

CR002193

CERAAS / ENSA / UCAD



CERTIFICAT D'ETUDE SPECIALISEE

A LA SECHERESSE : CESS 2000

2^{ème} PROMOTION FORMATION DIPLOMANTE

RAPPORT DE FIN DE FORMATION

THEME : *PERSPECTIVE D'UTILISATION D'INDICATEURS DE STRESS HYDRIQUE POUR
LE PILOTAGE DE L'IRRIGATION : APPROCHE AGRO-PHYSIOLOGIQUE DE
L'AMELIORATION DES RENDEMENTS DES CULTURES DE DIVERSIFICATION
DE LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL.*

PRESENTE PAR : MAMADOU CAMARA,
ingénieur agronome
du génie rural.

ENCADREUR : Dr BENOIT SARR,
chercheur arr CERAAS.

CAMA

PHYS 4

01/02

SOMMAIRE

INTRODUCTION	p. 1
I ^{er} MATERIEL ET METHODE.....	p. 1
II ^{er} HYDROSYSTEME CULTURAL DE LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL.....	p. 2
2-1 ^{er} Aperçu sur la vallée du fleuve Sénégal	p. 2
2-2 ^{er} Diversification et systèmes d'irrigation	p. 3
III ^{er} IDENTIFICATION D'INDICATEURS AGRO-PHYSIOLOGIQUES DE STRESS HYDRIQUES POUR LE PILOTAGE DE L'IRRIGATION.....	p. 4
3-1 ^{er} Suivi de l'état hydrique du sol	p. 4
3-1-1 ^{er} Potentiel hydrique.....	p. 4
3-1-2 ^{er} Elaboration du bilan hydrique	p. 5
3-2 ^{er} Suivi de la température du couvert	p. 6
IV ^{er} APPLICATIONS DES INDICES DE STRESS.....	p. 8
4-1 ^{er} Cas de l'arachide dans la VFS	p. 8
4-2 ^{er} Cas du mil et de l'oignon	p. 11
V ^{er} VALORISATION DES INDICES POUR L'AMELIORATION RENDEMENTS DANS LA VFS.....	p. 12
CONCLUSION.....	p. 13
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	p. 15

INTRODUCTION :

En zone intertropicale, l'alimentation hydrique des cultures constitue une contrainte majeure de l'agriculture et entrave ainsi le développement économique. En effet, le contexte de sécheresse qui sévit depuis les années 70 a mis en évidence la sensibilité des *hydrosystèmes cultureux* aux aléas climatiques. La notion de *sécheresse* est définie comme une période plus ou moins étendue de diminution des pluies par rapport à un régime autour duquel l'environnement local et l'activité humaine se sont stabilisés.

Toutefois, selon l'ampleur du phénomène on peut distinguer la *sécheresse climatique*¹ et celle *agronomique*². Cette dernière renvoie à un *stress ou déficit hydrique* dans le continuum sol-plante-atmosphère (*cspa*) donc correspondant à une réduction de la teneur en eau du sol, du potentiel de turgescence de la plante et une forte demande évaporative. Pour répondre à ce phénomène de sécheresse, la plante met en œuvre des mécanismes cellulaires ou moléculaires qui la permettent de maintenir ses fonctions vitales en procédant soit de *l'esquiver* soit de la *tolérer* (par évitement ou par tolérance sensus stricto) ce qui ne manque d'affecter le rendement. En effet, les réponses des plantes au déficit hydrique se succèdent dans le temps et sont reliées entre elles de façon plus ou moins complexe. On peut distinguer d'une part, les *effets précoces* qui concernent les modifications de la balance hormonale (proline, auxine, cytokinine, ABA, jasmonate...) et la régulation osmotique (limitation des pertes d'eau par la réduction de la transpiration); d'autre part, les effets à plus long terme comme la réduction de la surface des feuilles au profit du développement racinaire. Ce dynamisme réactionnel qui induit la résistance est appelé l'adaptation à la sécheresse.

Compte tenu de ce phénomène et la prépondérance du facteur hydrique, des institutions de recherches telles que le CERAAS ont axé leurs orientations sur les problèmes de l'adaptation des espèces cultivées à la sécheresse et la valorisation agricole de l'eau.

Ainsi, la pratique de l'irrigation en zone sahélienne et la diversification constituent des voies encore peu exploitées pour l'amélioration de la production agricole.

Dans la région du fleuve Sénégal, d'importants aménagements hydro agricoles ont été réalisés et conférant à cette zone un potentiel de production alimentaire significatif. Néanmoins, le manque de maîtrise des apports en quantité et en fréquence conjugué à la variabilité des caractéristiques hydrodynamiques des sols compliquent la détermination précise des stocks hydriques du sol et les

¹ échelle pluri-annuelle

² échelle décadaire à annuelle

besoins en eau des cultures par les agriculteurs. D'ailleurs, même l'organisation de tours d'eau entre usagers d'une maille hydraulique n'empêche pas la persistance de pratique de l'irrigation en abondance qui n'est pas toujours le scénario hydrique adéquat à une bonne productivité.

Pour cela il se pose la nécessité, face à la diversification, de mettre à la disposition de ces usagers des outils et critères simples de détection précoce des périodes de stress leur permettant de mieux prendre des décisions efficaces concernant le déclenchement des irrigations en appoint ou de complément.

L'intérêt sera de parvenir à conduire l'arrosage en procédant à un rationnement basé sur la sensibilité à un déficit hydrique des phases phénologiques de la plante et de la simulation du bilan hydrique du sol.

Ainsi, notre étude se fixe les objectifs suivants:

- * d'une part, d'identifier des indicateurs de stress basés sur des mesures de l'état hydrique du sol et la température du couvert faites respectivement par les méthodes tensio-neutronique et la radio-thermométrie;
- * d'autre part, d'élaborer une procédure de conduire l'irrigation à partir des valeurs de stress acceptable et d'établir un bilan d'eau qui améliorent efficacement la réponse des rendements à l'eau dans la vallée du fleuve Sénégal (VFS).

I°/ MATERIEL ET METHODE :

Dans le contexte d'aménagements hydro agricoles, l'introduction de l'agriculture irriguée représente un moyen d'intensifier et de rentabiliser ces investissements coûteux. Ainsi, dans le cadre du PDRC ordonnant les activités de la SAED, l'irrigation doit permettre de sécuriser au maximum la production agricole soumise aux aléas climatiques.

Pour cela, notre réflexion s'intéresse sur les cultures de diversification de la vallée du fleuve Sénégal correspondant la zone d'intervention de la SAED, matérialisées sur la carte n°1) particulièrement les spéculations telles que l'arachide, le maïs, le sorgho, l'oignon, et la tomate.

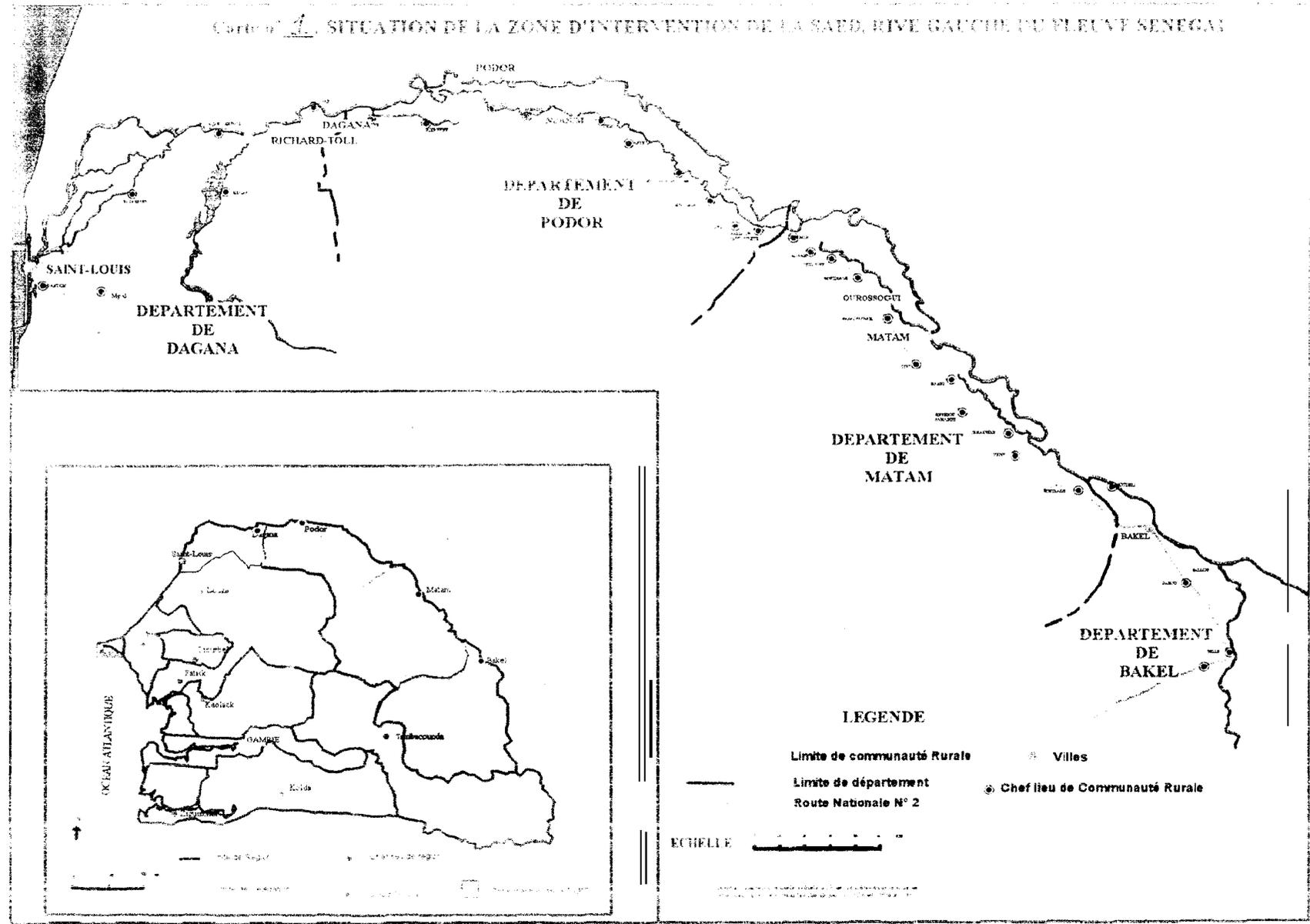
Toutefois, ce travail est une revue bibliographique basée essentiellement sur les connaissances et résultats de la recherche étudiant le comportement des cultures en condition de déficit hydrique modéré à sévère.

Ainsi, partant du suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert d'une culture considérée, nous essayerons de relier les paramètres agrophysiologiques pour montrer qu'un rationnement des apports en eau permet d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau et en conséquence d'améliorer la production agricole dans la vallée du fleuve Sénégal.

REPUBLIQUE DU SENEGAL
 MINISTERE DE L'AGRICULTURE
 SOCIÉTÉ NATIONALE D'AMÉNAGEMENT ET D'EXPLOITATION DES TERRES DU DELTA DU FLUVIÈRE SENÉGAL ET DES VALLÉES DU FLUVIÈRE SENÉGAL ET DE LA FALEMP
S.A.E.D.
 Direction de la Planification et du Développement Rural
 (D.P.D.R.)



Carte N° 1. SITUATION DE LA ZONE D'INTERVENTION DE LA SAED, RIVE GAUCHE DU FLEUVE SENEGAL



Pour ce faire, nous avons ciblé des techniques de mesures telles que la télédétection rapprochée via la radio thermométrie infrarouge sur culture d'arachide et la tensionmétrie sur culture d'oignon.

En effet, les valeurs tensiométriques et neutroniques au profondeur d'extraction racinaire (PER) donnent le potentiel hydrique Ψ ou pF du sol en place et par conséquent l'évolution du stock d'eau dans le sol. Ce dernier permet de calculer la fraction d'eau totale du sol (FTSW) qui est utilisée pour traduire le degré de déficit hydrique subit par la plante au niveau de sa zone racinaire.

La FTSW à une date donnée est le rapport entre la quantité transpirable à cette date(ASW) et la quantité totale transpirable du sol (TTSW).Le rapport est noté comme suit :

$$\text{FTSW} = \text{ASW} * 100 / \text{TTSW}$$

La combinaison du potentiel hydrique et la simulation de la FTSW va permettre de calculer les doses pratiques d'irrigation de la canopée. L'intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle offre la simplicité dans le suivi de la réserve hydrique du sol et l'estimation du bilan hydrique à des pas de temps réguliers.

Par ailleurs, les valeurs des différences de température ($T_C - T_A$) par radiothermométrie du couvert végétal caractérisent l'état hydrique de la culture sous l'effet de la température et la demande évaporative en rapport avec le déficit de pression de vapeur (DPV).

La représentation de la régression linéaire ($T_C - T_A$) en fonction du DVP permet de calculer l'indice de stress hydrique des cultures (CSWI) qui exprime l'intensité de stress de la culture et de la disponibilité de l'eau du sol. C'est donc dire que le CWSI optimale est aussi un outil efficace pour une bonne estimation des besoins en eau afin de subvenir aux scénarii hydriques adéquats et des optimums d'efficacités de valorisation de l'eau.

En pratique, nous supposons que les données climatiques nécessaires sont fournies par une station climatique (au voisinage de la zone d'application) équipée de thermomètres, anémomètre, bac d'évaporation, capteur de rayonnement solaire.

II°/ HYDROSYSTEME CULTURAL DE LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

2-1°/ APERCU SUR LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

La rive gauche de la VFS s'étend sur plus de 800 Km de l'embouchure à la frontière avec la Mali . Elle couvre trois départements (Dagana, Podor, Matam) de la région de Saint-Louis ainsi que le département de Bakel situé dans la région de Tambacounda.

Cette zone est comprise entre 16 et 16°30 de latitude Nord, 15°30 et 16°30 de longitude Ouest (OMVS, 1980). Comme dans le Sahel, la VFS est marquée par deux saisons :

- une *saison pluvieuse*³ (HIV) de Juillet à Octobre correspondant à la campagne rizicole, avec une moyenne pluviométrique de 300 mm ;
- une saison sèche subdivisée en deux campagnes : la *contre saison froide* (CSF) de Novembre à Février et la *contre saison chaude* (CSC) de Mars à Juin, correspondant respectivement aux périodes de la polyculture et la deuxième riziculture.

L'humidité relative de l'air est environ de 60 % en moyenne et peut atteindre 75 % de Juillet à Septembre (Camara, 1999). L'évaporation Ev bac A donne 7 mm / j en Hivernage 8 mm / j en CSF et 10 à 12 mm / j en CSC. Les températures minimales sont inférieures à 20°C avec un rayonnement global de 1 400 J / cm / j en période CSF.

Les composantes de cet hydrosystème sont matérialisées par la figure n° 1 ci-dessous:

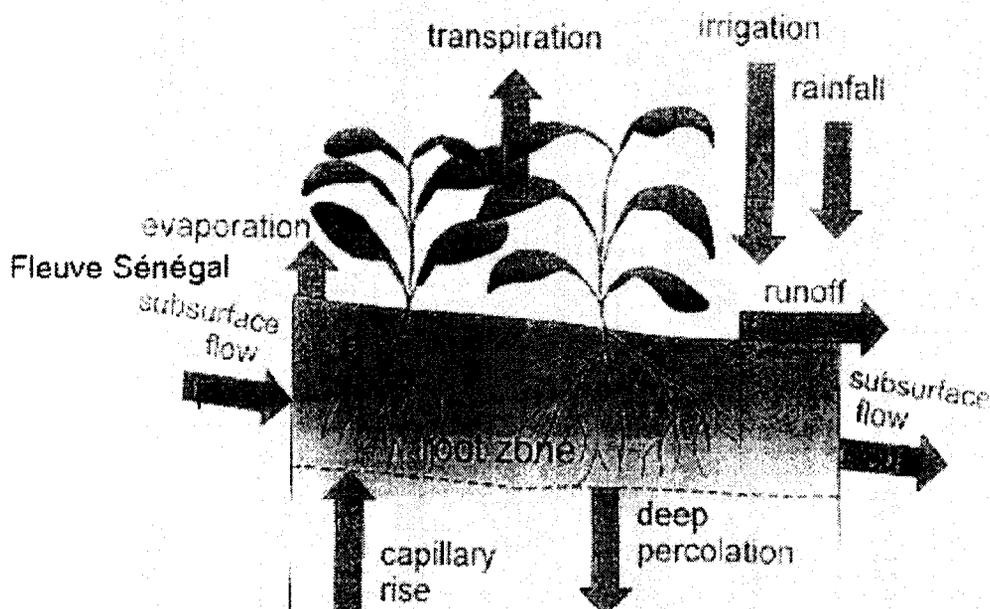


Figure n°1 : Hydrosystème culturelle de la vallée du fleuve Sénégal

A cause du caractère aride du climat et de la faiblesse du couvert végétal, la pédogenèse a évolué à pas lents et on peut distinguer plusieurs types de sols dont les noms vernaculaires sont: *Hollaldé*⁴, *Faux hollaldé*, *Fondé*, *Falo*, *Diacré* et *Dieri*⁵. Schématiquement, on trouve au bord du cours d'eau des bourrelets de berge constitués d'éléments plutôt grossiers avec des teneurs en argile de l'ordre de 20 %

³ dite Hivernage

⁴ vertisol avec 50 à 75 % d'argile

⁵ sol léger avec 80 à 90 % de sable

En s'éloignant, on rencontre des zones basses (Fondé lourd et f Iollaldé) propices à la riziculture. Puis on remonte vers la plaine sableuse (Diacré) en passant par la zone de raccordement Diéri qui ont une vocation de polyculture.

Du reste, la végétation qui y domine sont les acacias, balanites, zizyphus, tamarix et autres xérophytes. Malgré la disponibilité de l'eau, la production de la VFS continue de souffrir de d'autres contraintes inhérents aux facteurs thermiques, le photopériodisme, les maladies et ennemis des cultures.

Ces contraintes modulent très sensiblement le choix et le calage des cycles culturaux (Sarr B, 3 995)

En effet, les températures basses (minima) ont des conséquences néfastes telles que les difficultés de levée, la coulure⁰ et l'allongement du cycle végétatif.

2-2°/ DIVERSIFICATION ET SYSTEMES D'IRRIGATION DANS LA VFS

2.2. 1°/ DIVERSIFICATION

Durant ces dernières décennies, les périmètres aménagés ont été consacrés pour une large part à la culture du riz . Constituant l'aliment de base de près de 40 % de l'humanité, la consommation du riz est aussi importante dans les pays du Sahel occidental. Elle atteint 75 kg / habitant / an au Sénégal et 50 en Mauritanie (Sarr B, 1995).

Toutefois, la spéculation riz n'a pas entièrement répondu aux espoirs attendus. le déficit vivrier demeure croissant et. la production locale occupe une place marginale dans notre économie. C'est pour cela {l'autres cultures irriguées " de diversification " ont été introduites ou sont en voie d'expérimentation dans les périmètres de recherches agronomiques de l'ISRA. Il s'agit des cultures maraîchères, du maïs, sorgho, coton, arachide et niébé. Le tableau n°1 donne les caractéristiques de ces spéculations. Du reste, les arguments concourant à cette problématique tournent au tour des concepts " intensification et diversification" qui sont résumés sur les tableaux n°2 et 3.

Le maraîchage effectué en CSF et CSC sur sols légers est constitué par la tomate, l'oignon, la pomme de terre, la patate douce, le haricot vert et le pastèque. Les objectifs de la culture maraîchère sont

l'avortement des panicules

SPECULATIONS	BESOINS EN EAU	KC init ^a ,végét ^b ,flora ^c ,mûris ^d	PERIODES SENSIBLES	PER	WUE Ky	SYST IRRIGATION RECOMMANDE	RENDEMENT Ym
<i>Arachide</i>	500 à 700 mm	0.5; 0.8; 1.1; 0.6	floraison	0.5 à 1 m	0.6 à 0.8 Kg/ m ³	Aspersion	3.5 à 4.5 t/ha
<i>Maïs</i>	500 à 800 mm	0.6; 0.8; 1.1; 0.85	floraison et format ^o panicule	1 à 1.7 m	0.8 à 1.6	Aspersion	6 à 9
<i>Oignon</i>	350 à 550 mm	0.4; 0.75; 1.15; 0.55	floraison et format ^o du bulbe	0.3 à 0.5 m	8 à 10	Sillon et par Bassin	35 à 45
<i>Sorgho</i>	450 à 650 m m	0.5; 0.8; 1.25; 0.65	floraison	1 à 1.5 m	0.6 à 1.0	Calant, bassin, sillon	3.5 à 5
<i>Tomate</i>	400 à 600 mm	0.5; 0.8; 1.25; 0.9	repiquage et formation fruit	0.7 à 1.5 m	10 à 12	Sillon, raie et goutte à goutte	45 à 65
<i>Riz</i>	450 à 700 mm	1.15; 1.3; 1.05		1 m	0.7 à 1	Bassin , Submersion	6 à 8

Tableau n° 1 : Caractéristiques des cultures de diversification de la vallée du fleuve Sénégal

^a installation de la culture

^b phase végétative

^c floraison

^d mûrissement du produit



Tableau n° 2 : Une problématique de développement. deux concepts ; ① l'intensification

aménagistes	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation du rapport : production / ha ✓ Augmentation des dépenses : intrants / ha
ago-écologues	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amélioration durable de la productivité
agriculteurs	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amélioration de la productivité du travail
Conséquences	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Double culture (intensité culturale) : barrage ✓ Engrais : crédits de campagne ✓ Petite surface / attri butaire et repiquage
aménagistes	
ago-écologues	<ul style="list-style-type: none"> J Gestion intégrée de la fertilisation ✓ Gestion de aménagements et du matériel
agriculteurs	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Culture extensive et mécanisation ✓ Groupes de travail ✓ diversification



Tableau n° 3 : Une problématique de développement. deux concepts
② la diversification

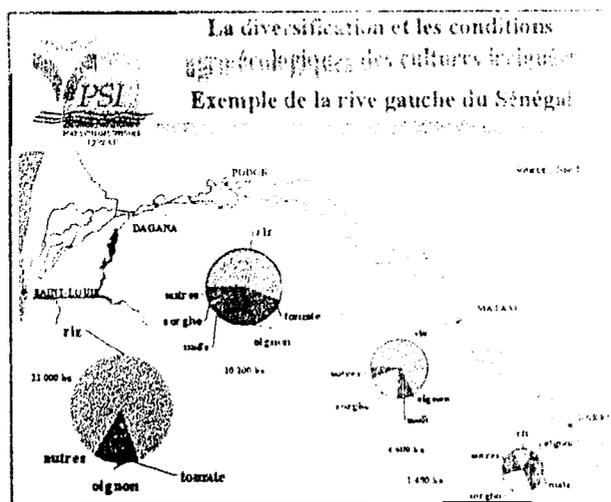
diversification	<ul style="list-style-type: none"> ✓ dans la région (agriculture, élevage.. .) ✓ dans l'exploitation (culture irriguéeidécruée, riz/autre espèces.. .) ✓ dans la parcelle (rotations culturales)
diversité	<ul style="list-style-type: none"> ✓ diversité des exploitations (âge, taille, équipement,.. .) ✓ diversité des aménagements (GA, AI, PIV, PIP... .) ✓ diversité agroécologique (delta. moyenne v allée, haute vallée,.. .)
L'intégration nécessaire	<ul style="list-style-type: none"> ✓ dans la « maille hydraulique » ✓ dans filière du produit

principalement d'ordre alimentaire et économique à savoir l'approvisionnement du marché local et l'exportation vers l'Europe.

Les légumineuses telles que l'arachide et le niébé sont cultivées aussi sur des sols légers

La pratique des céréales de diversification est justifiée par plusieurs raisons dont le choix climatique, la rentabilité économique, la préservation des sols, le souci de diminuer les charges d'irrigation et des temps de travaux imposés par le riz.

Toutefois, ces cultures subsistent, à des degrés divers, l'effet des contraintes thermiques locales et les stress agrophysiologique (Sarr B, 1995). La carte n°2 présente la situation actuelle des niveaux de production par spéculation dans la vallée du fleuve Sénégal.



Carte n°2 : La diversification et les conditions agroécologiques des cultures irriguées dans l'ATS

2-2-2°/ SYSTEMES D'IRRIGATION:

La poursuite des buts de l'irrigation qui sont d'entreprendre des cultures plus variées, pallier l'irrégularité de la pluviométrie, d'étaler le calendrier cultural doit découler sur l'obtention de rendements beaucoup plus élevés. Ainsi, le choix d'un système d'irrigation qui profite le maximum à la plante doit être raisonné sur les facteurs influençant les besoins en eau tel que :

- * la nature du sol
- * le niveau d'évaporation;
- * les itinéraires techniques de la culture;

Au niveau de la VFS, l'eau du fleuve constitue la principale source d'irrigation dont l'accès se fait par un système moto pompe (GMP) et de stations de pompage respectivement pour les périmètres irrigués villageois (PIV)⁷ et les grands périmètres (GA)⁸.

L'eau pompée est transportée, à travers des ouvrages de régulation ou de réparation, par des canaux ou conduites selon qu'on est en mode gravitaire ou sous pression. Signalons que dans la VFS, c'est le système d'irrigation de surface qui prédomine en loccurrence l'irrigation par submersion suivit de l'irrigation par ruissellement (l'arrosage par rigole de niveau). Ce dernier SC pratique sur les cultures de diversification qui ont tendance à adopter l'irrigation par aspersion.

Néanmoins l'utilisation de la micro irrigation se trouve freinée par l'eau chargée en particules qui obstruent les goûteurs.

En pratique (Camara, 1999), les systèmes d'irrigation de la VFS souffrent de problèmes liés :

- * au gaspillage" tant à la distribution qu'à l'application à la parcelle;
- * le planage en riziculture submergée;
- * à la maintenance sous toute ces formes"" des infrastructures hydrauliques;
- * à la cherté du coût de l'eau.

III°/ IDENTIFICATION D'INDICATEURS AGRO-PHYSIOLOGIQUES DE STRESS HYDRIQUE POUR LE PILOTAGE DE L'IRRIGATION

3-1°/ SUIVI DE L'ETAT HYDKIQUE DU SOL

3-1-1°/ POTENTIEL HYDRIQUE ET ANALYSE FREQUENT'IELLE DE L'IRRIGATION

Le principe de la mesure du tensiomètre (à bougie poreux) repose sur la dépression créée, dans un système étanche à l'air, par le transfert de l'eau au travers d'une paroi poreuse vers le sol donnant le gradient hydraulique entre les deux milieux lorsque l'état d'équilibre en phase liquide est établi.

Alors, la force de succion exercée par le sol et/ou la culture sur le tensiomètre, placé à la cote Z^1 , est le potentiel hydrique Ψ du sol . La pression d'eau lue sur le manomètre, mesure la dénivellation H (en

total de 25 000 Ha

⁸ total de 45 000 Ha

⁹ en moyenne des efficacités totales de moins de 40 %

¹⁰ soit préventive, systématique ou curative

valeur négative en mbar) appelée charge hydraulique. Le potentiel hydrique (en mbar) est donné par relation :

$$\Psi = H + Z$$

avec 1 mbar = 1 cm de colonne d'eau

Mais, par souci de commodité, on utilise une notation logarithmique du potentiel appelé pF qui est définie par la formule suivante:

$$pF = \log_{10} [H]$$

Autrement dit, ce Ψ ou pF est la résultante de la consommation hydrique assimilable à l'ETK suite l'évaporation du sol et la transpiration de la canopée sur place.

D'ailleurs, un stress hydrique du CSPA équivaut à une charge hydraulique H dont pF = 3.7 qui correspond à une humidité au point de flétrissement soit temporaire ou permanent.

Ainsi, nous proposons le déclenchement de l'irrigation dès que le manomètre affiche une pression $\Psi = -10 \text{ atm}$ c'est à dire pF=3.7 du point de flétrissement temporaire .

En effet, les valeurs de pF obtenues peuvent être converties en humidité pondérale Hp du sol à l'aide de la figure n°2.

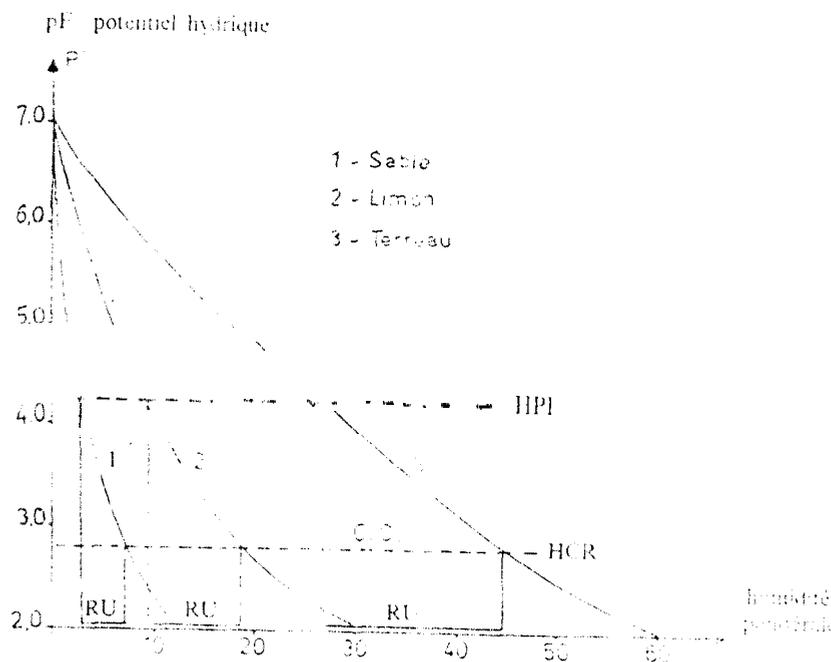


FIGURE 2 . - Relation potentiel - humidité pour trois types de sol

correspondant à la PER en cm donnée par le tableau n°4

ultérieurement fourni par le bilan hydrique (paragraphe 3-1-2'')

Cette H_p est liée à l'humidité volumique H_v de la zone racinaire via la densité apparente da par la relation suivante:

$$H_v = (H_p * da) * 100$$

avec les valeurs de da selon le type de sol de la VFS (Camara,1999):

- * 1.1 à 1.3 pour Hollaldé et Faux-Hollaldé;
- * 1.3 à 1.5 pour Falo et Diacré (sol limoneux);
- * 1.5 à 1.8 pour *Diérri* (sol sableux).

De façon pratique, l'eau disponible dans le sol ou ASW est obtenue par l'équation suivante

$$ASW (\%) = \text{stock PER} - \text{stock pF4.2}$$

Tandis que, l'eau du sol potentiellement transpirable ou TTSW est calculer par la formule à savoir:

$$TTSW (\%) = \text{stock pF3} - \text{stock pF4.2}$$

où stock PER est H_v issue de la conversion du potentiel hydrique Y mesuré par le tensiomètre. Stock pF4.2 et stock pF3 sont respectivement les stock d'eau au point de flétrissement permanente et à la capacité au champ du sol pour un même PER.

Et par analogie à l'hydraulique, l'ASW équivaut à la réserve facilement utilisable (**RFU**) et le TTSW s'assimile à la réserve utile (**RU**) maximale. Ces états hydriques du sol sont calculés en fonction de la PER, la da et les humidités par les relations suivantes :

$$RFU = (\text{stock pF3} - \text{stock pF 4.2}) * PER * da \quad \text{en mm:}$$

$$RU = (\text{stock pF3.2} - \text{stock pF 4.2}) * PER * da \quad \text{en mm :}$$

Le rapport (RFU / RU) = f est assimilable à la fraction d'eau totale transpirable $FTSW = ASW / TTSW$. Ce facteur f correspondant à l'état de confort hydrique est spécifique à chaque culture et est fonction de la nature du sol et du climat. Par exemple, en condition hydrique optimale comme la culture irriguée, la FTSW avoisine 0.66 à 0.80 selon le type de culture.

c'est à dire : $ASW = 2/3 * TTSW$ ou $RFU = 2/3 * RCJ$.

A cet effet, pour planifier l'irrigation de façon rationnelle à l'échelle de la parcelle, les calculs de doses et fréquences des arrosages se basent, sur ces états de l'eau dans le sol. Ainsi la dose théorique d'irrigation **D** est égale à :

$$D = 4.5 * H_e * PER * da \cong RU ;$$

Et la dose pratique d'irrigation **D'** s'écrit :

$$D' = 3 * H_e * PER * da \cong RFU .$$

D'où si pour un cycle d'une culture, l'on a trouvé les besoins théoriques ETM par phase phénologique et si l'on applique à chaque arrosage la dose pratique D'. alors on devra effectuer dans la phase N arrosages :

$$N = ETM / D' = ETM / RFU = ETM / ASW.$$

A l'échelle du périmètre en système gravitaire, les expressions séquentielles d'irrigation entre plusieurs usagers sont calculées par les équations suivantes :

* La rotation R (tour d'eau) ou le nombre de jours séparant deux irrigations sur la même parcelle est égale à :

$$R = n_j / N \quad \text{avec } n_j \text{ la durée de la phase considérée.}$$

* La durée d'un poste T_i ou temps mis à chaque rotation", à partir d'un débit d'irrigation dit module m, est de :

$$T_i = D' / m \quad \text{avec } m = 30 \text{ l / s dans la VFS:}$$

* Les besoins d'alimentation Q en eau d'irrigation (sans lessivage) du périmètre de surface A (en ha) et d'efficacité totale de E_T % est de :

$$V - D' * A / E, \quad \text{en mm / période}$$

* Les débits, fictifs continus DFC et maximum de pointes DMP , des canaux¹³ d'amenés en périodes de plus forte sensibilité sont de :

$$DFC = (Q * 1000) / (n_j * 86400) \quad \text{en l / s / ha,}$$

$$DMP = DFC * 24 / (nh / j); \quad \text{Certes, le séquençage offre une bonne}$$

gestion de l'eau mais elle serait d'autant mieux si le découpage du périmètre (en quartiers hydrauliques et en unités parcellaires) et la mise en place des culture tiennent compte des besoins en eau

* Le quartier hydraulique W ou unité autonome potentiellement irrigable est de :

$$W = m / DMP \quad \text{en ha;}$$

* selon la perméabilité du sol (K)¹⁵, l'équation de l'unité parcellaire U est :

$$U = m / K \quad \text{en ha}$$

¹³ ≠ du nombre d'heure d'irrigation par jour nh / j

¹⁴ dimensionnés à par-tir du DMP max de la culture la plus sensible

¹⁵ K égale à 10⁻⁵ m/s en sol sableux et 10⁻⁷ m/s en sol argileux

Du reste, il est recommandé à travers la bibliographie, toujours dans le souci d'une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau

- d'une part, d'appliquer l'arrosage à l'ETM pendant les phases sensibles telle que la floraison et le remplissage du produit :

- d'autre part, de stresser légèrement les plantes en appliquant des arrosages de 60 à 80 % de l'ETM pour la phase végétative et avant la récolte.

3-1 -2°/ ELABORATION DU BILAN HYDRIQUE

L'évaluation de l'état hydrique du sol se fait par simulation du bilan hydrique à un pas de temps de préférence décadaire en relation avec la phénologie de la culture. Le principe repose sur la différence entre les *apports* (pluies et/ou irrigations) et les *pertes* (évapotranspiration, ruissellement, drainage). L'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR), ou consommation en eau des plantes est traduite par l'équation du bilan de l'eau dans le sol exprimée comme suit :

$$\mathbf{ETR = P + Irr \pm \Delta \text{ stock} \pm R \pm Dr}$$

avec (exprimés en mm / décade) :

- * P = cumul pluviométrique enregistré entre deux dates de mesures;

- * Irr = dose pratique d'irrigation apportée ou D';

- * $\Delta \text{ stock}$ = variation du stock d'eau ou variation de RFU mesurée¹⁷ à deux dates différentes : soit S_1 (RFU₁ mesurée à la date t_1) et S_2 (RFU₂ mesurée à la date t_2);

- * R = pertes par ruissellement qui sont négligeables, parce que bloquées par les diguettes de bordures;

- * Dr = drainage dite percolation profonde, déterminé par différence lorsque le stock hydrique dépasse la réserve en eau du sol (RU). Par exemple pour la tomate, la RU est environ de 100 mm pour une PER de 60 cm dans un sol de type Hollaldé (Camara, 1999).

Par ailleurs, suite aux mesures d'évaporation Ev bac A qui corrigées avec les coefficients de Rijks (K')¹⁷ donnent l'évapotranspiration potentielle (ETP) de la VFS suivant la relation:

$$\text{ETP} = K' * \text{Ev bac.}$$

¹⁷ par tensiométrie dans ce cas

¹⁷ K' est de 0.8 en Hiv et de 0.7 en CS

Ainsi selon la culture, le tableau n°1 nous donne-les valeurs de coefficients culturaux (K_c) en fonction de la phénologie qui nous permettent de calculer l'évapotranspiration maximale (ETM) suivant l'équation:

$$ETM = K_c * ETP$$

En fin, la connaissance de ces paramètres climatiques et culturaux offre la possibilité, grâce à l'indice de satisfaction en eau ($TSAT$), d'apprécier le degré de stress auquel une culture est soumise pour chaque stade de développement:

$$TSAT = ETR / ETM$$

Du reste, le taux de satisfaction en eau est le complément du CWSI par la relation suivante:

$$TSAT = 1 - CWSI.$$

Une fois les valeurs de références obtenues par expérimentation, la simulation pourra se faire sur la base de la comparaison des $TSAT$ instantanées et celles de références. Ce ci pour mieux orienter les méthodes de planification de l'irrigation qui sont proposées dans cette étude afin d'une plus grande optimisation du l'acteur eau.

3-2°/ SUIVI DE LA TEMPERATURE DU COUVERT

Parallèlement à la tensiométrie, la méthode du radiothermomètre à capteur infra-rouge fonctionne sur le principe selon lequel tout corps émet des rayonnements dont les longueurs d'ondes dépendent de sa température. L'appareil permet de mesurer à la fois la température du couvert végétal (T_c) de la plante et celle du différentiel de température ($T_c - T_a$) entre le couvert et l'air (T_a), qui dépendent des capacités transpiratoires des plantes et, donc, de leurs capacités d'absorption de l'eau disponible dans le sol. D'ailleurs, une corrélation existe entre ($T_c - T_a$) et le déficit de pression de vapeur de l'air (DPV) pour des plantes bien alimentées en eau par la régression linéaire suivant la relation :

$$T_c - T_a = a * DPV + b.$$

Le DPV est déterminé à l'échelle de la parcelle à partir des températures sèches (T_s) et humides (T_h) de l'air mesurés à l'aide d'un psychromètre ventilé:

$$DPV = e_s - e \quad \text{en mbar}$$

où e_s est la tension de vapeur d'eau saturante et e la tension de réelle de vapeur d'eau:

$$e_s (T_s) = 6.11 * \exp (17.25 * T_s / 237.3 + T_s)$$

$$e = e_s (T_s) - \sqrt{*} (T_s - T_h)$$

où $\sqrt{*}$ est la constante psychrométrique voisine de 0.66 mbar / °C .

Alors, le rapport e/e_s égal à humidité relative en % (**Hr**) permet d'aboutir à une autre relation :

$$DPV = e_s (T_s) * (1 - Hr\% / 100) \quad \text{en mbar .}$$

L'indice de stress hydrique des cultures, ou **CWSI** (crop water stress index) est ensuite calculé à partir de la relation :

$$CWSI = (Tc - Ta - P_2) / (P_1 - P_2) ;$$

où P_1 est la différence maximale entre $(Tc - Ta)$ pour une *limite supérieure* (plantes stressées) et une limite inférieure ou *ligne de base* (plantes bien irriguées) et P_2 est la différence $(Tc - Ta)$ entre la ligne de base et le point considéré. Partant de ces indicateurs de stress, le pilotage de l'irrigation est établi (Charbonnier, 1984) par la relation basée sur les analyses de régression multiple entre $(Tc - Ta)$ et trois paramètres : **Hr %**, l'ASW et les radiations nettes **R** en w/m^2 . Ainsi, la figure n°3 donne ΔTc théorique par projection du R sur Hr et de Hr au ΔT . En suite on compare la valeur ΔTm égale à $(Tc - Ta)$ mesurée au radiothermomètre avec celle de ΔTc :

- * Si $\Delta Tm \geq \Delta Tc$: la plante est stressée, alors il faut irriguer ;
- * Si $\Delta Tm \leq \Delta Tc$: la culture est en situation de confort hydrique.

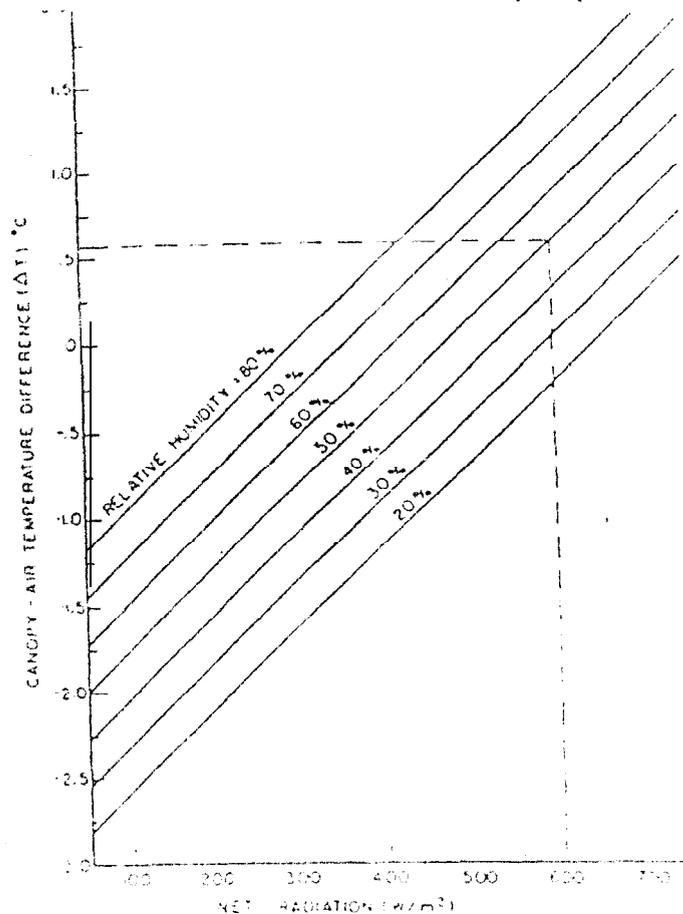


Figure 3 : Graphical representation of ΔT equation with available water set 50 percent depletion

IV°/ APPLICATIONS DES INDICES DE STRESS:

4-1°/ CAS DE L'ARACHIDE DANS LA VFS

Cette étude a été conduite sur une culture d'arachide sur le périmètre irrigué de Thiago (Richard-Toll, Sénégal) . sur 200 ha regroupant 300 paysans pendant les campagnes 1991 et 1993 (Annerose et al. 1996). Deux possibilités sont offertes aux producteurs, le semis en mars d'une variété hâtive qui pourra accomplir son cycle avant la saison des pluies et libérer le terrain pour une culture d'hivernage. Les objectifs de l'étude sont : d'une part, de valider la méthode d'estimation de l'état hydrique d'un sol par comparaison avec des indicateurs de stress fiables généralement utilisés à l'échelle de la plante. afin de proposer les conditions d'application de démarche à un culture sous irrigation: d'autre part. de déterminer les besoins en eau de l'arachide dans la delta du fleuve Sénégal. En effet, cette variété¹⁸ a des températures de base et optimale qui sont respectivement de 11°C et 28°C. Un meilleur développement végétatif de l'arachide s'observe avec un rayonnement global moyen journalier de 1800 J / cm² / j (Gautreau, 1973) .

Des mesures de températures du couvert (Tc-Ta), le potentiel hydrique foliaire (Ψ_f) la conductivité stomatique (C_s), la photosynthèse (LAI) ont été effectuées sur des parcelles d'arachide. cv 55-437. La parcelle choisie est divisée en deux sous-parcelles au stade végétatif maximum. L'une a continué à être bien arrosée (ETM) tandis que l'autre était mise en condition de stress par suspension de l'arrosage. Les mesures sont prise simultanément à partir de la date d'application du stress. L'évolution du différentiel de température (Tc-Ta), en fonction du déficit de pression de vapeur (DPV), est représentée sur la figure n° 5 pour une journée de mesure, 10 jours après l'application du stress. Sur la parcelle à ETM, une relation linéaire est observée entre Tc-Ta et DPV. La diminution de Tc-Ta avec l'augmentation du DPV au cours de la journée, rend compte de l'importance du flux transpiratoire lié à l'absence de contrôle stomatique dans les tissus foliaires bien alimentés. Sur la parcelle stressée, Tc-Ta (-3°C) reste élevé avec l'augmentation du DPV, rendant compte de l'incapacité des plantes à maintenir leur transpiration due à une limitation de l'absorption racinaire (base des réserves en eau du sol) et/ ou à une fermeture des stomates.

Selon Idso et Jackson, une culture complètement stressée (ETR) aurait une Tc voisine de celle de Ta (ligne pointillée de la figure n° 5). Le CWSI peut donc être calculé à chaque valeur de DPV. Une

¹⁸ variété spanish à cycle court

relation linéaire (figure n°4) est mise en évidence entre le CWSI et le potentiel hydrique foliaire (Ψ_f). Ce résultat indique que le CWSI constitue un indicateur fiable de l'état hydrique foliaire.

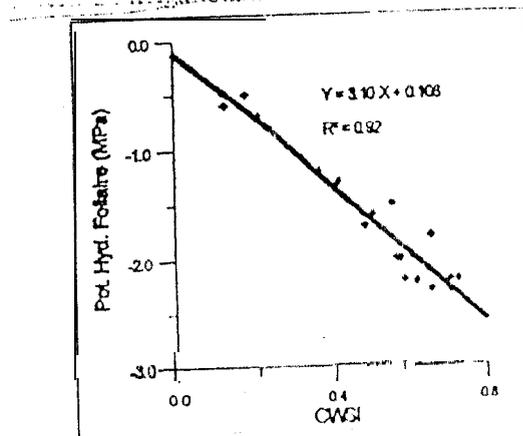


Fig. 4 Relation CWSI Potentiel Hydrique Foliaire

La relation entre Ψ_f et la conductance stomatique (C_s) indique que la fermeture des stomates, et donc l'intensité des échanges gazeux, se manifeste à un Ψ_f de -1 MPa. Cette valeur de Ψ_f correspond à un CWSI de 0.3 qui peut par conséquent être retenu comme valeur seuil pour l'alerte à l'irrigation.

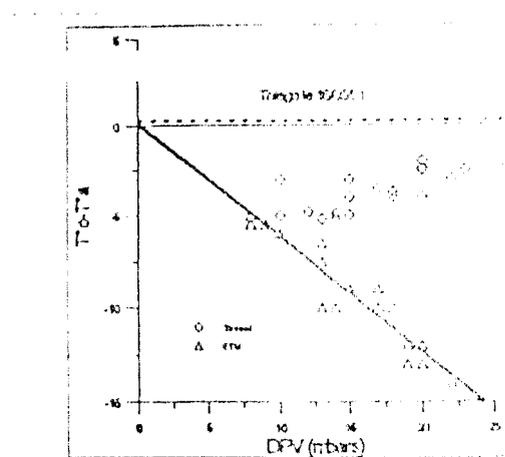


Fig. 5 Etalonnage et calage

À la récolte, les rendements gousses sont compris entre 2710 Kg / ha et 500 Kg / ha pour l'ensemble des parcelles. Cette gamme de rendements rend compte de la diversité des situations agronomiques liées en grande partie au degré de technicité des agriculteurs.

Le rendement gousse maximal a été obtenu sur le traitement à ETM cycle avec une valeur moyenne de 1860 Kg / ha. L'économie effectuée par pilotage de l'irrigation sur le traitement (ETM pilotage) a permis de maintenir les rendements en gousses par rapport à la parcelle à ETM. Les rendements des traitements n'ayant reçu qu'une irrigation de semis puis irrigués à l'ETM ou pilotés par CWSI à partir du 30ème jas, sont significativement inférieurs au premier traitement, mais pas entre-eux. Les

rendements fanes sont compris entre 2500 Kg / ha et 6950 Kg / ha et ne sont pas significativement différents entre les traitements.

Ces résultats confirment que la détermination de l'état hydrique de la plante par radio thermométrie peut constituer une méthode efficace pour l'économie de l'eau sans diminution des rendements attendus par rapport à une parcelle à ETM. Comparativement au mode de gestion traditionnel de l'irrigation sur les périmètres du delta, elle permet d'optimiser la répartition des tours d'eau entre les exploitants. La réduction de deux tours d'eau a permis de réaliser une économie de 1120 000 F CFA sur les postes carburant et lubrifiant à l'échelle du périmètre. Cette économie permet de couvrir, dès la première année, les investissements et le fonctionnement nécessaires à la mise en œuvre de cette méthode. Cette méthode peut aussi être appliquée à d'autres cultures .

4-2° / EXEMPLES DU MIL ET DE L'OIGNON

Au CNRA de Bambey, des travaux¹⁹ ont été conduits (Sarr B.1996) par de méthodes de radio thermométrie infrarouge et bilan d'eau afin d'identifier des critères agro-bio-climatologiques et physiologiques de gestion optimale de l'eau en zones sèches en vue d'améliorer la production de maïs. Au cours de l'expérimentation, la variété de maïs Synthétic-C a été soumise à quatre régimes hydriques : Evapotranspiration maximale pendant le cycle (TO), stress en phase végétative (T1) du 27 au 42 JAS, stress en phase végétative et floraison (T2) et stress en phase floraison (T3) du 50^e au 67^e JAS .

Les résultats obtenus ont montré que qu'une réduction de l'eau disponible dans le sol de 40 à 50 %, correspond à un TSA'f de l'ordre de 75 %, entraîne une hausse rapide du CWSI.

Des rendements en grains supérieurs à 4 t / ha ont été obtenus pour des valeurs de CWSI à la floraison inférieur à 0.37. Le couplage de ces différents paramètres donne, pour la variété Synthétic-C, une valeur seuil du CWSI de 0.27 pour déclencher l'irrigation.

Par ailleurs au Burkina faso (Sanon, 1999), dans des conditions similaires à la VFS, la méthode de radiothermométrie appliquée sur l'oignon donne de bons rendements. Elle consiste entre autre à une

¹⁹ Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal

irrigation à 50 % de l'ETM pendant la phase de grossissement. et 75 % pendant l'ETM le remplissage du bulbe.

Le rendement obtenu en bonnes condition d'arrosage en CSF est élevé (40 à 70 t / ha en frais), mais le taux de floraison indésirable est également élevé. En CSC, le rendement ne dépasse pas 30 t / ha. mais sans floraison indésirable. Une réduction de l'irrigation en CSF limite le taux de floraison et le taux de pourriture en conservation. Ce dernier augmente avec le poids des bulbes, qui ne doivent pas atteindre 100 g (poids frais).

La profondeur de sol utile atteint **40** cm . cc qui doit guider la gestion des doses d'eau. Ainsi, la quantification des besoins en eau et la détermination du niveau de stress hydrique acceptable en fonction des objectifs de production ont été faites sur la base des mesures radio thermométriques. Il est aussi possible. néanmoins de piloter l'irrigation à l'aide de tensiomètres placés à 20 cm de profondeur en sol argilo-limoneux.

V°/ VALORISATION DES INDICES POUR L'AMELIORATION DE;S RENDEMENTS DANS LA VFS

Le niveau de la production agricole est déterminé par les conditions du climat et par le potentiel génétique de la culture. La mesure dans laquelle il est possible d'atteindre cette limite dépendra toujours du degré de perfection avec lequel on arrivera à accorder les conditions techniques de l'alimentation en eau avec les besoins physiologique de la production (FAO, 33)

Quand les besoins en eau des cultures sont pleinement satisfaits (ETR= ETM), la quantité totale de matière sèche (E_m) et de rendement produit par unité d'eau ou le rendement hydraulique de l'irrigation (E_y) en Kg / m³ varient avec la culture. E_y est fonction aussi de du pourcentage d'humidité et de l'indice de récolte (CH) qui exprime le rapport entre la matière sèche totale nette et le produit récolté pour une culture irriguée.

Toutefois, un déficit hydrique se traduit par le régime d'évapotranspiration maximal n'est atteint et on se trouve en régime d'évapotranspiration réelle, ETR, qui est réduite par rapport à l'ETM

Au niveau de la feuille, la fermeture partielle des stomates réduit les échanges gazeux de la plante avec l'atmosphère, et freine son activité photosynthétique.

Pour cela, on définit les notions d'efficience afin de caractériser le rendement de l'eau sous ses différents aspects:

* en terme physiologique on a l'efficience d'utilisation de l'eau : $EUE = rdt / ETR$;

* en terme physiques on a l'efficience agronomique: $Ea = \Delta Pu / V$;

* en terme monétaire on a l'efficience économique: $Ee = \Delta Ru / Ci$;

avec rdt= rendement total en biomasse;

ΔPu = augmentation de la production utile ; V = quantité d'eau apportée ;

ΔRu = augmentation du revenu brut²⁹ obtenu grâce à l'irrigation ;

Ci = charges liées à l'eau dont les taxes. pompage, main-d'œuvre à l'arrosage, l'amortissement du matériel d'irrigation. etc...

Ce modèle se base sur le fait que les phénomènes d'évapotranspiration et de photosynthèse apparaissent comme proportionnels :

$$(MS_{..} - MS) / MS = (ETM - ETR) / ETM$$

avec $MS_{..}$ = production de matière sèche à l'ETM;

MS = production de matière sèche à l'ETR .

De cette équation . il en résulte par analyse des résultats de recherches. a possibilité de calculer les pertes de rendements relatives si l'on dispose de renseignements sur le rendement réel (Y_a) comparé à celui maximal (Y_m) avec différents régimes d'apports d'eau. Cette diminution relative de rendement et le déficit de l'évaporation relative donne le coefficient de réponse des rendements (K_y) qui sont obtenu de façon empirique, soit:

$$(1 - Y_a / Y_m) = K_y * (1 - ETR / ETM)$$

Le tableau n°1 matérialise les K_y pour la planification de l'irrigation permet d'évaluer quantitativement l'apport et la consommation d'eau du point de vue du rendement agricole. Du point de vue de la gestion des eaux. cela signifie qu'il vaut mieux répartir l'eau provenant de disponibilités contrôlées mais limitées de façon à satisfaire complètement les besoins en eau de la culture pendant les périodes de croissance les plus sensibles au déficit hydrique, que l'étaler de façon égale sur toute la période végétative. Par exemple, pour l'arachide dans la VFS l'apport d'eau doit être destiné particulièrement à la floraison et à la formation du produit. Il s'ensuit que, quand on pratique une irrigation d'appoint, les arrosages doivent être programmés de sorte qu'il y ait dans le sol suffisamment d'eau disponible pour les cultures au moment de la floraison et du remplissage des gousses.

²⁹ en tenant compte du marché

Autrement dit, l'effet de l'ampleur et de l'époque du déficit hydrique sur le développement et le rendement de la culture est très important comme c'est le cas de la VFS, surtout quand il s'agit de programmer l'approvisionnement d'une quantité d'eau pas toujours accessible²¹ au cours des différentes périodes phénologiques de la culture, et d'établir des priorités entre les phases au cours de la campagne culturale.

L'intérêt de l'acquisition de ces indices et coefficients de productivité est qu'ils nous offrent la possibilité de faire précocement les prévisions de rendement du périmètre et partant du sondage de l'échantillon dans différentes zones de la vallée afin d'obtenir dans une base de données (type SIG) pour faciliter les prises de décisions et l'estimation de la production dans la VFS.

Pour ce faire, par la permutation des équations $(1 - Y_a / Y_m) = K_y * (1 - ETR / ETM)$ et $CWSI = (1 - ETR / ETM)$ impliquent l'égalité $(1 - Y_a / Y_m) = K_y * CWSI$. on en déduit une première formule d'estimation des rendements réels en fonction de l'indice de stress en eau de la culture:

$$Y_a = (1 - K_y * CWSI) * Y_m$$

D'autre part, les résultats de simulation de bilan hydrique (Forest et Kalms, 1983) ont montré que l'ETR du cycle et le 1 SAT permettraient de prévoir la production à certaines conditions. Ainsi, les indicateurs hydrauliques ont été améliorés en testant différentes expressions de l'ETR, ou / et du taux de satisfaction des besoins en eau. Ce qui donne naissance à un paramètre d'estimation des rendements IRESP (indice de rendement espéré) dont l'équation s'écrit:

$$IRESP = ETR_{cycle} * ETR / ETM_{pc} \quad \text{en \%}$$

avec ETR_{cycle} = cumul de flux productif en fonction de la transpiration et du rayonnement;

ETR / ETM_{pc} = taux de satisfaction en eau des phases critique (pc) sensible au déficit hydrique.

Au Sénégal, l' ETR_{cycle} d'une culture de mil varie de 210 à 420 mm.

De ce indice, on en déduit la deuxième relation de prévision des rendement qui a pour équation:

$$Rdt = a * IRESP + b \quad \text{en Kg / ha}$$

où $a = 10 * K_y$, et est compris entre 2 et 5 Kg / ha / mm en zone tropicale.

Néanmoins, dans chaque type d'agrosystème, il faut calibrer par régression linéaire pour obtenir des **a** et **b** conformes afin de garantir la fiabilité des prévisions de production.

²¹ perturbation de tour d'eau ou arrêt de pompage

D'ailleurs, ce schéma est le support conceptuel **du** model SARRA (système d'analyse régionale des risques agroclimatiques) reposant sur l'identification des facteur influençant la redistribution des terme; du bilan hydrique.

CONCLUSION :

Il ressort de cette étude **que** la réussite des cultures de diversification dans la vallée du fleuve Sénégal, face aux diverses contraintes dont la sécheresse, passe par une approche agro-physiologique afin de mieux maîtriser le scénario de **l'eau** dans ce continuum sol -plante- atmosphère.

Ainsi, cette revue bibliographique nous a permis de démontrer que la pratique des mesures tensio-neutroniques et de radiothermométries est une méthode simple et accessible pour **la** détermination **des** indicateurs de stress en vu d'un bon suivi de l'état hydrique du sol et du couvert végétal.

La simulation de ces indices permet de calculer les doses et les expressions séquentielles d'un arrosage efficace qui valorise des systèmes d'alimentation en eau d'irrigation et par conséquent l'amélioration de la production agricole de la vfs. Car l'effet de l'ampleur et de l'époque du déficit hydrique sur le développement et le rendement de la culture est très important quand il s'agit de programmer la fourniture d'une quantité d'eau disponible mais limitée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

Annerose D et al.(1996). Conduite de l'irrigation dans la région du fleuve Sénégal. Approche physiologique et application à la culture de l'arachide. 2 p.

Baret et Bèye M.(1980). Caractérisation hydrodynamique d'un sol de la zone de Bambey.CNRA.23p.

Berralay A et Troch F.(1997). Prévision des besoins en eau d'irrigation du blé par des méthodes combinées ARAR..*Sécheresse* **2(8)**.123- 127.

Camara M.(1999). Etude de la maintenance dans les périmètres irrigués transférés aux organisations paysannes: cas des casiers A et B de Dagana. Mémoire de fin d'études, ENSA;Thiès (Sénégal),80p + Annexes.

- Charbonnier S.(1984). Les mesures de températures de la surface de surface à partir de l'infrarouge thermique:interprétation en vue de mieux planifier l'irrigation des cultures.41 p.
- Charreau C et Sène D.(1974). Note sur une expérience d'irrigation par aspersion au Sénégal. IRAI .14p.
- Dancette C.(1983). Besoins en eau du mil au Sénégal, adaptation en zone semi aride tropicale.*Agronomie tropicale* **38**(4).267-280.
- Doorenbos J et al.(1980). Réponse des rendements à l'eau.Rome:FAO.235p.
- Franquin P.(1973).Les analyses fréquentielles du déficit hydrique et des pluies pour l'irrigation de complément. *Agronomie tropicale* **20**(8). 853-854.
- Godon P:(1999). Les principales dynamiques des productions de diversification dans la zone d'intervention du PSI.3p.
- Huguet C.(1969). La consommation de l'eau en rizière.Bulletin d'information des rizicultures de France:**120**.60-66.
- Le Gal .Y.P.(1989). De l'analyse des pratiques paysannes à l'aide de la décision: l'état des recherches sur le delta du fleuve Sénégal,CIRAD.27p.
- Nardeux H.(1981). Notion du tensiomètre type DTM 5000.30p.
- Olyfayo O et al.(1995). Sorghum yield, water use and canopy temperatures under different levers of irrigation.*Agricultural water management* **30**(1);77-90.
- Pène C.(1996). Utilisation du diagnostic hydrique pour le pilotage de l'irrigation de la canne à sucre en Cote d'Ivoire.*Sécheresse* **7**(4).299-306.
- Sarr B.(1995).Climat et développement des aménagements hydro-agricoles en Afrique de l'ouest: le cas du bassin du fleuve Sénégal.Thèse de doctorat.INRA;Dijon (France).359p.
- Sarr B et al.(1999). Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal *Sécheresse***38**(4).129-135.

Sepaskhah A et Ilampour S.(1996). Relationships between yield, crop water stress index (cws_i) and transpiration of cowpea (*Vigna sinensis* L). *Agronomie tropicale* 16. 269-279.