire, c'est la surface de l'ensemble des parcelles qui peuvent être irriguées à partir d'une même main d'eau.

$W=m/DMP$; avec m en l/s , DMP en l/s/ha , et , W en ha

Définition 2 :

C'est un ensemble de canaux tertiaires faisant la rotation entre eux à partir d'une même main d'eau (voir assemblage de canaux tertiaires de Kourani - Baria) .

Le Quartier Hydraulique est souvent alimenté par un même canal secondaire appelé maille hydraulique.

3°) Distribution par rotation ou tour d'eau :

C'est le système de loin le plus répandu, il consiste à détourner une main d'eau pour chaque quartier hydraulique, et à la distribuer à tour de rôle entre les canaux tertiaires (si le tour est réalisé sur les secondaires) au prorata des surfaces qu'ils desservent.

Au niveau de chaque tertiaire une rotation devrait se faire d'aval en amont en respectant un temps d'irrigation par parcelle (encore appelé durée du poste d'irrigation) qui dépend essentiellement de sa taille .

Généralement, le tour d'eau est réalisé sur les réseaux de 2° ou 3° ordre, si bien que l'ensemble du réseau n'a pas besoin d'être constamment en eau.

A l'intérieur d'un même quartier hydraulique, le réseau est calibré pour distribuer une (1) ou plusieurs mains d'eau qui sont délivrées aux utilisateurs par un jeu d'ouvrages de prise généralement constitués de vannes.

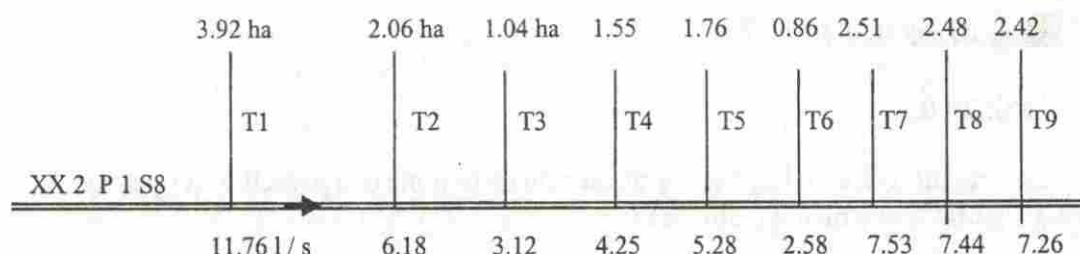
Ce système a l'avantage d'être simple; les dates et les durées d' arrosage étant déterminés à l'avance. Par contre cette méthode n'a guère de souplesse, et les besoins réels des plantes ne sont que partiellement pris en compte. Le gaspillage est donc obligatoire, mais de part sa conception ce système reste le plus employé malgré les inconvénients qui lui sont attachés.

Exemples :

1°) Kourani - Baria I :

L'exemple est pris sur le canal secondaire P1S8 (maille hydraulique) de Kourani - Baria I. Il alimente 9 canaux tertiaires T1 à T9 équipés de prises modulées préfabriquées de 15 l/s chacune.

La répartition des surfaces se fait conformément au schéma ci-dessous:



Les débits qui devraient être appelés pour desservir de telles surfaces sont mentionnés ci-dessus.

La surface du quartier hydraulique $W = \frac{M}{DMP}$

L'assemblage des canaux tertiaires en vue de constituer les quartiers hydrauliques devra se faire de 2 manières :

- 1) regrouper les tertiaires en petites entités (quartiers hydrauliques) dont les surfaces totales sont très voisines de W (5 ha) chacune.
- 2) Ou par la constitution d'entités de canaux tertiaires dont les cumuls des débits sont proches de la main d'eau (15l/s).

L'application au P1s8 nous donne le quartier suivants :

Arroseurs	S. arrosée (ha)	Q. th (l/s)	QH1 (w1 = 3,92 ha (15 l/s
T1	3,92	11,76	

T2	2,06	6,18	QH2 (w2 = 4,95 ha ((m = 15 l/s
T3	1,04	3,12	
T4	1,55	4,25	
	----- 4,65 ha	----- 3,95 l/s	

T5	1,76	5,28	QH3 (w3 = 5,13 ha ((m = 15 l/s
T6	0,86	2,58	
T7	2,55	7,53	
	----- 5,13	----- 15,95	
T8	2,48	7,44	QH4 (w4 = 4,90 ha ((m = 15 l/s
T9	2,42	7,26	
	----- 4,90 ha	----- 14,70 l/s	

Conformément aux normes d'irrigation au Niger, le temps d'irrigation de chaque quartier hydraulique est de 6 j et la rotation se fait entre les canaux tertiaires se détermine au prorata de la superficie qu'il doit desservir.

Exemple Kourani - Baria I

Au niveau du quartier hydraulique n° 1 QH1

$$QH1 \rightarrow (T1 = \frac{6j \times 3,92 \text{ ha}}{3,92 \text{ ha}} = 6j$$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned} T2 &= \frac{6 \text{ j} \times 2,06 \text{ ha}}{4,65 \text{ ha}} = 2,65 \text{ j} = 2,50 \text{ j} \end{aligned} \right. \\
 & \left\{ \begin{aligned} T3 &= \frac{6 \text{ j} \times 1,04 \text{ ha}}{4,65} = 1,34 = 1,50 \text{ j} \end{aligned} \right. \\
 & \left\{ \begin{aligned} T4 &= \frac{6 \text{ j} \times 1,55 \text{ ha}}{4,65} = 1,98 = 2 \text{ j} \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

QH2 →

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned} T5 &= \frac{6 \text{ j} \times 1,76 \text{ ha}}{5,13} = 2,2 \text{ j} = 2 \text{ j} \end{aligned} \right. \\
 & \left\{ \begin{aligned} T6 &= \frac{6 \text{ j} \times 0,86 \text{ ha}}{5,13} \cong 1 \text{ j} \end{aligned} \right. \\
 & \left\{ \begin{aligned} T7 &= \frac{6 \text{ j} \times 2,51 \text{ ha}}{5,13} = 2,93 \text{ j} = 3 \text{ j} \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

QH3 →

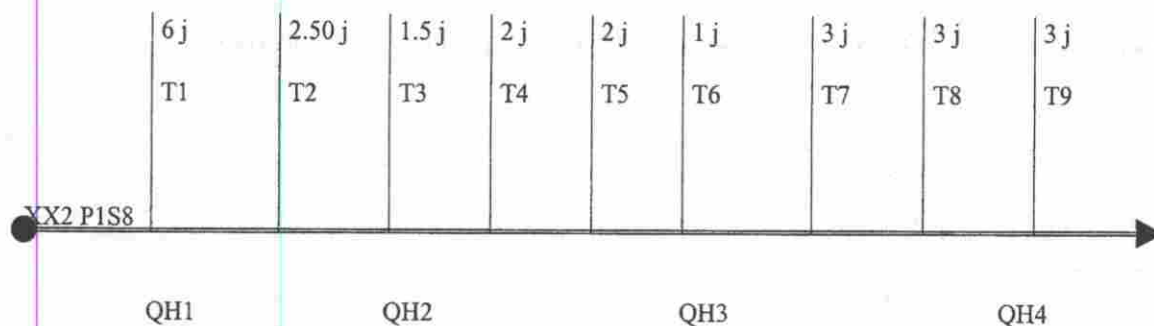
$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned} T8 &= \frac{6 \text{ j} \times 2,48 \text{ ha}}{5,13} = 3 \text{ j} \end{aligned} \right. \\
 & \left\{ \begin{aligned} T9 &= \frac{6 \text{ j} \times 2,42 \text{ ha}}{4,9} = 2,96 \text{ j} = 3 \text{ j} \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

QH4 →

N.B. : pour des raisons de commodité, les temps d'irrigation des canaux tertiaires sont arrondis à 0,5 j près. (Voir schéma ci-dessous)

Exercice d'application

Déterminer le calendrier d'irrigation du QH2 en considérant que l'irrigation commence un jeudi à partir du T4 (le mercredi étant réservé au marché de kokomani)



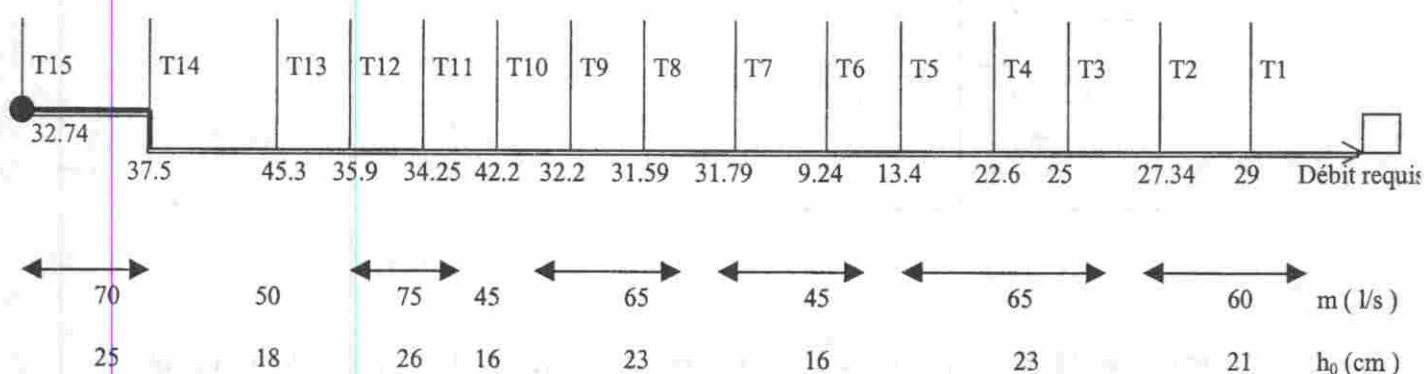
2) Cas du périmètre de Saga

Détermination de quartier hydrauliques, avec proposition d'intégration des parcelles spontanées de maraîchages

2.1 Tour d'eau

La maille d'étude retenue pour le périmètre de Saga est le canal secondaire S2P1. Elle se comporte comme suit :

10.5	10.5	10.6	11.8	10.75	13.4	9.4	10.45	9.87	3	4.3	7.2	7.5	8.7	8.95	Riz
0.62	3	0.75	0.25	1	1	2	0.12	1.12	0.12	0.25	0.5	1.25	0.62	1.12	Maraîchage
11.12	13.5	15.35	12.05	11.75	14.4	11.4	10.57	10.97	3.12	4.55	7.7	8.75	9.32	10.073	Total



Loi de débit pour les vannes $Q = m s \sqrt{2g \Delta h}$

Où $m = 0,61$: coefficient de contraction latérale

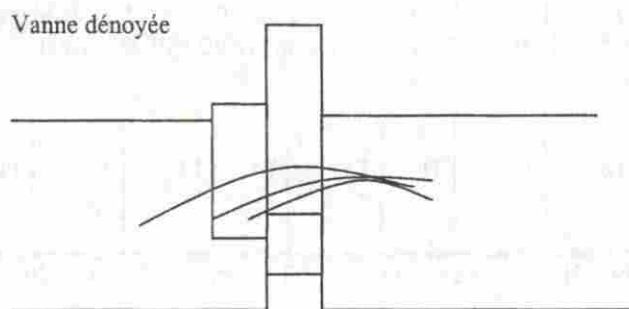
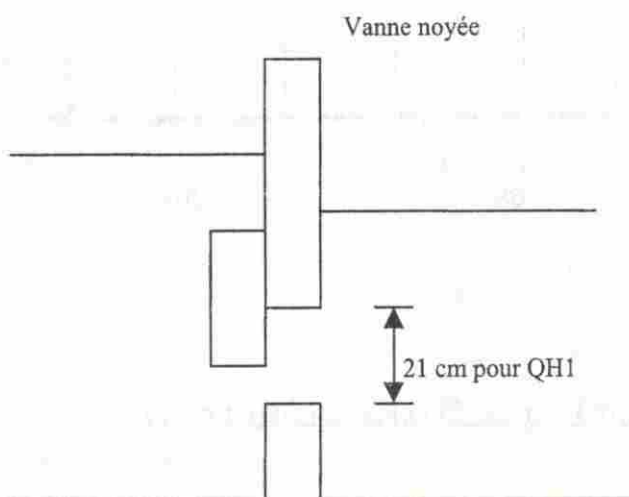
$S =$ section de = $b \times h_0 \times v$

Δh = différence entre les niveaux amont - aval dans le cas d'un écoulement noyé

ou

= différence entre la cote du plan d'eau nominal et celle du centre de gravité de la vanne (en écoulement dénoyé).

Nous prenons $\Delta h = 7$ cm par analogies à la perte de charge que créerait la vanne



L'assemblage des arroseurs en vue de constituer les quartiers hydrauliques devrait ressembler le plus possible à la pratique paysanne actuelle. Nous optons pour les mains d'eau importantes (>40 l/s) compte tenu des trop grandes largeurs des canaux tertiaires. Elles seront variable car les quartiers ne sont pas de même importance (en superficie) voir tableau n°1. C'est ainsi que nous obtenons les quartiers hydrauliques suivants :

Tableau 1

Quartiers hydrauliques	Composants du quartiers	Surface du quartier ha	Main d'eau (l/s)	Hauteur d'ouverture des vannes 60 x 40 cm
QH1	T1, T2	19.39	60	21
QH2	T3, T4, T5	21	65	23
QH3	T6, T7	14.1	45	16
QH4	T8, T9	21.97	65	23
QH5	T10	14.4	45	16
QH6	T11, T12	23.8	75	26
QH7	T13	15.35	50	18
QH8	T14, T15	24.62	70	25

Les hauteurs d'ouvertures des vannes se calculent en appliquant la loi de débit des vannes.

Exemple :

Pour le quartier hydraulique QH1, les tertiaires T₁ et T₂ font la rotation entre eux.

$$\text{Le temps d'irrigation du T1} = \frac{6 \text{ j} \times 10.07}{19.39} = 3 \text{ j}$$

$$\text{Le temps d'irrigation du T2} = \frac{6 \text{ j} \times 9.32}{19.39} = 3 \text{ j}$$

Lorsqu'un arroseur du quartier est ouvert, il doit être réglé pour être pour permettre de détourner 60l/s.

Les arroseurs de Saga étant équipés de vanne 60 x 40, on en déduit b = 0,40

$$\text{d'où } 0,060 = 0,61 \times (0,40 \times h_{0,v}) \sqrt{2 \times 9.81} \times 0.7$$

$$\Rightarrow h_{0,v} = 0.21 \text{ m soit } 21 \text{ cm}$$

Toutefois, il est à signaler, pour que ces vannes puissent délivrer des débits quasi-constants, un seuil devra être construit dans le secondaire en aval immédiat de chacune d'elle pour garantir un plan d'eau quasi constant au droit de la dite prise, et un autre en tête de canal tertiaire pour s'affranchir des conditions aval.

2.2 Proposition d'intégration

Causes d'apparition des parcelles spontanées de maraîchage

Pendant la réalisation du périmètre de Saga, les zones marécageuses (dépressions) et celles à micro - reliefs qui ne se prêtent pas à la logique d'irrigation gravitaire n'ont pas été aménagées. Toutefois la vocation rizicole assignée à ce périmètre ne prévoit aucune évolution du contexte socio-économique pouvant amener les paysans à diversifier les cultures. Les projeteurs n'avaient pas émis l'hypothèse que la motricité humaine pourrait servir à

transporter l'eau nécessaire au maraîchage, des canaux les plus proches vers des bassins de stockage que les paysans pourraient aménager dans les parcelles spontanées.

- a) Les parcelles de maraîchage devront s'adapter au tour d'eau du tertiaire qui les alimente.
- b) Entendu qu'il devrait exister aussi une rotation entre les parcelles d'un même canal tertiaire, les exploitants maraîchers devraient suivre cette rotation pour stocker de l'eau dans des bassins, afin de respecter les fréquences d'irrigations (tous les 2 jours) qui s'impose pour leurs cultures.

De préférence à toute solution d'expulsion des exploitants maraîchers, il est préconisé de les intégrer dans le nouveau tour d'eau pourvu qu'il respecte les conditions a) et b) .

II) Processus de prise de décision dans la distribution de l'eau .

L'option de l'irrigation à maîtrise de l'eau nous impose de réaliser une économie d'eau en procédant à une modulation (ajustage) des vannes des modules à masques des mailles hydrauliques en vue de mettre en adéquation l'offre en eau avec la demande avale paysanne.

Pour ce faire, une structure adaptée à cette rationalité devra être mise en place . Elle devra ensuite se servir d'un processus (mécanisme) de prise de décision dans la distribution de l'eau .

La structure :

Elle sera composée de la façon suivante :

- Au niveau de chaque tertiaire, un chef d'unité sera élu ;
- Au niveau de chaque quartier hydraulique, un chef de quartier sera élu. Il coiffera hiérarchiquement les chefs d'unité.
- Au niveau de chaque Groupement Mutualiste de Production , un chef de zone sera élu. Il supervisera les chefs de quartier.
- Au niveau de toutes les mailles, le Directeur du périmètre coordonnera les activités des chefs de zone en vue d'harmoniser la structure.

Le processus :

- Au niveau du canal tertiaire, le chef d'unité collecte journallement la demande aval paysanne, c'est à dire qu'il dresse la liste des paysans désirant irriguer le lendemain.
- Au niveau du quartier hydraulique, le chef de quartier collecte les listes dressées par les chefs d'unités.
- Au niveau du GMP, le chef de zone collecte toutes les demandes en eau provenant des chefs de quartiers.

- Au niveau de la maille, le Directeur du périmètre collecte les données auprès des chefs de zones en vue de les exploiter aux fins de déterminer le nombre de vannes à ouvrir au niveau du module à masque.

L'ouverture des vannes des modules à masques des canaux secondaires va imposer celles des canaux primaires, et celle des primaires le nombre de pompes à mettre en marche au niveau des stations de pompage.

Exemple : périmètre de saga

La collecte des demandes avales paysannes faites le 25 Avril 1993 a donné les résultats suivants :

Quartiers hydrauliques	tertiaires	Riz (nombre de parcelles)	Maraîchage (ha)
QH1	T1	25 parcelles / 35	1.12 ha
	T2	30 parcelles / 36	0.62 ha
QH2	T3	30 parcelles / 37	1.25 ha
	T4	25 parcelles / 32	0.5 ha
	T5	17 parcelles / 17	0.25 ha
QH3	T6	16 parcelles / 16	0.12 ha
	T7	35 parcelles / 40	1.12 ha
QH4	T8	40 parcelles / 45	0.12 ha
	T9	40 parcelles / 40	2 ha
QH5	T10	49 parcelles / 54	1 ha
QH6	T11	40 parcelles / 46	1 ha
	T12	46 parcelles / 51	0.25 ha
QH7	T13	60 parcelles / 62	0.75 ha
QH8	T14	44 parcelles / 44	3 ha
	T15	40 parcelles / 43	0.62 ha

Déterminer la position des vannes du module à masque ? Nous rappelons que le débit maximum de pointe du riz est de 3 l/s/ha et celui du maraîchage de 2 l/s/ha . La taille moyenne d'une parcelle à Saga est de 0.25 ha .

I. Flexibilité des réseaux d'irrigation :

L'observation du fonctionnement hydraulique de la maille de Kourani - Baria (i-e le secondaire P₁S₈) nous a permis de constater que le module à masque (XX₂) placé en tête du P₁S₈ n'est presque jamais amorcé; il en résulte une pénurie très grave d'eau à l'aval, au niveau des parcelles devant irriguer au niveau de la dernière moitié du canal P₁S₈ .

Compte tenue de l'observation précédente, il a été émis l'hypothèse d'une mauvaise répartition de l'eau issue de la tête morte de Kourani - Baria I , entre les différents canaux secondaires du principal P₁.

Une série de jaugeage effectués les 8 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14 , 15 Mai 1993, nous a permis de confirmer l'hypothèse précédente (voir schémas hydraulique en annexe) .

Il est apparu que les premiers secondaires (du $S_1 P_1$ au $S_5 P_1$) sont les mieux desservis (avec toujours un surplus) , tandis que ceux desservis par la partie aval du $C P_1$ connaissent des déficits importants de débits .

Ainsi, il a clairement été mis en évidence que le débit moyen en tête du $S_8 P_1$ est de 30 l/s (avec un minimum de 28 l/s et un maximum de 36 l/s) ; ce qui ne permet pas d'irriguer plus de la moitié des surfaces irrigables par la maille .

Le schéma suivant donne les valeurs moyennes des débits prélevés par les différents secondaires et donne une indication claire de la mauvaise répartition des débits entre les prises .

Le déséquilibre observé plus haut est lié au fait que le réseau a "une mauvaise" flexibilité, et, donc un réajustement des modules des canaux s'impose d'amont en aval (voir fig. ci - dessous) .

THEME X

CONCEPTION DES AMÉNAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES (AHA) À MAITRISE TOTALE DE L'EAU (MTE) AU NIGER

Octobre 1999

ABDOU MOULAYE AHMED

ANPIP NIAMEY / NIGER

C

1871

1871

1871

1871

1871

1871

1871

I) Conception des A.H.A à M.T.E. au Niger

1. - Conception générale

Les cuvettes, situées en zone inondable, sont généralement constituées d'un ensemble d'îlots séparés par de nombreux bras du fleuve.

L'aménagement de ces cuvettes implique la construction d'un endiguement de protection contre les crues du fleuve. La position et les points de fermeture de la digue vont dépendre de la topographie et des niveaux de crue du fleuve.

Exemples :

- * Cas de Saga : l'endiguement longe le fleuve pour se buter aussi bien en amont qu'en aval sur des terres hautes ;
- * Dans le cas de Dessa, la digue entoure entièrement le périmètre.

Station de pompage :

- choix du site
- débit nominal choisi tel que $QN = \text{débit d'équipement}$

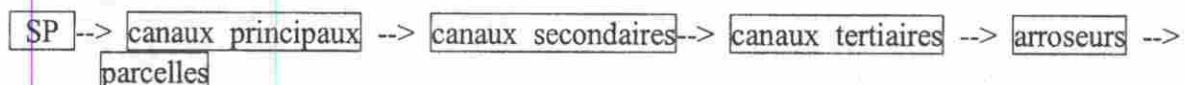
Lotissement en QH :

A l'intérieur du périmètre endigué, les sols (à vocation rizicole) sont lotis en quartiers hydrauliques d'une dizaine d'hectares sur les zones à topographie régulière (cas de Bonféba, Diomona, Dessa, Lata).

* Réseaux d'irrigation et de drainage

L'irrigation des QH est assurée par un réseau de canaux à écoulement gravitaire alimenté soit par pompage dans le fleuve, soit par prise gravitaire sur une barrage.

Le sens d'écoulement généralement observé est le suivant :



Tous ces canaux sont équipés d'ouvrages de prise dimensionnés et calés en altitude pour détourner le débit souhaité.

A l'opposé du réseau d'irrigation, un réseau de fossés est prévu pour recueillir les eaux d'assainissement provenant des pluies ou des surplus d'irrigation. Les eaux d'assainissement sont collectées dans les bras morts du fleuve isolés par l'endiguement (cas de Saga, Bonféba, Diomona, Lata etc ...).

En période d'étiage, une vanne de rejet gravitaire autorise l'évacuation de ces eaux ainsi accumulées vers le fleuve ; toutefois, en crue, l'évacuation se fera par pompage (station de drainage S.D).

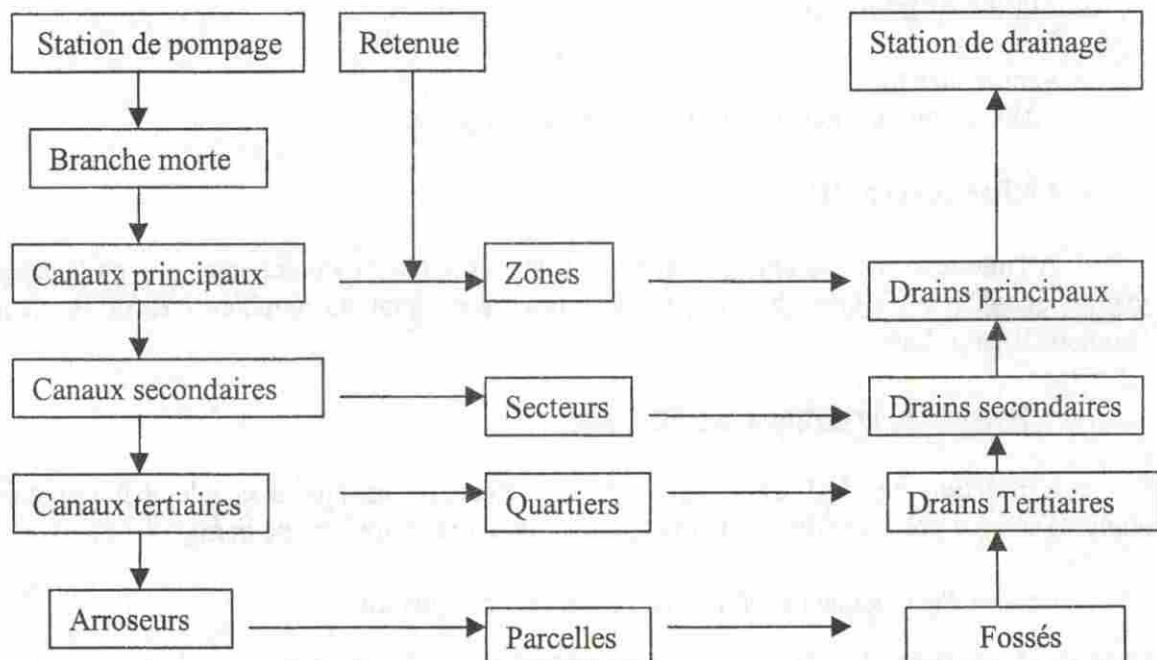
Les parcelles sont "drainées" par des "drains" parcelaires qui le sont à leur tour par des drains secondaires. Les drains secondaires sont interceptés par des drains principaux qui se jettent enfin dans les bras morts.

Tous les bras morts sont mis en communication entre eux de façon à assurer une vidange totale (ou partielle) vers le fleuve.

On notera au passage, que ces bras-morts sont souvent empoisonnés de façon à assurer à la coopérative des revenus multiples.

De même le "bourgou" ou *Echinochloa stagnina* peut-être planté dans les drains de façon à assurer une meilleure intégration agriculture-élevage.

Figure 3 (schématisation du système d'irrigation)



Réseau de pistes :

Un réseau de pistes longe les canaux et permet d'accéder aux quartiers d'irrigation et aux principaux ouvrages.

On distingue :

- des pistes parcellaires (ou tertiaires) pour le désenclavement des parcelles (opérations culturales, enlèvement des récoltes). Elles sont non revêtues de latérite,
- des pistes secondaires qui longent (jouxent) les canaux secondaires, souvent latéritiques (l = 5 m, e = 15 cm).
- des pistes principales longeant les canaux principaux, et reliant le P.I. à la R.N. de façon à faciliter le transport des produits et leur commercialisation,

Elles sont toujours couvertes de latérite (l = 5 m ; e = 15 cm)

Contre-exemple : cas de Koutoukalé.

N.B. : Les terres à vocation agricole aptes au riz ou plutôt à la polyculture, mais situées sur des zones difficiles à aménager (trop hautes, marécageuses etc...), pourront être irriguées par des techniques traditionnelles d'exhaure de l'eau cas de Saga.

2. - Lotissement en parcelles irriguées

Il résulte d'une adéquation entre les contraintes naturelles (topographie, pédologie, hydrologie) et les normes d'aménagement.

a)- Contraintes topographiques :

Lorsque le micro-relief est très accentué, les courbes de niveau sont très serrées (tous les 20 cm) ; ce qui conduit à un parcellaire très morcelé avec des mouvements de terre (nécessaires au planage) dépassant souvent les 400 m³, (même quand les parcelles sont parallèles aux courbes de niveau) et donc entraînant des plus-values. L'aménagement en parcelles régulières de 33 m x 150 m (soit 0,5 ha) peut s'avérer irrationnel, auquel cas il serait plus efficient de suivre les courbes de niveau (cas d'Asie).

b)- Contraintes pédologiques :

Une étude pédologique devrait être conduite afin d'établir une classification des terres en fonction de leur aptitude culturale, et, par suite, un zonage pédologique.

[contre-exemple	: Saga
[exemple	: Bonféba

c)- Contraintes hydrologiques :

Les contraintes à prendre en considération pour l'aménagement concernent :

- d'une part, les niveaux d'eau du fleuve qui ont une incidence :
 - . sur le calage des digues;
 - . sur la position des stations de pompage;
 - . sur le fonctionnement des stations (variation des hauteurs manométriques);
 - . sur la gestion du drainage;
 - . sur le canevas hydraulique (position et côte du point de départ du réseau imposé par l'emplacement des stations).
- d'autre part, les ruissellements des Bassins Versants (B V) qui doivent être déviés de la zone à aménager.

Contre-exemple : cas de Kourani-Baria

Exemple : Tillakaina, Bonféba, Diomana etc ...

3. - Module d'équipement

Les normes établies pour les cuvettes en bordure de plaine fixent le module d'équipement à 3 litres/s/ha pour les périmètres irrigués rizières.

Cette valeur correspond à la satisfaction des besoins de pointe en irriguant 15 heures sur 24 heures et 6 jours sur 7.

Exercice : Déterminer le débit d'équipement du périmètre irrigué de Saga sur la base d'une irrigation de 15h/jour, 6 jours sur 7.

Déterminer celui de Tillakaina sur la base d'une irrigation de 10 h/jour, 7 jours sur 7.

4. - Module de drainage ou débit spécifique de drainage

- i) - Il est calculé pour permettre de vidanger les casiers rizières en 10 jours.
- ii)- D'évacuer la pluie décennale de 24 heures en 3 jours (on considéra une hauteur des plants = 10 cm).

Applications :

- i) - 100 mm de lame d'eau \Longleftrightarrow 1000 m³/ha

Temps de vidange (s) = 24 x 3600 x 10

$$\text{d'où m.d} = \frac{1000 \times 1000 \text{ litres/ha}}{24 \times 3.600 \times 10 \text{ s}} = 1,16 \text{ litre/s/ha} \Rightarrow \boxed{\text{m.d} = 1,21/\text{s/ha}}$$

ii)- $P_{10} = 95 \text{ mm}$

- Hauteur d'eau après repiquage = 25 mm (période critique)

\Rightarrow Hauteur totale = 120 mm

A déduire : Evaporation + Infiltration = $10 \text{ mm/j} \times 3 \text{ j} = 30 \text{ mm}$

$$\text{hauteur admissible} = \frac{2 \text{ h}}{3} = \frac{2}{3} \times 100 \text{ mm} = 60 \text{ mm}$$

lame d'eau à évacuer en 3j = $120 - (60 + 30) = 30 \text{ mm}$,

$$\text{d'où m.d} = \frac{300 \times 1000 \text{ litres/ha}}{3 \times 24 \times 3600}$$

$$\text{m.d} = 1,16 \text{ litre/s/ha} = \boxed{1,21 \text{ litre/s/ha}}$$

5. - Principes de fonctionnement du réseau

On retient les principes en usage sur les aménagements des cuvettes du Niger

a) Fonctionnement des canaux

Les canaux fonctionnent en commande par l'amont. On délivre en amont un débit déterminé suivant un calendrier préétabli. Ce débit doit obligatoirement être prélevé par dérivations vers les quartiers au sous-quartiers.

On ouvre les prises des quartiers en aval avant de délivrer le débit en amont et on les ferme après la fermeture de la prise en amont. La gestion de l'eau doit tenir compte du temps de réponse des réseaux.

Par contre, un bief du canal principal fonctionne en commande par l'aval et sert de bief de régulation des pompes.

Cette régulation est imposée par le fait que le débit fourni par les pompes ne peut-être strictement égal au débit requis dans le réseau. En effet, ce débit est fixe alors que le débit pompé est un multiple du débit des pompes qui, lui-même, varie en fonction de la cote du plan d'eau du fleuve.

$$(T = 4V/q).$$

II) Conception des petits périmètres irrigués privés au Niger (PPIP) :

II.1 Proposition de modèles de fermes

Les systèmes seront conçus selon une typologie fondée sur une analyse multi-critère qui tiendrait compte des caractéristiques agro-pédologiques et hydrogéologiques de la zone du projet, mais aussi des capacités d'appropriation des bénéficiaires du point de vue technique et économique.

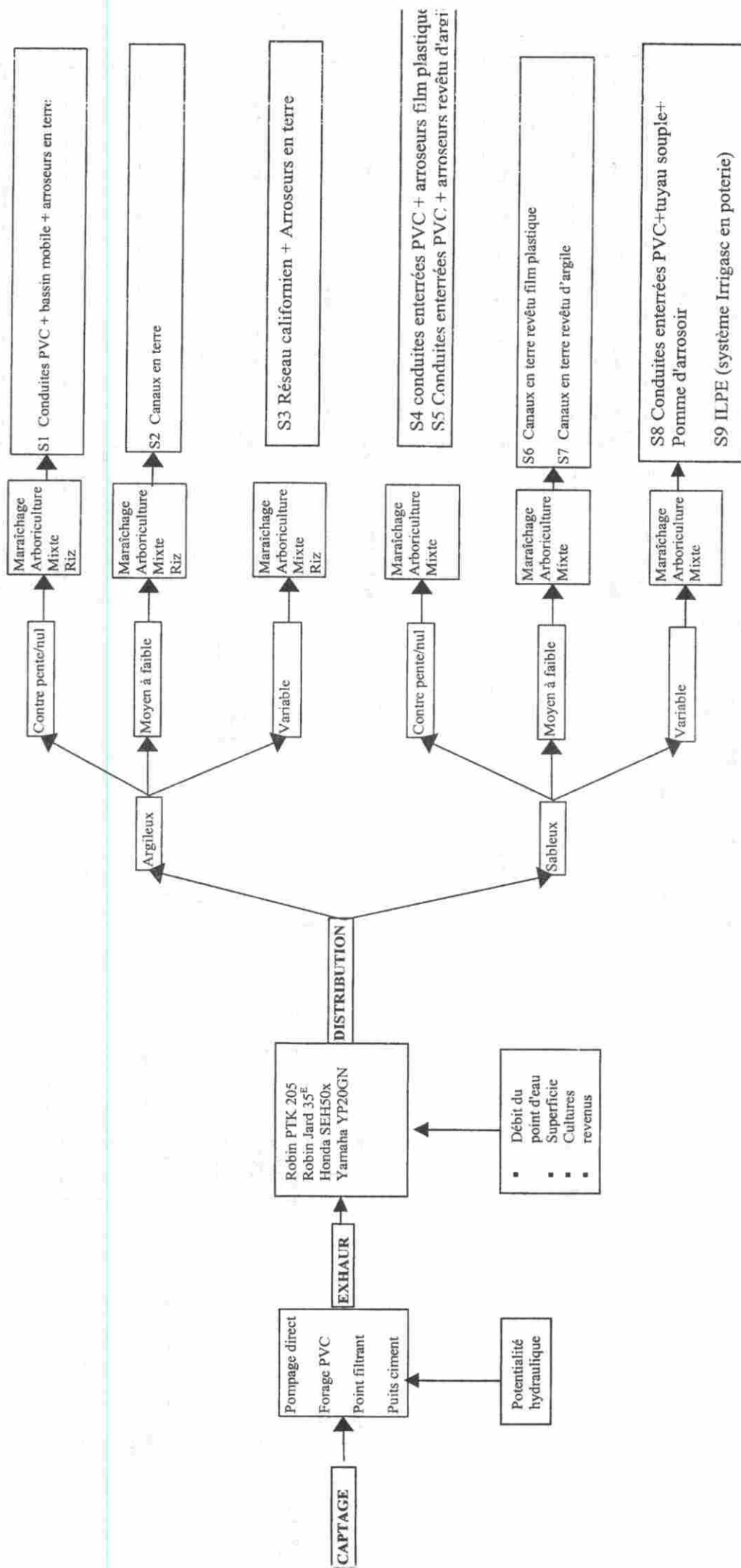
Cette analyse reposera sur cinq éléments principaux :

1. ressource en eau
2. type de sol (argile, sable, etc...)
3. topographie (pente nulle, faible à moyen, variable, points hauts, dépressions ...)
4. cultures envisagées
5. superficie

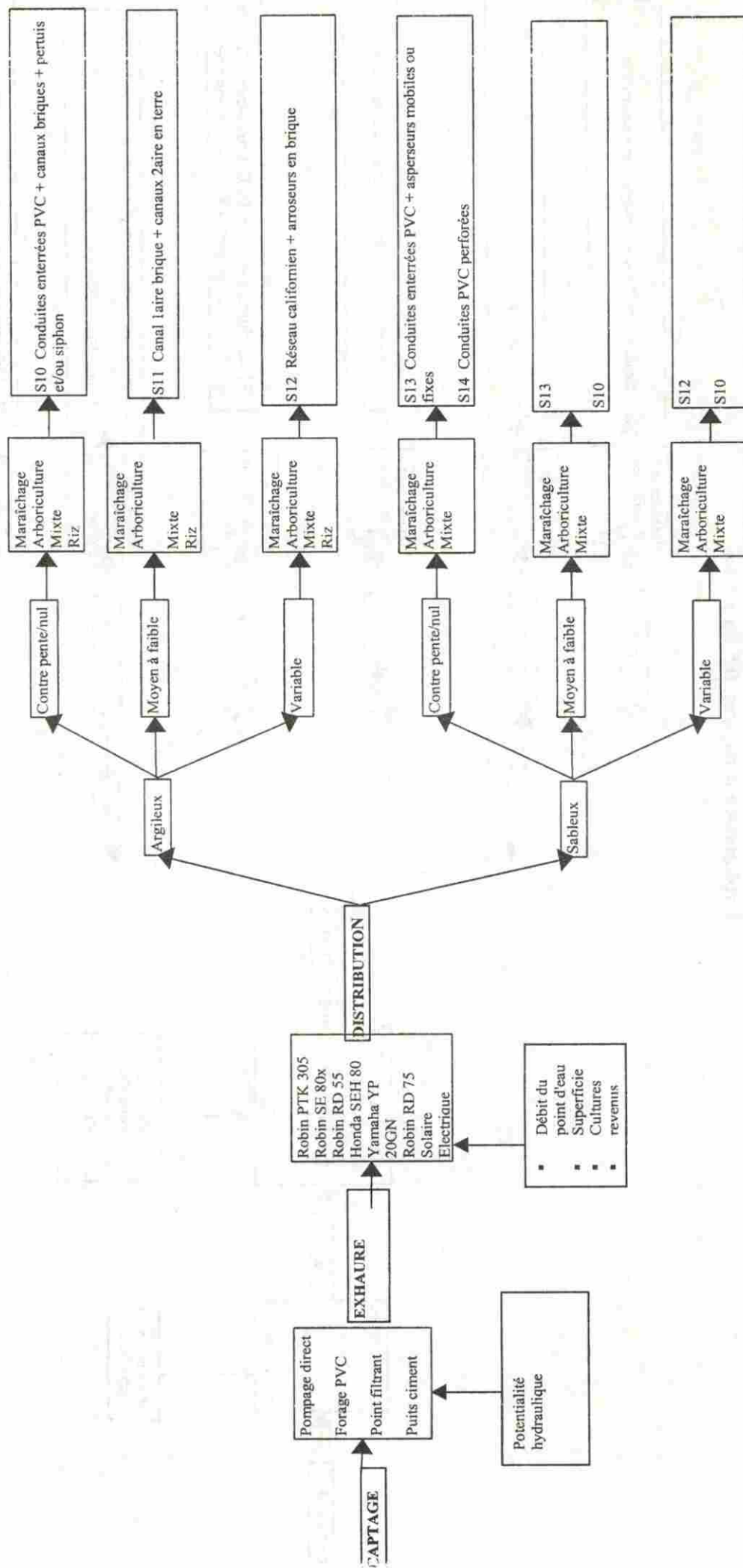
Cette proposition résultera d'une discussion avec les groupements paysans en vue d'identifier la solution la plus appropriée à partir d'un éventail de variantes faisables.

Le systèmes devront être performants, peu coûteux et reproductibles par les agriculteurs.

Exploitation d'environ 0.5 ha à 1 ha



Exploitation d'environ 1.5 ha à 3 ha



II.2) Mécanismes d'appui aux irrigants :

1. Constitution des demandes

- i) sensibilisation des GIE, caisses populaires et irrigants privés sur les possibilités d'appuis en conseils agricoles et élaboration de dossiers offertes aux irrigants privés (DCP, CIM)
- ii) remplissage par les irrigants du formulaire de demande d'intervention
- iii) pièces jointes à la demande :
 - attestation de droit de propriété
 - attestation de convention de droit d'usage
- iv) une fois au niveau de l'ANPIP, et après élimination des demandes d'intervention ne répondant pas aux critères de sélection du projet, les formulaires seront classés en deux catégories de dossiers d'intervention :

■ *dossiers d'appuis-conseils :*

relatifs à un appui technique, et pour lesquels aucune demande ultérieure de crédit ne sera faite

■ *dossiers d'investissement :*

concernent les demandes sollicitant une assistance pour le montage d'un dossier visant l'obtention d'un crédit.

2. Traitement de la demande

2.1. Traitement des dossiers d'appuis-conseils

Il s'agit de toutes les requêtes émanant directement d'un irrigant et ne donnant pas lieu à la préparation d'un dossier d'investissement.

- a) canaux de formulation de la demande

Canaux de formulation de la demande	bénéficiaires
ANPIP (à la suite de visites de terrain, dépouillement des demandes)	- irrigants répondant aux objectifs du projet ayant formulé la demande à la suite des visites de terrain
Composantes (sites d'expérimentation)	Sites d'expérimentation
Caisses de crédit	- Parcelles connaissant des difficultés de remboursement suite à une mauvaise performance d'exploitation

b) modalités de mise en œuvre

Une fois les dossiers d'intervention constitués (voir étape 1), ceux relatifs aux appuis conseils seront regroupés par zone et par type (thème) d'assistance sollicitée. Cette classification a pour objectif d'établir des tendances générales de besoins par zone et sur cette base d'élaborer un programme de visite des exploitations afin de rencontrer les exploitants et répondre à leurs préoccupations.

2.2. Appuis techniques liés aux dossiers d'investissement

justification

- rentabilisation des investissements
- obligation de remboursement des prêts octroyés
- "rassurer" les partenaires financiers

Il s'agit de toutes les requêtes émanant directement d'un irrigant et relatives à l'élaboration d'un dossier destiné à être autofinancé ou adressé à un organisme de crédit pour financement.

L'appui technique sera situé à trois niveaux :

i. au moment de l'identification du projet

l'objectif est de permettre une meilleure sélection des dossiers à retenir et une meilleure préparation de ceux-ci par un entretien plus précis avec l'exploitant et une récolte d'information plus complète. Au cours de l'entretien avec l'exploitant deux points devront être abordés :

- (i) les risques pris par l'exploitant (crédit) et la nécessité de rentabilité de l'investissement et, (ii) les besoins en appuis techniques qui seront nécessaires pendant l'exécution de son projet. Un compte rendu de la visite sera rédigé. Celui-ci devrait comprendre outre les informations habituelles, une première estimation des coûts bénéfiques, une évaluation des capacités de remboursement de l'exploitation et une évaluation précise des besoins en assistance technique et en formation qui seront nécessaires.

(i) De l'élaboration des dossiers d'investissement

- leur élaboration devrait être fonction du niveau de l'investissement et de l'institution de crédit ciblée. L'objectif de ces dossiers n'est pas de faire description de l'entièreté de la zone du projet, du milieu humain, de la pédologie générale, mais plutôt de démontrer qu'une fois l'investissement réalisé, les revenus qui en seront directement issus permettront d'accroître le niveau de vie de l'exploitant tout en assurant le remboursement de l'investissement. Ainsi, les aspects généraux pourront être simplifiés et la description devait porter essentiellement sur :
 - la faisabilité technique de l'investissement
 - la faisabilité agronomique (foncier, sols et itinéraires techniques principalement)
 - la faisabilité humaine (niveau de compétence, niveau d'organisation)

- la faisabilité financière (commercialisation, compte d'exploitation, taux de rentabilité interne TRI...)

(ii) *En phase d'exploitation*

Concernes l'appui qui serait souhaité au moment de l'exploitation de l'investissement. Cet appui serait basé sur l'évaluation et l'estimation des besoins en appui technique et en formation, réalisée au moment de l'entretien avec l'exploitant. Sur la base de cette évaluation, un programme précis sera élaboré et inclus au dossier d'investissement. Ce programme comprendra les besoins nécessaires en formation et/ou suivi technique, le programme de formation et le calendrier d'exécution.

3. Éléments constitutifs d'un dossier en fonction de l'institution de crédit ciblée

Éléments Constitutifs du dossier	Source de financement	AFELEN	AEN (pré-projet)	ANPIP Rapport mission
1. Identification du ou des promoteurs		X	X	X
2. Localisation du projet		X	X	X
3. Étude de marché		X	X	X
4. Objet du financement			X	X
5. Détail des investissements		X		X
6. Schéma de financement		X	X	X
7. Tableau de remboursement du crédit		X	X	X
8. Tableau d'amortissement des immobilisations		X	X	X
9. Compte d'exploitation prévisionnel		X		X
10. Compte de trésorerie		X		
11. Factures proformas du matériel, outillage...		X		
12. Références bancaires		X	X	
13. Garanties réelles ou financières proposées (45% du prêt)		X	X	X
* cautions solidaires (3 personnes)			X	
14. États financiers des deux dernières années (si extension du projet)		X		X
15. Besoins en appui technique - formation				X

II.3) TDR pour la constitution d'un dossier d'investissement (modèle ANPIP) :

Le dossier comprendra :

■ Une page de garde, avec la mention

- projet de réalisation d'une exploitation rizicole, ou maraîchère.....
- présenté par Mr
- date

■ Résumé du projet en 1 page :

- Type d'activité
- Nom du promoteur
- Localisation
- Superficie

- Coût total du projet
- Apport personnel
- Crédit demandé

II.3.1) Introduction

- 1) Situation géographique
- 2) Atouts
- 3) Contraintes
- 4) Statut foncier

II.3.2) Études techniques

2.0. Taille indicative des exploitations

- moins de 0,5 ha pour les exploitants faisant appel aux technologies artisanales
- de 3 à 6 ha (exceptionnellement plus) pour les irrigations nécessitant des technologies mécanisées.

2.1. Ressources en eau et besoins en eau des cultures

- nature de la ressource en eau, disponibilité et qualité
- estimation des besoins en eau mensuels ou décennaires des cultures envisagées
- impact éventuel des prélèvements sur les ressources en eau disponibles.

2.2. Topographie

- planimétrie : cheminement fermé du périmètre ; polygonale de ceinture, levé au 1/2.000 (à 10 points à l'hectare) et plan coté pour les exploitations supérieures à 3 ha ;
- altimétrie : le nivellement sera à rattacher à un référentiel local dont l'origine aura la cote 100,00

2.3. Pédologie

- sondage à 0,5 m de profondeur pour le maraîchage et la riziculture, et à 1,5 m pour l'arboriculture
- taux d'argile dans les horizons superficiels (texture)
- présence de gley (horizons asphyxiants)
- % de matière organique et azote total
- phosphore
- PH : pas toujours nécessaire car, il n'y a pas beaucoup de sols acides au Niger

2.4. Études d'aménagement

- découpage du périmètre (aménagement parcellaire)
- choix de la technique de mobilisation de l'eau et dimensionnement du système
- calcul des équipements d'exhaure
- dimensionnement des canaux ou des conduites de distribution, drains et diguettes

- détermination du type de clôture éventuellement nécessaire
- établissement des devis quantitatifs et estimatifs des investissements
- détermination des charges de gestion et d'entretien des investissements
- appuis techniques nécessaires pour la gestion hydraulique et la maintenance
- mémoire explicatif (3 à 4 pages) en allant à l'essentiel: présenter les résultats sous forme de tableau.
- impact environnemental

2.5. Gestion de l'eau:

main d'eau
quartier hydraulique
tour d'eau

II.3.3) Études agro-économiques :

3.1 Plan de développement agricole

- Situation actuelle des terres: statut foncier et productions
- Spéculations envisagées (assolement et rotation), itinéraires techniques, résultats agronomiques attendus
- Tableaux comparatifs des résultats (rendements et productions) avec et sans projet
- Investissements agricoles (équipements de préparation du sol, de transformation et de conservation ...)
- Besoins en intrants (carburants / lubrifiants, fumure minérale, pesticides...)
- Approvisionnement en intrants
- Situation de la main-d'œuvre familiale et besoins complémentaires éventuels (emploi et ressource de main d'œuvre pour l'irrigation)
- Montée en puissance de l'exploitation
- Appuis techniques disponibles (vulgarisation et conseil)
- Commercialisation et autoconsommation.

3.2 Rentabilité financière de l'exploitation

a) Etude de marché

La commercialisation des produits pourra être assurée :

- Soit dans les grands centres urbains de Tillabéri et Niamey
- Soit à travers les différents marchés ruraux.

D'une manière générale, la commercialisation des produits agricole ne se pose guère des problèmes dans cette région généralement déficitaire.

b) Évaluation du coût des investissement

Dans ce paragraphe, conformément à la conception, nous répertorions tous les matériels et matériaux investis lors de la mise en place du projet. Après des enquêtes menées sur les

marchés et les informations reçues dans certains documents, une évaluation du coût des investissements est faite.

Ces investissements sont composés de :

- . Moyens d'exhaure (motopompes, tuyaux et accessoires)
- . Génie civil et terrassement
- . Moyens de transport
- . Unité de culture attelée (UCA)
- . Appareil de traitement et

c) Tableau des charges

Les charges sont évaluées par campagne et puis par an (pour ce qui font deux campagnes)

1°) Charges variables (CV)

Pour assurer une bonne production, le producteur utilisera des semences sélectionnées, des engrais minéraux nécessaires. Il apportera de la fumure organique afin de maintenir ou d'améliorer la fertilité du sol.

Ces charges sont fonction de la superficie à exploiter, les rendements à obtenir et le temps d'irrigation par campagne. Elles sont composées des rubriques suivantes :

- Engrais 15-15-15 à raison de 150 kg /ha et 50 kg/ha pour la pépinière et au prix de 200fcfa le Kg,
- Urée 200 kg/ha et prix de 200fcfa le Kg,
- Semences 30 kg/ha et à 275fcfa le Kg,
- Sacherie 75 kg du riz paddy/sac à 500fcfa le sac,
- Fongicides 1 sachet/10 kg de semence à 90fcfa le sachet,
- produits phytosanitaires 2l/ha à 6500fcfa le litre,
- Carburant 0.6l/h pour les motopompes de 3.5 Cv à 400fcfa le litre,
- 1.08l/s pour celles de 5.2 Cv
- Lubrifiant 1 vidange toutes les 50 heures à 600fcfa la vidange.

2°) Charges fixes(CF)

Les charges sont composées de la main d'oeuvre permanente qui est fonction de la superficie à exploiter, des pièces de rechange des groupes motopompes.

La main d'oeuvre est payée à 1000fcfa le hj.

Totaux des charges = CV + CF = Charges d'exploitation

2-1°) Main d'oeuvre permanente

- . Labour 2 hj/ha
- . Confection des diguettes 5hj/ha
- . Planage 3hj/ha
- . Repiquage 15hj/ha
- . Sarclage 10hj/ha
- . Récolte 5hj/ha
- . Battage, mise à sac et transport 8,5 hj/ha

2-2°) Pièce de rechange

Les pièces de rechange et les réparations représentent les 20% du coût de la motopompe.

2-3) Les amortissements

L'amortissement est la constatation comptable de la perte subie par les valeurs d'actif qui se déprécie avec le temps. La durée du projet est prise égale à 5 ans et c'est sur cette base que les amortissements sont calculés. Étant donné que le projet n'est pas imposé, l'amortissement n'est pas pris en compte.

Amortissement = Prix d'achat hors taxes / Durée de vie comptable

d°) Recettes d'exploitation

Elles est constituées par :

- La production du riz ; cette production est calculée sur la base des rendements moyens de la zone : 4,5t/ha la 1^{ère} et la 2^{ème} année et 5t/ha la 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} année. Le riz paddy est vendu au prix de 115 fcfa le Kg.
- La paille est vendue à 7500 fcfa la parcelle de 0,25ha
- Les travaux aux tiers sont estimés à 50.000 fcfa par campagne. Ils comprennent les labours, les transports des personnes et des biens.

e) Tableau de remboursement d'emprunts

Les structures de crédits comme l'Agence pour le Financement de la Libre Entreprise au Niger (AFLEN) et les Mouvements des Caisses Populaires d'Épargne et de Crédits (MCPEC) donnent en général des crédits aux taux de 12% pour une durée d'amortissement de 3 ans.

Au coût total du projet la contribution du producteur doit représenter au moins 10% et le crédit demandé s'élève au maximum à 90%.

Années	Montant début période	Intérêt	Total remboursement	Annuité	Montant fin période
1					
2					
3					

Montant début période = Montant du crédit demandé par le producteur

Intérêt = représente les douze pour cent du montant début période

Total remboursement = montant début période / durée d'amortissement

Annuité = Intérêts + remboursement

Montant fin période = Montant dû en début période - remboursement

Le montant début période est égal au montant fin période de l'année précédente

f) Compte d'exploitation prévisionnel

1) Marge brute

Le calcul de la marge brute nous permet d'apprécier les résultats obtenus sur l'activité dans l'unité de production.

La marge brute (MB) = Produit brut (PB) - Charges variables (CV)

Le produit brut est la somme de toutes les recettes calculées en d).

2°) Le Résultat brut d'exploitation (RBE)

RBE = Recettes production - Dépenses d'exploitation - intérêts à payer.

3) Revenu monétaire

Le revenu monétaire représente le produit net restant au producteur lorsque toutes les charges ont été déduites.

Revenu monétaire = RBE - remboursement d'emprunt.

4) Capacité d'autofinancement

La capacité d'autofinancement nous permet de déterminer l'aptitude du producteur à se financer sur fonds d'origine interne.

- Étant donné que les producteurs utilisent une partie de la récolte pour leur consommation qui est estimée à un sac de riz paddy par mois (103.500fcfa/an) pour les familles disposant un terrain de moins de deux ha et deux sacs pour celles qui ont de plus de 2 ha (207.000cfa/an). L'autofinancement est obtenu après déduction du revenu monétaire l'autoconsommation.

Autofinancement = revenu monétaire après autoconsommation.

II 4) Système d'irrigation par réseau Californien

1. Principe

La distribution par réseau californien a pour principe d'acheminer l'eau par canalisations PVC enterrées jusqu'à des bornes de distributions ou cheminées verticales situées sur de points topographiques élevés afin d'alimenter des canaux gravitaires ou pratiquer directement l'irrigation à la plante.

2. Procédures de dimensionnement

2.1 Visite de terrain et étude Topographique

Une étude topographique sommaire, à partir d'une visite de terrain, permet de relever les différents points caractéristiques de la parcelle :

- Points haut (estimation de la dénivelée)
- Rupture de pente
- Source en eau
- Aménagements existants
- Nature des sols
- Cultures pratiquées

Un cheminement simple permet de reproduire, sur un plan à l'échelle, une polygonale, les différents points caractéristiques de la parcelle et le tracé de l'aménagement.

211. Le plan

Il permet :

- la visualisation de la parcelle et de l'aménagement
- la détermination du mètre

212. L'échelle

Les échelles les plus couramment utilisées sont : $1/500^{\text{ème}}$ (1cm sur le plan représente 500 cm sur le terrain) et $1/100^{\text{ème}}$

Le plan doit être orienté et doit indiquer le nord.

213. La légende

Elle permet la lecture de la carte.

Chaque symbole représente un point caractéristique ou matérialise le contour de la parcelle.



Bâtiment



Clôture



Porte



Arbre



Rocher



Rupture de pente



Sol (TN)



Exhaure (motopompe)



Captage sur puits,
forage



Micro-relief



Captage sur le fleuve



Bassin, réservoir

ϕ 50

canalisation



Borne

crue max
↓

Niveau de crue et étiage

Sur le plan il ne faut pas oublier d'indiquer :

- le diamètre des canalisations

- le report des longueurs de canalisation
- l'estimation de la dénivelée

22. Dimensionnement du réseau

L'objectif est de déterminer le diamètre de la canalisation de distribution pour faire transiter le débit nécessaire aux bornes d'arrosage.

221. Composantes intervenantes dans le calcul de dimensionnement de réseau

- **Le débit d'équipement (Q_e)** ou débit en tête de réseau correspond au débit transité par la canalisation. Il est déterminé en multipliant le débit d'équipement spécifique ou débit maximum de pointe ($D_{mp} = 4\text{l/s/ha}$ pour le riz, et 3l/s/ha pour le maraichage) par la superficie irriguée par campagne.
- **La hauteur géométrique (H_g)** est la différence d'altitude entre le point de refoulement le plus défavorisé et le point de pompage ou **la hauteur d'aspiration (H_a) + la hauteur de refoulement (H_r)**. Cette hauteur est déterminée à partir du levé topographique.
- **La longueur maximale (L)** de canalisation, c'est à dire la distance entre le point d'alimentation du réseau et le point de refoulement le plus éloigné.
- **Les pertes de charges (J_f)** constituées par tous les frottements de l'eau dans les canalisations

222. Etapes du dimensionnement : détermination du diamètre de la canalisation

Etape n°1 : le plan topographique

- Déterminer sur le plan les points haut de la parcelle à partir desquels seront implantés les bornes de distribution destinées à l'alimentation des canaux.
- Effectuer le tracer des canalisations reliant les bornes de distribution.
- Déterminer la hauteur géométrique (H_g).
- Déterminer la longueur totale de la canalisation. (L)

Etape n°2 : les pertes de charges

Il existe différentes formules et abaques permettant le calcul des pertes de charges.

▪ Tables de pertes de charges dans les conduites d'eau pleine.

C'est à partir de la formule de Colebrook, complétée par celle de Darcy, que les valeurs contenues dans les tables ci après ont été calculées (cf. : Pont à Mousson SA).

Diamètre intérieur 50 mm section 0.00196 m^2		
vitesse moyenne	Pertes de charge avec $k=0,1$	débit
m/s	m/m	l/s
0.75	0.01621	1.473
0.80	0.1829	1.571
0.85	0.02049	1.669
0.90	0.02281	1.767

- **La vitesse moyenne (v)** du fluide est compris entre 0.75 et 1.15 m/s. Le choix d'une vitesse trop faible nous conduit à choisir un diamètre élevé, non économique. Une vitesse trop élevée nous conduit à l'aménagement d'ouvrages de dissipation d'énergie important (coûteux) pour éviter la détérioration des canaux
- **Le coefficient de rugosité (k)** choisi est de 0.1 mm; ce qui nous permet d'avoir une marge de sécurité en prenant le coefficient le plus élevé. Ce coefficient lui-même comporte une marge de sécurité de 20%. (cf. : Pont à Mousson)
- **La perte de charge linéaire (J)** correspondant au coefficient k nous donne la perte de charge en mètre par mètre de canalisation.
- **Le débit (Qe)** correspond au débit d'équipement souhaité.

La procédure de calcul est simple :

- 1). Chercher dans les tables le débit d'équipement compris entre la vitesse moyenne de 0.75 et 1.15 m/s
- 2). Se reporter à la colonne pertes de charge correspondant au coefficient $k = 0.1$ mm
- 3). Noter la perte de charge exprimée en mètres par mètre et la multiplier par la longueur totale de canalisation. On obtient ainsi **la perte de charge linéaire totale (Jt)** de la canalisation pour un diamètre choisi

Avec J : perte de charge linéaire

n : coefficient de rugosité

v : vitesse moyenne du fluide dans la section

considérée en m/s

d : diamètre de la conduite en mètres

Cette méthode de calcul par abaque reste la méthode la plus couramment utilisée.

• **Calcul du diamètre de refoulement et d'aspiration:**

Connaissant le débit en tête du réseau, le diamètre du refoulement est calculé en utilisant la formule de BRESS.

$$D = 1,5 * \sqrt[3]{Q} \text{ avec } Q \text{ en m}^3/\text{s} \text{ et } D \text{ en m.}$$

Celui de l'aspiration est de type annelé, il a le même diamètre que celui du groupe motopompe.

▪ **Diamètre standard établi par la composante CIM**

Cette norme a pour objectif d'obtenir un diamètre de canalisation économique conforme aux exigences techniques de l'aménagement. Ce standard a été établi suite à l'expérience de la composante dans le dimensionnement de réseaux Californiens en PVC assainissement et sur la base des tables de pertes de charge publiées par les services techniques de Pont à Mousson SA.

Ø commercial ext. (en mm)	Ø commercial int. (en mm)	Ø abaque (en mm)	Débit (en litres/sec)	Pertes de charge (en mètres pour 100 m)
25	23.8	24	0.36 à 0.52	4.7 à 9.2 (m 6.9)
32	30.2	30	0.53 à 0.81	3.5 à 6.9 (m 5.2)
40	38.2	40	0.88 à 1.2	2.1 à 4 (m 3)
50	48.2	50	1.3 à 2.2	1.6 à 3.6 (m 2.6)
63	61.2	63.2	2.3 à 3.5	1.2 à 2.4 (m 1.8)
75	73.2	75.8	3.6 à 4.5	1.08 à 1.8 (m 1.4)
90	78.2	80	4 à 5	1.01 à 1.5 (m 1.2)
100	98.2	100	6.2 à 7.8	0.7 à 1.1 (m 0.9)

m : moyenne indicatives de pertes de charge en mètres pour 100 mètres

Cette norme établit pour chaque diamètre une plage de débit conseillée et une plage de pertes de charge

223. Calcul de la hauteur manométrique du réseau (Hmt):

Composantes intervenant dans le calcul :

- **Ha : La hauteur d'aspiration** est la différence d'altitude entre l'axe de la motopompe et la côte du niveau de l'eau. Lors de la visite de terrain ne pas oublier que la hauteur d'aspiration peut varier d'une saison à l'autre selon le type de captage
- Marnage du fleuve : indiquer le niveau de crue et d'étiage et évaluer le marnage (de 1 à 6 mètres)
- Baisse du niveau d'un puits ou de forage (rarement plus d'un mètre)
- **Hr : La hauteur de refoulement** est la différence d'altitude entre l'axe de la motopompe et la côte de refoulement la plus défavorisée.
- **Jt : Les pertes de charges linéaires totales** sont constituées par tous les frottements de l'eau dans les canalisations
- **Js : Les pertes de charge singulières** Les pertes de charge singulières sont constituées par tous les obstacles placés sur une conduite (coude, réducteur, té, clapet, vanne).

La base de calcul des pertes de charge singulières est la formule :

$$h = k \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

avec h : pertes de charge singulières en mètres
k : coefficient dépendant du point singulier
g : accélération de la pesanteur en m/s
v : vitesse moyenne du liquide

Dans la pratique on estime les pertes de charge singulières à 10% des pertes de charges linéaires totales.

La hauteur manométrique totale est donc égale à :

$$Hmt = Ha + Hr + Jt + 1,1Jt$$

23. Dimensionnement des groupes motopompes

Une fois la Hmt calculée, à l'aide du couple ($Q(m^3/h)$, Hmt (m)) on se réfère à l'annexe 6 pour choisir le groupe motopompe.

Maraîchage

Sous groupes	Modèles		Proposition				Nombre
	Surface ha	Q requis m^3/h	Type	Carburant	Puissance max (cv)	Q moy m^3/h	
I	0.5	6	Robin CB 12-33		1,4	6	3600
	0.7 0 1	11	Robin CB 18-25	Essence/pétrole	1,4	9	3600
	15	16	Robin CB 36-32 Robin PTK 205	Pétrole	2,7 2,2	18 15	3600
II	2 ha	22 m^3/h	Robin jard 35 E	Essence	3,5 cv	21	3600
			Honda UB 20T	Pétrole	3,6 cv	24	
			Honda SE 50	Essence	3,5		
III	2,5 à 3 ha	27 à 32	Robin RD 55	Gas oil	4,6 cv	33	
			Robin PTK305	Essence	5	32	
			Robin SE80x ou PGA350	Essence	4,6	32	
			Honda YP30 GN	Essence	5,2	32	
			Honda SEH80	Essence	5	32	

Riz

Sous-groupes	Modèles		Proposition motopompe				
	Surface ha	Q requis m^3/ha	type	carburant	P max (cv)	Q moy m^3/h	N tr/
I	0,4 ha	6	Robin CB 12-32		1,4	6	3600
	0,6 ha	9	Robin CB 18-25	Essenc/pétrol	1,4	9	3600
	1 ha	14	Robin PTK 205	Pétrole	2,2	15	3600
	1,25 ha	18	Robin CB 36-32	Essenc/pétrol	2,7	18	3600
II	1,5 ha	22	Robin Jard 35 ^E	Essence	3,5	21	3600
			Honda WB 20T	Pétrole	3,5	24	
			Honda SE 50	essence	3,5	-	

III	2 ha	29	Robin RD55 Robin PTK 305 Robin SE80x ou PGA 350 Yamaha YP30GN Honda SEH80	Gas-oil Essence Essence Essence Essence	5	32	3600
-----	------	----	--	---	---	----	------

3. Caractéristiques pratiques

3.1. Le réseau enterré

L'étude hydraulique a permis de déterminer le diamètre des canalisations en fonction du débit d'équipement, de la hauteur géométrique et des pertes de charge.

Les contraintes de pression étant peu élevées, inférieures à 25 mce dans le cas d'une installation alimentée par un petit groupe motopompe de 3 à 5 CV, le réseau est réalisé en PVC assainissement.

Les longueurs de 6 mètres ainsi que toutes les pièces de raccordement tés, coudes, réducteurs, bouchons, sont assemblées par collage et enterrées à une profondeur de 0.50m pour éviter leur détérioration par des agents extérieurs notamment par les UV.

Les diamètres indiqués sur les tuyaux PVC assainissement que l'on trouve sur le marché, sont les diamètres extérieurs : épaisseur environ + ou moins 1.8mm

3.2. Les bornes

Les bornes hors sol sont constituées d'une allonge de 0.20m et d'un coude PVC permettant d'alimenter la canalisation en eau.

La borne d'alimentation du réseau se situe à proximité du lieu de pompage (forage, cours d'eau, puits, mare) en début ou milieu du réseau. Le raccordement avec le groupe de pompage se fait par l'intermédiaire du tuyau souple de refoulement. L'étanchéité entre la borne et le tuyau souple est assurée par du caoutchouc (vielle chambre à air).

Les bornes d'alimentations peuvent être montées en série ou en parallèle selon les exigences du terrain et les besoins en eau des cultures. Le nombre total de bornes sur le réseau ainsi que le nombre de bornes pouvant être utilisé en même temps est très variable et fonction du débit de la motopompe, du diamètre de la borne et du tour d'eau envisagé.

L'ensemble des bornes est composé d'une allonge de 0.20m, d'un coude, et d'un bouchon de fermeture à vis en PVC qui assure l'étanchéité en cas de non - utilisation.

Les différentes bornes d'alimentation et de distribution sont enveloppées d'un sac de jute afin de les protéger contre les UV.

Une dalette de béton assure la rigidité et la stabilité de la base de la borne et évite tout affouillement ou détérioration.

3.3. Les bassins de dissipation

Le bassin de dissipation permet de dissiper l'énergie résiduelle lors de la sortie de l'eau de la borne de distribution, afin d'éviter les affouillements et la détérioration des canaux.

Il existe différents types de bassins :

- Bassin en béton ou en brique : il est souvent onéreux (de 10 à 15 000CFA/unité) et à usage unique
- Bassin métallique : il est constitué d'un demi-tonneau (environ 5 000CFA) qui peut être déplaçable.
- Vasque de pierre : une vasque creusée au niveau de la chute d'eau remplie de cailloux, lié ou non par du béton fait un très bon bassin de dissipation (+ ou - 1 000CFA).
- Vasque de débris végétaux : une vasque creusée au niveau de la chute d'eau remplie de débris végétaux peut faire un très bon bassin de dissipation (0 CFA).

214. Coût de l'installation

Le coût à l'hectare est estimé 220 800 CFA/ha : coût calculé sur la base d'un échantillon de 23 exploitants.

Pour un débit de 3 litres/secondes, une longueur de 100 m de canalisations et 5 bornes de distribution :

- Diamètre 63
- Coût tuyaux : 17 U soit 59 500 CFA
- Coût accessoires : 25 000 CFA
- Coût main d'œuvre : 12 500 CFA

Total : 97 000 CFA soit un coût moyen au mètre linéaire de 970 CFA

- Coût des canalisations PVC assainissement

Diamètre (mm)	Unité (ml)	Coût (CFA)
32	6	1 750
40	6	2 200
50	6	2 750
63	6	3 500
75	6	4 350
90	6	5 120
100	6	5 500
110	6	8 700

Prix indicatifs marché de Katako 1999

- Coût des accessoires PVC assainissement (té, coude, bouchon, réducteur, colle)

	Té	Coude	Bouchon
Diamètre (mm)	Coût (CFA)	Coût (CFA)	Coût (CFA)
32	450	450	450
40	650	650	650
50	750	750	750
63	1 400	900	1 300
75	1 500	1 250	1 400

Réducteur	
Diamètre (mm)	Coût (CFA)
63*50	1 600
75*50	1 800
75*63	1 850
90*63	2 500
90*75	2 650

90	2 300	2 200	2 200
100	2 500	1 850	2 000
110	3 000	3 000	2 350

Prix indicatifs marché de Katakò 1999

100*63	2 500
100*75	2 750
110*75	3 000
110*90	3 000

réducteurs les plus courant

* Attention certains fournisseurs revendent des tuyaux et accessoires de mauvaise qualité sous le label PVC évacuation, alors que ce sont des matériaux à base de polyéthylène, qui ne peuvent être collés : leur couleur est noire (zone de Maradi et Zinder)

* Les canalisations et accessoires sont collés : pot de colle de 1kg 8 000 CFA

Il faut environ 1 pot de colle pour 100 ml de canalisations

* Les bouchons peuvent être remplacés par des bouchons artisanaux fabriqués à partir d'une chute de tuyau (200 CFA / unité).

- Coût de la main d'œuvre

* la pose de canalisations et accessoires : de 100 à 150 CFA le mètre linéaire.

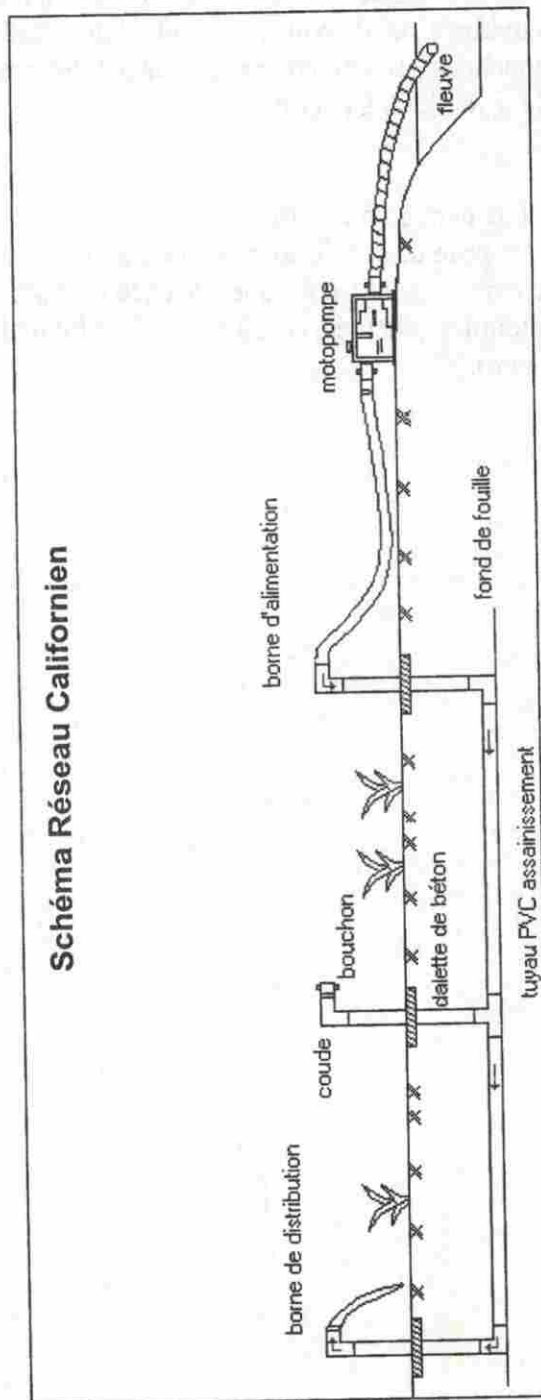
* le terrassement : pour une tranchée de 50*100*50 en sol léger, forfait de 1 000 à 1 500 CFA la journée (8heures) ou 20 à 25 CFA / ml (calcul sur la base de deux manœuvres exécutant 15ml/heure).

Tableaux de pertes de charge

Vitesse Moyenn e	Diamètre 24 mm Section 0.000452 m ²		Diamètre 30 mm Section 0.000707 m ²		Diamètre 40 mm Section 0.00196 m ²		Diamètre 50 mm Section 0.00221 m ²		Diamètre 63.2 mm Section 0.00314 m ²		Diamètre 75.8 mm Section 0.00451 m ²		Diamètre 80 mm Section 0.00503 m ²		Diamètre 100 mm Section 0.00785 m ²	
	Perte de charge	Débit	Perte de charge	Débit	Perte de charge	Débit	Perte de charge	Débit	Perte de charge	Débit	Perte de charge	Débit	Perte de charge	Débit	Perte de charge	Débit
	m/m	l/s	m/m	l/s	m/m	l/s	m/m	l/s	m/m	l/s	m/m	l/s	m/m	l/s	m/m	l/s
0.75					0.02156	0.942	0.01621	1.473	0.01205	2.353	0.01081	3.610	0.01010	4.021	0.00754	6.283
0.80	0.04701	0.362	0.03520	0.565	0.02432	1.005	0.01829	1.571	0.01359	2.510	0.01211	3.836	0.01132	4.273	0.00845	6.676
0.85	0.05265	0.385	0.03943	0.601	0.02724	1.068	0.02049	1.669	0.01523	2.667	0.01348	4.061	0.01260	4.524	0.00941	7.069
0.90	0.05859	0.407	0.04388	0.636	0.03032	1.131	0.02281	1.767	0.01695	2.823	0.01493	4.287	0.01395	4.775	0.01042	7.461
0.95	0.06485	0.430	0.04857	0.672	0.03357	1.194	0.02526	1.865	0.01877	2.980	0.01645	4.513	0.01537	5.027	0.01148	7.854
1	0.07141	0.452	0.05349	0.707	0.03697	1.257	0.02782	1.963	0.02068	3.137	0.01803	4.738				
1.05	0.07828	0.475	0.05864	0.742	0.04053	1.319	0.03050	2.062	0.02267	3.294						
1.10	0.08546	0.498	0.06402	0.778			0.03330	2.160	0.02476	3.451						
1.15	0.09294	0.520	0.06964	0.813			0.03623	2.258								

D'après Pont à Mousson SA

Schéma Réseau Californien



Dimensionnement d'un réseau Californien

Visite de terrain et Topographie

- Points haut (estimation de la dénivelée)
- Rupture de pente
- Source en eau
- Aménagements existants
- Nature des sols (argileux, sableux)
- Cultures pratiquées
- Niveau d'étiage et de crue

Composantes du dimensionnement d'un réseau

- Débit d'équipement (Qe)
- Hauteur géométrique (Hg)
- Hauteur d'aspiration (Ha)
- Hauteur de refoulement (Hr)
- Longueur totale (L)
- Pertes de charge totale (Jt)
- Hauteur manométrique totale (Hmt)

Etape n°1 : le plan topographique

- Placer sur les points haut les bornes
- Effectuer le tracer des canalisations reliant Les bornes de distribution
- Déterminer la hauteur géométrique (Hg)
- Déterminer la longueur de canalisation (L)

Etape n°2 : détermination du diamètre

- Chercher dans la table le diamètre correspondant à Qe

Norme établie par la composante CIM

Ø ext. (mm)	Ø int. (mm)	Ø abaque (en mm)	Débit (l/sec)	Pertes de charge (m pour 100m)
25	23.8	24	0.36 à 0.52	4.7 à 9.2 (m 6.9)
32	30.2	30	0.53 à 0.81	3.5 à 6.9 (m 5.2)
40	38.2	40	0.88 à 1.2	2.1 à 4 (m 3)
50	48.2	50	1.3 à 2.2	1.6 à 3.6 (m 2.6)
63	61.2	63.2	2.3 à 3.5	1.2 à 2.4 (m 1.8)
75	73.2	75.8	3.6 à 4.5	1.08 à 1.8 (m 1.4)
90	78.2	80	4 à 5	1.01 à 1.5 (m 1.2)
100	98.2	100	6.2 à 7.8	0.7 à 1.1 (m 0.9)

m : moyenne des pertes de charge en mètres pour 100

mètres

Etape n°3 : pertes de charge totale

- Pour Qe lire la perte de charge dans la table
- Multiplier la perte de charge par L Pour obtenir Jt

Etape n°4 : Hmt du réseau

$$Hmt = ha + hr + jt + 10\%(Jt)$$

- Déterminer le choix de la Motopompe en fonction de la Hmt du réseau et de Qe

Table de pertes de charge (cf. Pont à Mousson)

Ø 50mm			Ø 63.2 mm		Ø 75.8mm		Ø 80mm		Ø 100mm	
Vites moy.	Perte charge	Débit	Perte charge	Débit	Perte charge	Débit	Perte charge	Débit	Perte charge	Débit
m/s	m/m	l/s	m/m	l/s	m/m	l/s	m/m	l/s	m/m	l/s
0.75	0.0162 1	1.473	0.0120 5	2.353						
0.80	0.0182 9	1.571	0.0135 9	2.510	0.0108 1	3.610	0.0101 0	4.021	0.0075 4	6.283
0.85	0.0204 9	1.669	0.0152 3	2.667	0.0121 1	3.836	0.0113 2	4.273	0.0084 5	6.676
0.90	0.0228 1	1.767	0.0169 5	2.823	0.0134 8	4.061	0.0126 0	4.524	0.0094 1	7.069
0.95	0.0252 6	1.865	0.0187 7	2.980	0.0149 3	4.287	0.0139 5	4.775	0.0104 2	7.461
1	0.0278 2	1.963	0.0206 8	3.137	0.0164 5	4.513	0.0153 7	5.027	0.0114 8	7.854
1.05	0.0305 0	2.062	0.0226 7	3.294	0.0180 3	4.738				
1.10	0.0333 0	2.160	0.0247 6	3.451						
1.15	0.0362 3	2.258								

Diamètre de canalisations les plus utilisés

Tuyau	Té	Coude	Bouch.
Ø (mm)	Coût (CFA)	Coût (CFA)	Coût (CFA)
32	1 750	450	450
40	2 200	650	650
50	2 750	750	750
63	3 500	1 400	1 300
75	4 350	1 500	1 400
90	5 120	2 300	2 200
100	5 500	2 500	2 000
110	8 700	3 000	2 350

Prix indicatifs marché de Katakoto 1999

Réducteur.	
Ø (mm)	Coût (CFA)
63*50	1 600
75*50	1 800
75*63	1 850
90*63	2 500
90*75	2 650
100*63	2 500
100*75	2 750
110*75	3 000
110*90	3 000

Main d'oeuvre

- pose tuyaux 100 à 150 CFA/ml
- terrassement 20 à 25 CFA/ml ou forfait de 1000 à 1500/journée

Divers

- ciment (50kg) 5000 CFA
- colle (1kg) 8000 CFA
- bouchon artisanal 200 CFA
- bassin métallique 5000 CFA
- bassin béton 10 à 15000 CFA
- sable/latérite 1000 à 2000 CFA/ charrette

II.5 Système gravitaire

Les canaux principaux en terre ont une pente longitudinale de 0,10‰. Les cunettes sont ouvertes après avoir rechargé les canaux existants ou mis en place un remblai de talus de 3/2 en matériaux argileux et compacté à la main ou au tonneau rempli du sable et tiré par des bœufs. Pour éviter la dégradation des canaux, un revêtement muni d'une bêche d'ancrage à l'extrémité en perré maçonné de 20 cm et dosé à 250 kg/m³ est réalisé sur les premiers mètres. Sur le terrain sablo-argileux, les canaux sont recouverts de film plastique.

Le canal revêtu a les dimensions minimales suivantes :

- Largeur au plafond = 30 cm
- Hauteur finie = 40 cm dont la revanche fait 10 cm
- Epaisseur de 20 cm
- La pente de talus est de 1/1

Le débit transité par ce canal est donné par la formule de Manning Strickler : $Q = KSR^{2/3}I^{1/2}$ avec :

- K = coefficient de Manning Strickler pris égal à 50 pour les canaux en perré maçonné.
- S est la surface mouillée égale à $h(b+mh)$
- P est le périmètre mouillé égal à $b+2h\sqrt{1+m^2}$
- R est le rayon hydraulique égal à S/P
- I est la pente longitudinale du canal prise égale à 0,1‰

Pour $h = 0,30$ m et $b = 0,30$ m on a $Q = 29,78 \text{ m}^3/\text{h}$.

Un bassin de dissipation rectangulaire en perré maçonné de 30 cm d'épaisseur et dosé à 300 kg/m³ sert à dissiper l'énergie pompée. Pour assurer l'étanchéité entre le canal et le bassin un joint bitumineux est mis en place. Pour un bassin de dimensions L, l, h et d'épaisseur e, le volume des matériaux est égal à :

$$[(L+2e) + 2l]xhxe = 2xhxe(L+l+2e).$$

II.6 Système sémi-californien

La desserte est assurée par les tuyaux en PVC enterrés entre 60 et 80 cm et posés sur un lit de sable de 10 cm. Les conduites alimentent des bassins de distribution en perré maçonné dosé à 250 kg/m^3 et d'épaisseur 30 cm. L'alimentation des canaux se fait directement ou par des tuyaux en PVC de diamètre D. Pour les canaux alimentés par les tuyaux, le système fonctionne comme un puits de fond dont le débit est donné par la formule :

$$Q = \mu \cdot S \sqrt{2gh} = \mu \cdot \pi D^2 \sqrt{2gh} / 4 \text{ avec } D \text{ en m et } h \text{ en m.}$$

μ Coefficient de contraction

S section de l'orifice

h charge au dessus de l'orifice qui est la différence entre le niveau d'eau amont et aval du tuyau.

$$h = 8Q^2 / (\mu \pi g D^4)$$

Pour un bassin de longueur L, de largeur l, d'épaisseur e et de hauteur h dosé à 250 kg/m^3 , la quantité du béton est estimée de la manière suivante :

$$\text{Volume total des matériaux} = [(L + 2e) + 2l] \times h \times e$$

$$V_T = 2hxe(L + l + 2e)$$

Comme la quantité du béton représente 30% du V_T , la quantité du ciment

$$q = 0.30 \times 250 \times V_T$$

- Pour le bassin de dimensions $2.50 \times 1.50 \times 1.00 \text{ m}$

$$q_1 = 2 \times 1 \times 0.20 \times (2.6 + 1.5) \times 250 \times 0.3 = 123 \text{ Kg}$$

- Pour le bassin de dimensions : $2 \times 1.5 \times 1.20 \text{ m}$

$$q_2 = 2 \times 1.2 \times 0.20 \times (2.6 + 1.5) \times 250 \times 0.30$$

$$= 147.60 \text{ Kg}$$

Étude de cas : Aménagement de 4 ha de riz appartenant à DJIBO Moussa Fala (canton de Sinder, Tillabéri)

II EQUIPEMENTS HYDRAULIQUES

1- Choix de la motopompe

a) Calcul de débit

Avec un débit d'équipement de 31l/s/ha et une superficie de 4 ha, le débit en tête de la parcelle est de 191/s soit 43.20 m³/h.

b) Calcul de la Hmt

Pour une longueur de 5 m à l'aspiration et 10.00m au refoulement les pertes de charges linéaires et singulières peuvent être négligées. La hauteur manométrique totale se résume à la hauteur géométrique totale de 7.00m. Pour un débit de 43.20 m³/h ; deux groupes de motopompes de marque HONDA modèle SEHX et de puissance 3.5Cv qui débitent 20 m³/h a une Hmt moyenne de 20m répondent.

2- Diamètre de tuyau de refoulement

En utilisant la Formule de Bress $D = 1,5 \times \sqrt{Q}$

$D = 1,5 \times \sqrt{20/3600} = 0,111$ m le diamètre commercial choisi est de 110 mm

3- Plate forme

Une plate forme de 80x80x50 cm en béton sera réalisée pour servir de support au groupe motopompe.

4 - Bassin de réception

Pour dissiper l'énergie, un bassin de 3.00x2.00x1.00 m sera réalisé en perré maçonné.

5) Canal en remblai

Un canal en remblai de 420.00m de longueur ; 3/2 de fruit de talus et de pente de 0.01% dominera le terrain naturel. Ce canal sera revêtu en perré maçonné sur les 10 premiers mètres de part et d'autre du bassin et sera muni d'une bêche d'ancrage de 10cm à ses extrémités. Un joint bitumineux sera mis en place entre le bassin de réception et le canal pour assurer l'étanchéité et éviter les fissures.

Le canal aura les dimensions suivantes.

Largeur au plafond de 0.30m

hauteur finie de 0.40m dont 10cm de revanche

Pour $k=60$ et $i=0.01\%$, en appliquant la formule de MANNING, ce canal transitera un débit de 31.39l/s ce qui est supérieur au débit en tête du réseau.

Type d'activité : Riziculture
Promoteur : DJIBO Moussa
Localisation : Fala/canton de SINDER/Tillabéri
Superficie : 4ha
Coût total du projet : 3.179.356fcfa
Apport personnel :
350.000 fcfa
- fournir le terrain
- réaliser des canaux secondaires et arroseurs
- clôturer la parcelle avec de la haie vive
- mettre à la disposition de l'unité agricole 2 UCA
Crédit demandé : 2829356 cfa

I INTRODUCTION

1 - Situation géographique

- Avec une pluviométrie de 400mm inégalement répartie, le village de fala est situé à 45 Km de Tillabéri .

2- Etude de marché

- *Région où la culture et la consommation du riz font partie des habitudes de la population
- * Existence d'un grand marché et des machines de décorticage du riz
- * La cohabitation avec les éleveurs facilitera la vente des sous produits.

3- Atouts

Le village de Sakoiria est situé non loin d'un chef lieu de département donc possédant un débouché très important.

Le terrain est très favorable à l'agriculture.

Le promoteur a une expérience dans le domaine de la riziculture.

La ressource en eau est permanente.

Le promoteur possède déjà deux unités de culture attelée

4- Contraintes

Terrain situé à la rive droite du fleuve ;la contrainte majeure est l'absence du crédit.

Statut foncier

Le terrain étant une propriété personnelle donc pas d'insécurité (voir pièces jointes).

III ANALYSE FINANCIERE

Les calculs se font sur la base d'un taux d'intérêt de 12% pour une durée de projet de 5 ans. Les emprunts seront remboursés sur une période de 3 ans.

1) Investissements

N°	Désignation	Unité	Qtité	Prix Unit.	Montant
1	<u>Motopompes et accessoires</u>				
1-1	Motopompes	U	2	200.000	400.000
1-2	Tuyau d'aspiration Ø50 annelé	U	2	4.240	8.480
1-3	Tuyau de refoulement Ø110	U	2	4.512	9.024
1.4	PVC	U	2	4.000	8.000
1.5	Divergent 50/110	U	1	1.500	1.500
2	Vanne				
2.1	<u>Génie civil et terrassement</u>	Sacs	10	6.500	65.000
2.2	Ciment	ml	420	1250	525.000
3	Remblai compacté				
3.1	<u>Moyen de transport</u>	U	2	120.000	240.000
4	Pirogues et accessoires				
4.1	<u>Appareil de traitement</u>	U	2	22.000	44.000
5	Pulvérisateur				127.900
	Imprévu 10%				
	Total				1.428.904

2) Tableau des Charges

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant
<u>Charges fixes</u>				
Labour	hj	8	1000	8.000
Confection diguettes	hj	20	1000	20.000
Planage	hj	12	1000	12.000
Repiquage	hj	60	1000	60.000
Sarclage	hj	40	1000	40.000
Récolte	hj	20	1000	20.000
battage , transport et mise à sac	hj	34	1000	34.000
Epandage d'engrais	hj	4	1000	4.000
Pièces de rechange 20%				80.000
Imprévis 10%				27.600
Total				303.600
<u>Charges variables</u>				
Engrais 15-15-15	kg	800		160000
Urée	kg	800	200	160000
Semence	kg	120	200	33000
Sacherie	sacs	240	275	120000
Fongicides	sachet	12	500	1080
Produits phytosanitaires	l	8	90	52000
Carburant	l	614	6500	245600
Lubrifiant	vidange	22	400	13200
Imprévis			600	78488
Total 2				863.368
Totaux charges				1.750.452

Les charges variables s'élèvent à 863.368fcfa / campagne soit 1.295.052cfa par an pour les 2 premières années. Pour les 3 dernières années, elles s'élèvent à 1.315.302cfa / an.

3) Tableau des amortissements

Matériel	Durée	Coût	Amortissement
Pompes, génie civil, pirogues	5	1.384.904	276.981
Appareil de traitement	3	44.000	14.667
Total			291.648

4) Tableau des amortissements d'emprunts

Le coût total du projet est de 3.179.356fcfa dont 2.829.356fcfa de crédit. Ce crédit sera remboursé à une période de 3 ans et au taux d'intérêt de 12%.

Année	Montant début période	Intérêt	remboursement	Annuité	Montant fin période
1	2829356	339523	943119	1282641	1886237
2	1886237	226348	943119	1169467	943118
3	943118	113174	943119	1056293	0

5) Production

Les recettes sont calculées sur la base de 115 fcfa le kg du riz paddy et au rendements de 4,5 t/ha les deux premières années et 5t/ha les 3 dernières années.

La paille est vendue au prix de 7500 fcfa le 0,25 ha.

La production se fait en 2 campagnes.

Le producteur exploite les 4ha à la première campagne et 2ha à la 2^{ème} campagne.

Années	Désignation	1 ^{ère} campagne	2 ^{ème} campagne	Total
1 ^{ère} et 2 ^{ème} années	Vente de riz	2.070.000	1.035.000	3.285.000
	Vente paille	120.000	60.000	
3 ^{ème} , 4 ^{ème} et 5 ^{ème} années	Vente de riz	2.300.000	1.150.000	3.630.000
	vente paille	120.000	60.000	

5) Compte de résultat prévisionnel

L'autoconsommation est calculée sur la base de deux (2) sacs de riz paddy par mois soit 207.000 fcfa par an.

Années	An1	An2	An3	An4	An5
Produits	3285000	3285000	3630000	3630000	3630000
Charges fixes	455400	455400	455400	455400	455400
Charges variab.	1295052	1295052	1315302	1315302	1315302
Totaux charges	1750452	1750452	1770702	1770702	1770702
Marge brute	1989948	1989948	2314698	2314698	2314698
Intérêts à payés	339523	226348	113174	0	0
Résultat brut d'exploitation	1195025	1308200	1746124	1859298	1859298
Remboursement d'emprunts	943119	943119	943119	0	0
Revenu monétaire	251906	365081	803005	1859298	1859298
Autoconsommation	207000	207000	207000	207000	207000
Rev. Monétaire après autocons.	44906	158081	596005	1652298	1652298