

09538

Direction des Recherches
de l'Institut National
de l'Eau et de l'Assainissement
1000 Bruxelles
1971

Analyse
de la pluviométrie et
de l'évapotranspiration
dans la zone du
Delta du fleuve Sénégal

(Saint-Louis, Niaye, Richard-Toll)

Bulletin Technique n° 5
Juin 1962
SAED - Centre de Niaye
BP. 74, Saint-Louis, Sénégal

09538

Spring 1941
Alabama - General
1941 - 1942
Alabama - General
1941 - 1942
Alabama - General
1941 - 1942

Projet Gestion de l'Eau
Coopération Scientifique KULeuven - SAED

Analyse
de la pluviométrie et
de l'évapotranspiration
dans la zone du
Delta du fleuve Sénégal

(Saint-Louis, NDiaye, Richard-Toll)

Bulletin Technique n° 5
Juin 1992.
SAED - Centre de NDiaye
BP. 74, Saint-Louis, Sénégal

Analyse de la pluviométrie et de l'évapotranspiration
dans la zone du Delta du fleuve Sénégal.
Projet Gestion de l'Eau, Bulletin Technique n° 5. 1992.
SAED - Centre de NDiaye, Saint-Louis, Sénégal.

Rédigé par :

- Dirk RAES et Boubacar SY.

En collaboration avec

- Mr. Zinga, Chef Service Régional de la Météorologie (ASECNA), Saint-Louis, et
- Mrs. Alioune SENE et Médoune BEYE, Service Recherche de la CSS (Compagnie Sucrière Sénégal) à Richard-Toll.
- Mr. Yves LIBERLOO, étudiant-stagiaire de la KULeuven.

Remerciements

La rédaction de ce bulletin nous offre l'heureuse occasion de remercier les personnes qui ne nous ont pas ménagé leur concours facilitant aussi la réalisation de cette étude : Mr. Koutoubo GASSAMA pour le soin apporté à la collecte des données météorologiques de 1983 à nos jours, Mme. Marème SARR pour la qualité de la saisie informatique de ces mêmes données. Les observateurs de l'ASECNA et de la CSS sont aussi à confondre dans le même éloge.

Nos pensées vont aussi à toute l'équipe pluridisciplinaire de la DFRD en particulier à Mr. Birane KANE pour le bel esprit de travail et pour toute la collaboration qui ne nous a jamais fait défaut. Enfin, nous remercions nos collègues-chercheurs de l'ADRAO pour leur suggestions et remarques pertinentes.

Table des matières

	page
Remerciements	1
1. Introduction	
1.1 Objectif	1
1.2 Aperçu sur le climat	1
1.3 Stations météorologiques	3
1.4 Paramètres étudiés	3
2. Précipitation	
2.1 Précipitations hivernales	5
▪ Hauteur	5
▪ Test d'homogénéité	7
▪ Variation interannuelle	7
▪ Distribution spatiale	9
▪ Analyse fréquentielle	11
2.2 Caractère des pluies	12
▪ Hauteur	12
▪ Nombre de jours de pluie	13
▪ Intervalle entre pluies	14
2.3 Précipitations décadaires	16
▪ Hauteur décadaire	16
▪ Test d'homogénéité	17
▪ Variation interannuelle	17
▪ Distribution spatiale	18
▪ Analyse fréquentielle	18
2.4 Conclusions	20
3. Evapotranspiration de référence	
3.1 Définitions	23
▪ Evapotranspiration	23
▪ Evapotranspiration potentielle	23
▪ Evapotranspiration potentielle de référence ..	23
▪ Evaporation d'une nappe d'eau libre	24
3.2 Facteurs climatiques	25
▪ Rayonnement solaire	25
▪ Température de l'air	28
▪ Humidité de l'air	29
▪ Vitesse du vent	30
3.3 Evaporation d'un bac	31
3.4 Calcul de l'ETO	32
3.5 Mesures directes	34
▪ ADRAO (NDiaye)	34
▪ Périmètre de Lampsar	36
3.6 Conclusions	37

4. Besoins en eau	
4.1 Cultures pluviales	39
4.2 Méthodologie	40
▪ Besoins nets en eau d'irrigation	40
▪ Besoins bruts en eau d'irrigation	41
▪ Besoins en période de pointe	41
4.3 Cultures maraîchères	42
▪ Besoins en eau d'irrigation	42
▪ Besoins en mois de pointe	43
4.4 Riz	45
▪ Besoins en eau d'irrigation	45
▪ Besoins en période de pointe	50
Références	53
Annexes	
A. Techniques d'analyse	56
▪ Coefficient de variation	56
▪ Rangement de Kendall	56
▪ Analyse fréquentielle	57
▪ Test d'homogénéité	58
B. Appareils de mesure	59
▪ Lysimètre	59
▪ Règle graduée	59
C. Formule de Penman	60
D. Stations météorologiques	61
▪ Saint-Louis (ASECNA)	61
▪ NDiaye (SAED)	63
▪ Richard-Toll (CSS)	65

Chapitre 1. Introduction

1.1 Objectif

Dans le cadre d'une gestion rationnelle de l'eau d'irrigation, il est nécessaire de connaître tous les paramètres intervenant dans l'établissement d'un bilan d'eau. Certains de ces paramètres résultent des actions des usagers, d'autres sont déterminés par le type de sol, la culture et la qualité de l'eau, d'autres enfin sont dictés par le climat. Ce sont ces derniers, à savoir l'apport de l'eau par les précipitations et la consommation de l'eau par évapotranspiration qui font l'objet de cette étude.

L'objectif de ce bulletin est de fournir à terme des niveaux d'évapotranspiration et de probabilité d'occurrence de pluies dans différents endroits du delta et à différentes périodes de l'année.

1.2 Aperçu sur le climat

La partie inférieure du bassin du fleuve Sénégal est soumise à un climat de type soudano-sahélien. On distingue une saison sèche (novembre - juin) et une saison des pluies (mi-juillet - mi-octobre) qui sont séparées par des périodes de transition. Plusieurs auteurs (Rochette, 1974; Rijks, 1976; Leroux, 1983) présentent une étude des divers éléments du climat.

La saison des pluies (hivernage) est caractérisée par une pluviométrie faible, dont la moyenne des quinze dernières années est de l'ordre de 200 mm/an. Les pluies sont irrégulières entre années et mal réparties dans le temps.

Le rayonnement solaire, la source d'énergie la plus importante pour l'évapotranspiration, est élevé. L'insolation varie légèrement durant l'année et la moyenne annuelle avoisine 7.5 heures/jour.

Dans le delta, l'harmattan est le vent dominant en saison sèche. Ce vent de direction NE (Tab.1) est caractérisé par une grande sécheresse liée à son parcours continental et par des amplitudes thermiques importantes. Il transporte souvent en suspension de fines particules de sable et des poussières qui constituent la "brume sèche" (Leroux, 1983). Sur une étroite bande littorale large de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres, l'alizé maritime venant du Nord (vent plus vif, frais et humide) et longeant la côte s'oppose à l'action de l'harmattan (Rochette, 1974).

En hivernage, sur toute l'étendue du delta, la direction du vent est d'une grande variabilité avec surtout un vent dominant dans le secteur NW (Tab.1).

Tableau 1.
Occurrence (en %) de la direction du vent
à NDiaye (période : 1983 - 1991).

Saison	Direction							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Saison sèche	31	42	7	0	0	1	1	18
Saison des pluies	10	5	1	8	5	17	17	37

Les températures en permanence élevées (26 à 27 °C comme moyenne annuelle) sont liées à la latitude tropicale du pays. Elles varient dans le temps avec les saisons et dans l'espace, avec la proximité ou l'éloignement de l'océan. Les moyennes mensuelles sont minimales en décembre ou janvier et maximales vers la fin de la saison sèche. Ainsi la saison sèche est divisée en deux périodes; une saison sèche froide (novembre - février) et une saison sèche chaude (mars-juin).

L'humidité relative est peu élevée. Les moyennes mensuelles fluctuent entre un maximum en saison des pluies (70 à 80 %) et un minimum en saison sèche (40 à 50%).

La vitesse des vents est assez importante surtout en saison sèche. Les vents sont plus faibles à l'intérieur que vers la côte. La valeur moyenne annuelle est de l'ordre de 3 m/sec.

1.3 Stations Météorologiques

La SAED dispose à NDiaye d'une station agro-météorologique, fonctionnelle depuis Juillet 1983. Cette station vu son age et sa position n'est pas à même de cerner totalement le climat du delta. Pour ce faire la SAED a fait appel à d'autres instituts disposant de stations dans d'autres endroits du delta : ASECNA (Saint-Louis) et CSS (Richard-Toll). Une collaboration fructueuse s'est instaurée entre ces trois instituts pour mieux estimer le niveau d'évapotranspiration et la probabilité d'occurrence de pluies.

La position géographique de ces stations permet une couverture intégrale de la zone étudiée. On distingue la station de Richard-Toll à l'entrée de la vallée (limite est), la station de Saint-Louis à la côte (limite ouest) et celle de NDiaye au milieu du delta. Une description des stations météorologiques est donnée en Annexe (Annexe D).

1.4 Paramètres étudiés

Dans ce bulletin, une étude de deux paramètres est effectuée : la précipitation et l'évapotranspiration. Leur connaissance permet de cerner le climat de la zone considérée en vue d'une bonne élaboration d'une stratégie d'irrigation.

L'étude entreprise sur une période de neuf et de seize ans porte sur la régularité de répartition de la pluviométrie à trois endroits du delta du fleuve Sénégal (Saint-Louis, NDiaye et Richard-Toll). Elle permet de définir les quantités des pluies tombées à ces différents endroits avec indication des niveaux de probabilité de leur occurrence. Les variations inter-annuelles, les répartitions annuelles des précipitations (nombre de jours de pluie, répartition dans le temps) sont aussi étudiées pour voir leur incidence d'un point de vue agricole. L'analyse de l'intensité des pluies, habituellement faite pour les besoins de l'hydrologie ou du génie civil, n'est pas effectuée.

L'autre paramètre agro-météorologique étudié est l'évapotranspiration potentielle de référence (ET_o). Elle est calculée à l'aide de la formule de Penman (approche Doorenbos et Pruitt, 1977). Cette formule intègre l'effet

des paramètres suivants : la radiation solaire, la température, l'humidité et le vent. Ces paramètres sont analysés individuellement et leurs valeurs aux différents endroits sont présentées.

Les niveaux d'ETO calculés sur une période de dix ans et à des endroits différents sont comparés avec les évaporations d'un bac classe A, dont les relevés ont été effectués au niveau de ces mêmes endroits. En outre les différents lysimètres installés dans la zone et des mesures effectuées dans des rizières permettent de comparer l'évapotranspiration calculée avec l'évapotranspiration mesurée.

De l'analyse des précipitations et de l'évapotranspiration il a été tenté de voir s'il était possible sans irrigations d'appoints de boucler des cycles de cultures strictement pluviales. Avec la connaissance de ces mêmes paramètres (pluie et évapotranspiration), une estimation des besoins en eau d'irrigation en période de pointe et pour toute la saison a été effectuée pour des cultures maraîchères et pour la riziculture. Ces estimations tiennent compte aussi d'autres paramètres non moins importants tels que les facteurs liés à la culture (date de semis, longueur du cycle, coefficients culturaux, etc.) et ceux liés au sol (texture, percolation, salinité, etc.). Les valeurs de ces derniers paramètres proviennent d'expérimentations et d'observations faites dans la zone du delta par plusieurs équipes de chercheurs.

Chapitre 2.

Précipitation

L'analyse des précipitations a concerné la période de 1976 à 1991, soit une série de 16 ans. Les données de NDiaye n'étant disponibles qu'à partir de 1983, une autre série de 9 ans commençant à partir de cette année a été prise comme référence. En annexe les techniques d'analyse utilisées sont présentées (Annexe A).

2.1

Précipitations hivernales

Dans cette étude, uniquement la précipitation hivernale est analysée. A part quelques faibles pluies isolées, la précipitation est limitée à cette période dans la zone considérée.

Hauteur

Dans le Tableau 2, la moyenne des précipitations hivernales pour les trois stations et les deux séries étudiées est représentée.

Tableau 2.
Moyenne des précipitations hivernales (en mm).

Stations	Série de 16 ans (1976 - 1991)	Série de 9 ans (1983 - 1991)
Saint-Louis	212	209
NDiaye	-	206
Richard-Toll	198	140

Les moyennes des deux séries de la station de Saint-Louis sont très semblables. Elles ne diffèrent non plus de la moyenne de 204 mm citée par l'OMVS (1986) pour la période

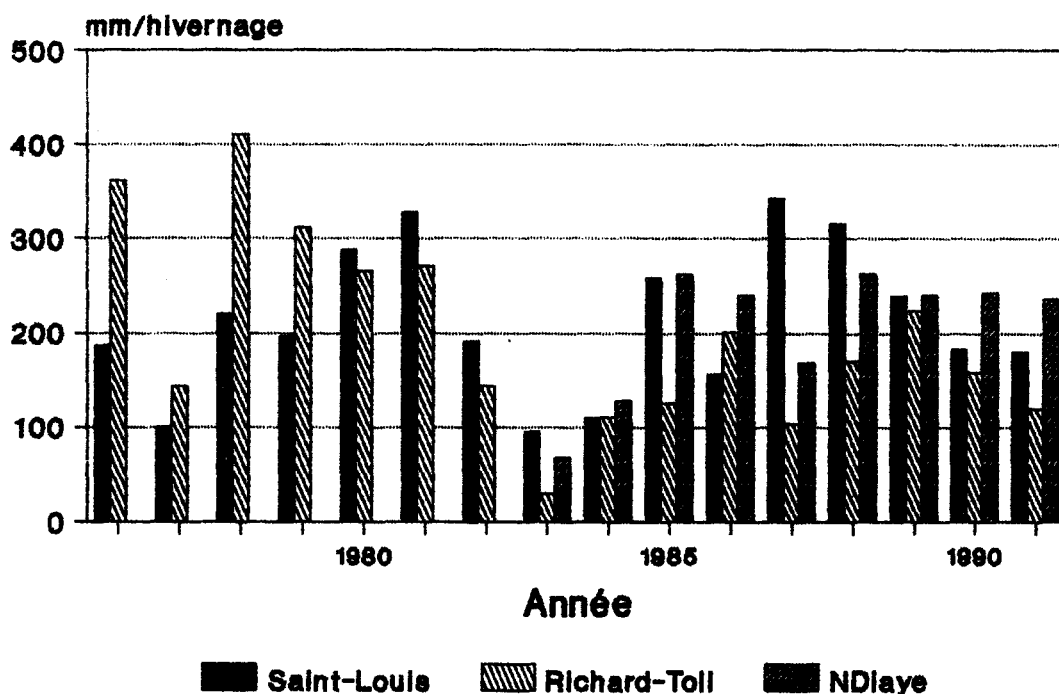


Figure 1.
Hauteurs des précipitations hivernales.

de 1970 à 1984. Ceci indique que depuis 1970 (l'année depuis laquelle la sécheresse sévit dans la vallée du fleuve) à nos jours, le niveau des précipitations s'est stabilisé à Saint-Louis. La moyenne pour cette période est 208 mm, soit la moitié du niveau observé avant la sécheresse (392 mm pour la période de 1920 à 1970).

Par contre les moyennes hivernales de Richard-Toll pour les deux séries sont nettement dissemblables. Cette situation indique une non-homogénéité dans la série de 16 ans. Ceci nécessite le recours à un test d'homogénéité avant toute analyse statistique sur les séries.

A NDiaye, la moyenne de la série de 9 ans des précipitations hivernales est très semblable aux moyennes des différentes séries de Saint-Louis.

Un histogramme donnant les précipitations hivernales dans le temps et pour les trois stations est représenté dans la Figure 1. Cette figure fait ressortir non seulement la variation des pluies dans le temps, mais aussi la variation d'une station à l'autre.

Test d'homogénéité

Le test d'homogénéité est basé sur les déviations cumulatives des données d'une série à partir de la moyenne de cette série (Annexe A). Si la série est homogène, les déviations fluctueront autour de zéro, parce qu'une déviation systématique des valeurs par rapport à leur moyenne ne se produira pas.

Dans la Figure 2 les déviations cumulatives de la série de 16 ans par rapport à la moyenne des précipitations hivernales de Saint-Louis et Richard-Toll sont dessinées. Sur la même figure sont indiquées les lignes donnant la probabilité de rejet de l'homogénéité de ces séries.

La figure montre que la série de 16 ans des précipitations hivernales de Saint-Louis est homogène, par contre sur cette même période l'homogénéité de la série de Richard-Toll est rejetée avec 99 %. L'année de changement (1981) dans la série des observations de Richard-Toll est indiquée à la figure. Car cette année correspond avec le sommet de la courbe. L'année est une année charnière à partir de laquelle la moyenne des précipitations annuelles est moins élevée qu'auparavant.

Le test d'homogénéité montre nettement que ces dix dernières années, la sécheresse est devenue plus sévère à Richard-Toll. Par contre, cette détérioration n'est pas perçue à Saint-Louis.

Le même test d'homogénéité a montré que la série de 9 ans (1983 à 1991) des précipitations hivernales peut être considérée comme homogène et ceci pour les trois stations.

En conclusion de ce test d'homogénéité, seule la série de 16 ans de Saint-Louis est retenue pour une analyse fréquentielle. Pour des besoins de comparaison, la série de 9 ans est retenue pour les trois stations tout en sachant que le nombre d'années est peu élevé mais que la série des moyennes hivernales est homogène dans cette période.

Variation interannuelle

Afin de cerner l'ampleur des variations interannuelles, le coefficient de variation et l'intervalle de variation des séries de précipitations hivernales sont représentés dans le Tableau 3.

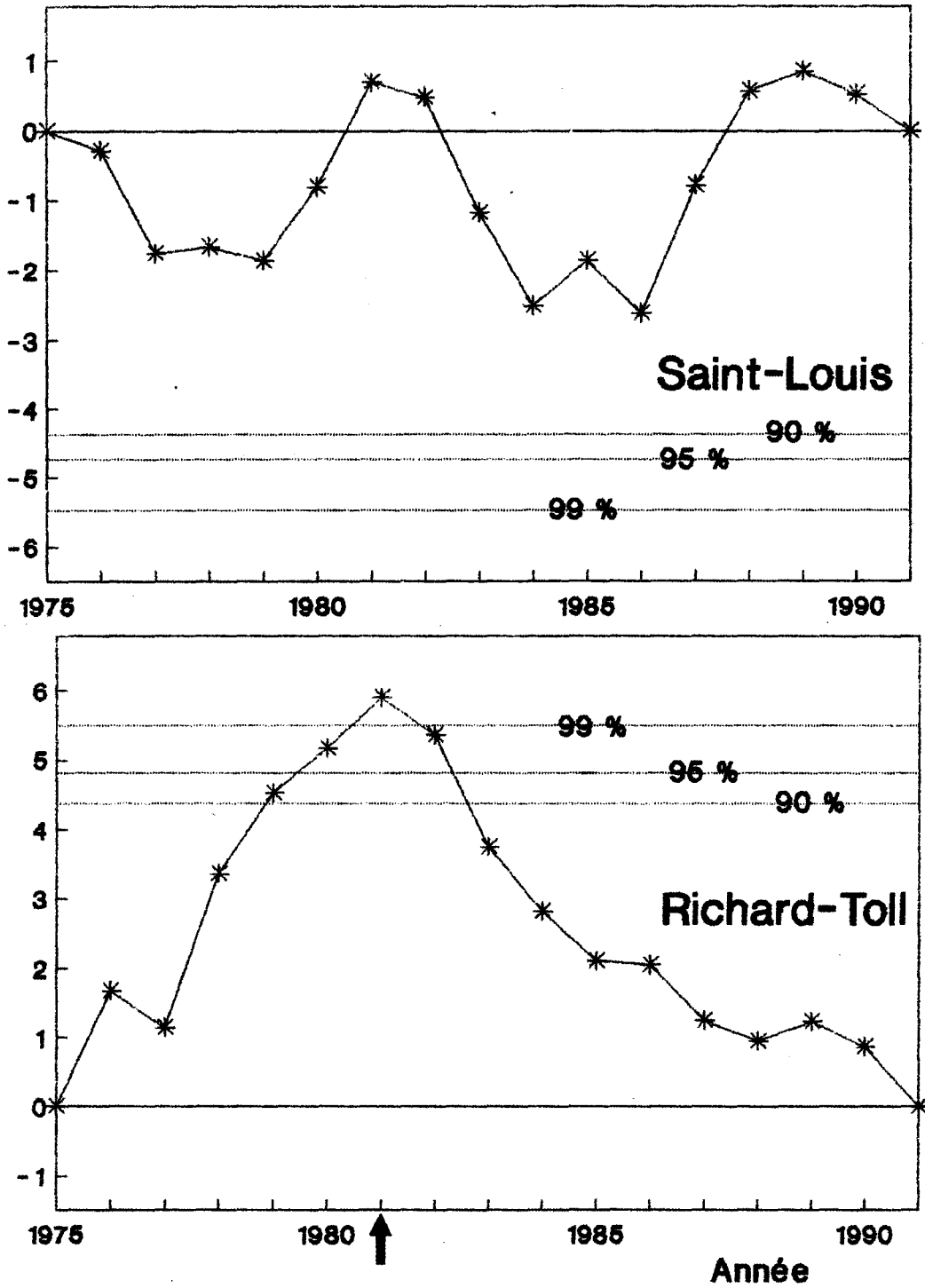


Figure 2.
Déviations cumulatives des données de la série des précipitations hivernales par rapport à leur moyenne, avec indication des lignes de rejet de l'homogénéité.

Tableau 3.
Le coefficient de variation (CV) et l'intervalle
de variation des séries des précipitations hivernales.

Stations	Série de 16 ans (1976 - 1991)		Série de 9 ans (1983 - 1991)	
	CV (%)	intervalle (mm)	CV (%)	intervalle (mm)
Saint-Louis	36	248	39	248
NDiaye	-	-	32	195
Richard-Toll	(51)	(391)	40	193

L'intervalle de variation est la différence entre le maximum et le minimum de la série des précipitations hivernales. Le coefficient de variation (CV) donne une mesure de la variabilité dans les données, exprimée en pourcentage de la valeur moyenne. En général, le coefficient de variation est inversement proportionnel à la hauteur des précipitations. Jones (1981) donne un ordre de grandeur de 40 pour cent pour une moyenne des précipitations annuelles de 200 mm. Cette valeur est conforme à nos observations.

Les valeurs de l'intervalle et du CV laissent entendre que les précipitations sont assez bien variables d'une année à l'autre et ceci pour les trois stations. Le niveau de cette variation est quant-même tout à fait dans les normes.

Distribution spatiale

Une comparaison entre les données provenant de deux stations peut être faite par la méthode de rangement de Kendall (Annexe A). Les résultats du test, par lequel sont comparés les totaux des précipitations hivernales de 1983 à 1991 de deux stations voisines, sont représentés dans le Tableau 4.

La valeur de Kendall qui peut varier dans l'intervalle de + 1 (concordance complète) à - 1 (discordance complète), indique plutôt une faible corrélation entre les données de Saint-Louis et NDiaye, et de NDiaye et Richard-Toll. La variation est quasiment absente entre Saint-Louis et Richard-Toll.

Tableau 4.
Corrélation entre les précipitations hivernales
de deux stations voisines (période : 1983-1991).

Stations comparés	valeur T de Kendall	
Saint-Louis - NDiaye	+ 0.56	(+ 0.83 [*])
NDiaye - Richard-Toll	+ 0.50	
Saint-Louis - Richard-Toll	+ 0.17	(+ 0.39 [*])

^{*} sans les précipitations de la lière Déc. Septembre 1987

La faible corrélation entre Saint-Louis et NDiaye est pourtant la suite de l'occurrence ou non d'une seule pluie de 146 mm. Cette averse du 4 Septembre 1987 est uniquement observée à Saint-Louis. Par conséquent, la précipitation de la première décade de Septembre de cette année monte jusqu'à 162.5 mm à Saint-Louis tandis qu'elle reste à 6.5 et 7.6 mm respectivement à NDiaye et Richard-Toll. Si on ne tient pas compte de la précipitation de cette décade, une bonne corrélation ($T = +0.83$) est trouvée entre les données de Saint-Louis et NDiaye (Figure 3). La corrélation entre Saint-Louis et Richard-Toll reste très faible.

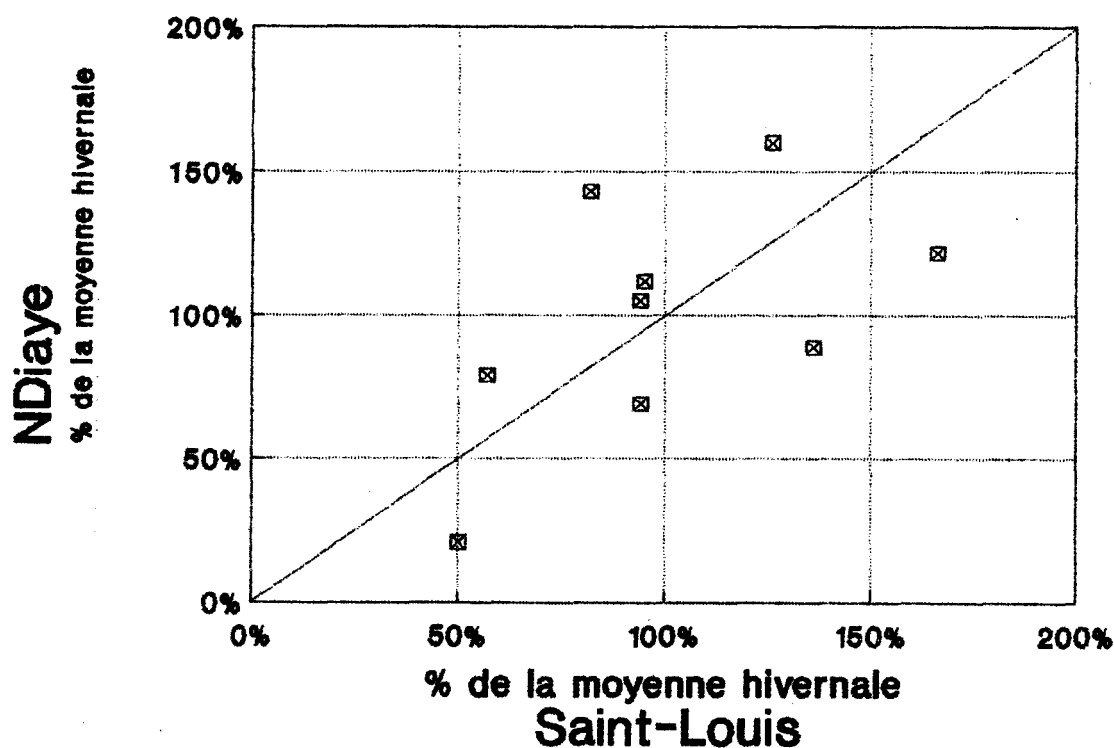


Figure 3.
Corrélation entre les précipitations hivernales
de Saint-Louis et NDiaye (période : 1983-1991).

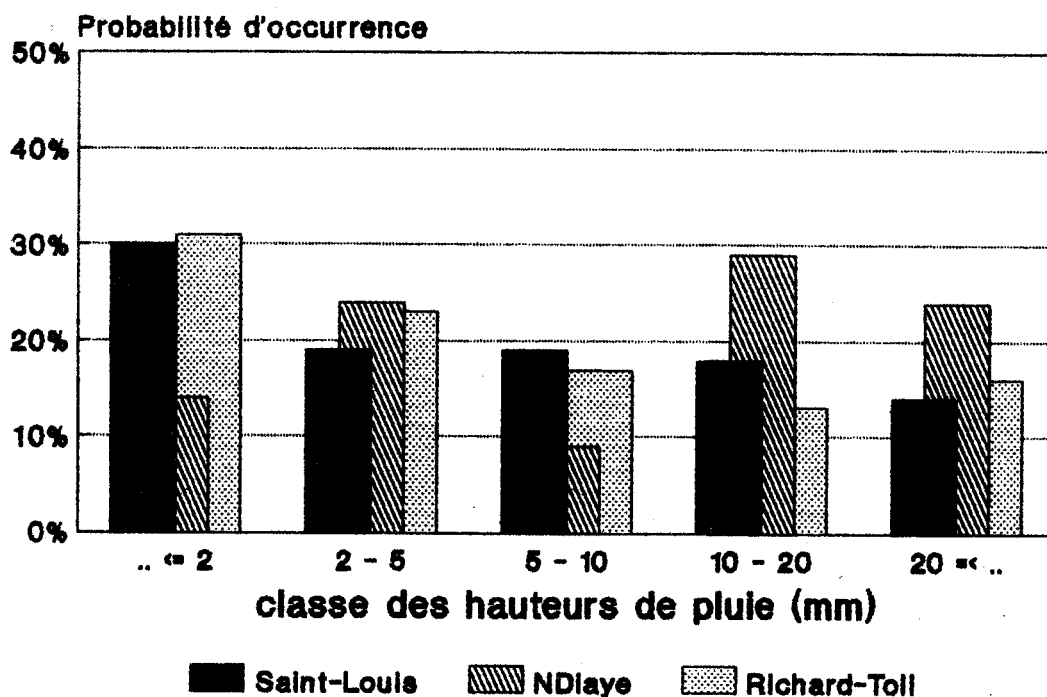


Figure 5.
Probabilité d'occurrence d'une hauteur de pluie
(période : 1983-1991).

La Figure 5 donne la probabilité d'occurrence de chaque classe pendant l'hivernage. Une différence dans la répartition des hauteurs des pluies d'un mois à l'autre n'est pas trouvée. De ce classement, il ressort que :

- en gros, une pluie sur deux est inférieure à 5 mm (donc des pluies de peu d'importance pour l'agriculture),
- les pluies très importantes, supérieures ou égales à 20 mm, représentent environ 15 à 20 pour cent des pluies.

Nombre de jours de pluie

En négligeant les pluies très faibles (inférieures à 2mm), il pleut en moyenne quatorze fois à Saint-Louis et treize fois à NDiaye par hivernage. Ce chiffre n'est que de dix à Richard-Toll.

La Figure 6 donne la moyenne décadaire des nombres de jours de pluie (≥ 2 mm) en fonction du temps. Le graphique montre clairement que l'hivernage ne s'installe réellement qu'à partir de la deuxième décade de Juillet (à Richard-Toll ce n'est qu'au début Août) et s'arrête déjà

Analyse fréquentielle

Suite à la variabilité des précipitations d'une année à l'autre, la ressource annuelle en eau estimée à partir de la hauteur moyenne des précipitations n'a pas beaucoup d'intérêt. Il faut pour les prévisions, se fonder sur la probabilité ou la fréquence des précipitations. En supposant qu'aucun changement n'intervienne dans les facteurs qui causent les précipitations, et en se basant sur les relevés disponibles (donc du passé), on établit des prévisions de probabilité des précipitations dans le futur ou de la hauteur de pluie à laquelle on peut s'attendre (Doorenbos, 1976).

Les résultats de l'analyse fréquentielle sont reportés dans la Figure 4. L'analyse montre que les précipitations hivernales ont sensiblement la même probabilité de dépasser une certaine hauteur à NDiaye qu'à Saint-Louis. Par contre, les hauteurs auxquelles on peut s'attendre à Richard-Toll sont inférieures de 50 à 100 mm à celles de Saint-Louis et de NDiaye.

Les fréquences sont exprimées de manière telle qu'elles indiquent la probabilité en nombre d'années sur dix de dépasser un certain niveau de précipitations hivernales. Par exemple, cinq ans sur dix on peut s'attendre à Saint-Louis à une précipitation hivernale d'au moins 200 mm,

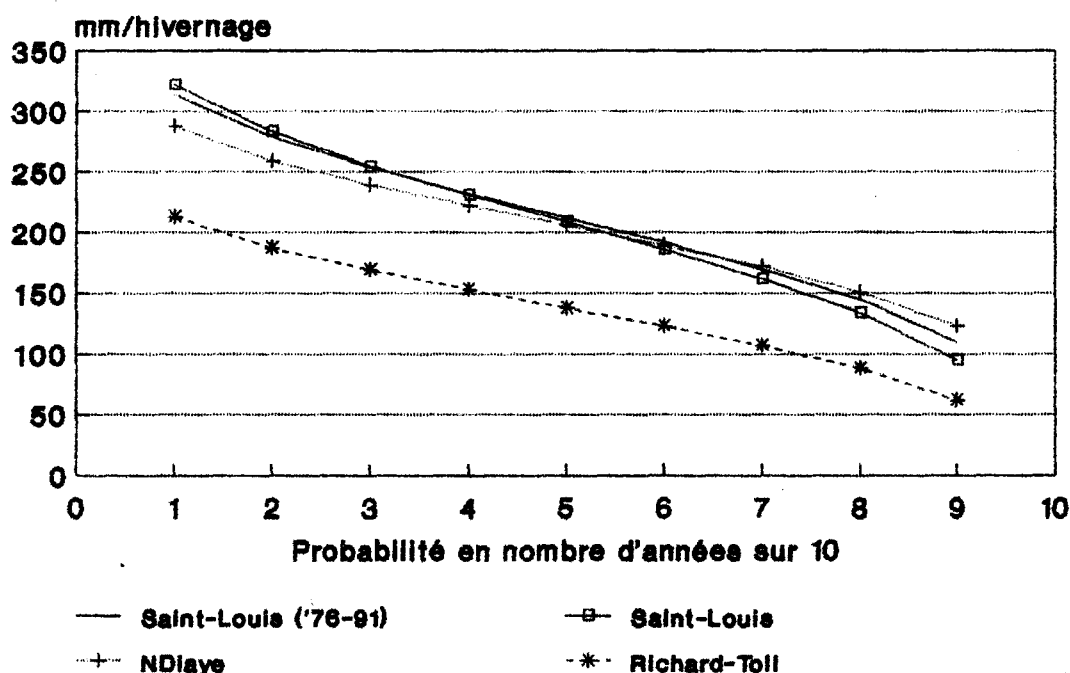


Figure 4.
 Probabilité de dépassement d'une certaine hauteur des précipitations hivernales (période : 1983-1991).

neuf ans sur dix la précipitation est égale ou supérieure à 150 mm et un niveau d'au moins de 275 mm n'a qu'une occurrence de 2 ans sur 10 soit 20 pour cent.

C'est avec de longues séries de données que l'on obtient les meilleurs résultats. Avec les données portant sur les 16 dernières années, on peut se faire une bonne idée de la précipitation à Saint-Louis. Vu que les moyennes de précipitations hivernales de Saint-Louis et de NDiaye se ressemblent fortement, et que le test de la distribution spatiale indique une assez bonne corrélation entre les données de ces deux stations, les résultats de l'analyse de la longue série de Saint-Louis peuvent aussi donner des indications sur la précipitation à laquelle on peut s'attendre à NDiaye.

En considérant la non-homogénéité de la série de 16 ans, on ne dispose que d'une série de 9 ans à Richard-Toll, l'analyse d'une telle courte série ne peut donner qu'une approximation.

La valeur des précipitations hivernales de l'ordre de 275 mm, aussi élevée soit-elle pour la zone, ne signifie pas nécessairement que l'hivernage s'est bien déroulé. Il faut en plus de cela connaître le nombre de jours de pluie, l'intervalle entre les pluies et la répartition dans le temps des pluies.

2.2 Caractère des pluies

Dans la région les précipitations sont souvent orageuses et leur caractère discontinu dans l'espace comme dans le temps entraîne une insécurité climatique.

Hauteur

L'étude des hauteurs des précipitations est effectuée en rangeant les pluies par classe. Dans cette étude, cinq classes sont distinguées, à savoir :

- pluies inférieures à 2 mm (pluies négligeables),
- pluies de 2 à 5 mm (pluies faibles),
- pluies de 5 à 10 mm,
- pluies de 10 à 20 mm (pluies importantes),
- pluies supérieures ou égales à 20 mm (pluies très importantes).

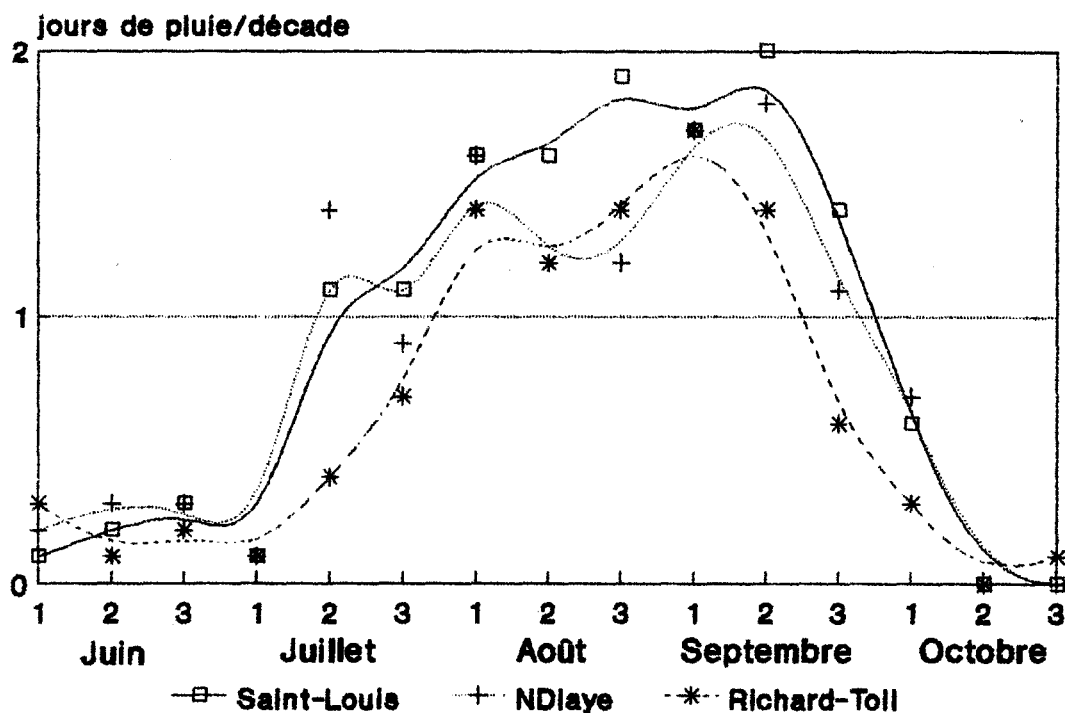


Figure 6.

Moyenne décadaire des nombres de jours ayant une pluie égale ou supérieure à 2 mm (période : 1983-1991).

en fin Septembre. Pendant l'hivernage réel, les précipitations ne sont pas nombreuses.

Intervalle entre pluies

Dans le Tableau 5 il est représenté la probabilité d'avoir au moins une pluie, égale ou supérieure à 2mm, dans un espace de temps donné et ceci pour chaque mois de l'hivernage. Les probabilités d'occurrence pour Saint-Louis sont représentées dans la Figure 7.

De cette étude il ressort que :

- il pleut plus régulièrement au début de l'hivernage (Juillet) à Saint-Louis qu'à NDiaye et Richard-Toll,
- les pluies régulières avec un intervalle de 1 à 3 jours n'ont qu'une probabilité d'occurrence de 40 à 50 % et ceci uniquement en Août et Septembre,
- la probabilité d'avoir au moins une pluie par semaine est environ 60 % (un peu moins au début et un peu plus à la fin de l'hivernage).

Tableau 5.
 Probabilité d'avoir au moins une pluie égale ou supérieure à 2mm dans un espace de temps donné (période : 1983 à 1991).

Espace de temps	Station	Probabilité (%)		
		Juillet	Août	Septembre
1 à 3 jours	Saint-Louis	33	53	42
	NDiaye	22	46	47
	Richard-Toll	19	44	40
1 semaine	Saint-Louis	45	71	68
	NDiaye	52	60	71
	Richard-Toll	38	59	67
2 semaines	Saint-Louis	72	86	98
	NDiaye	70	86	92
	Richard-Toll	69	85	90

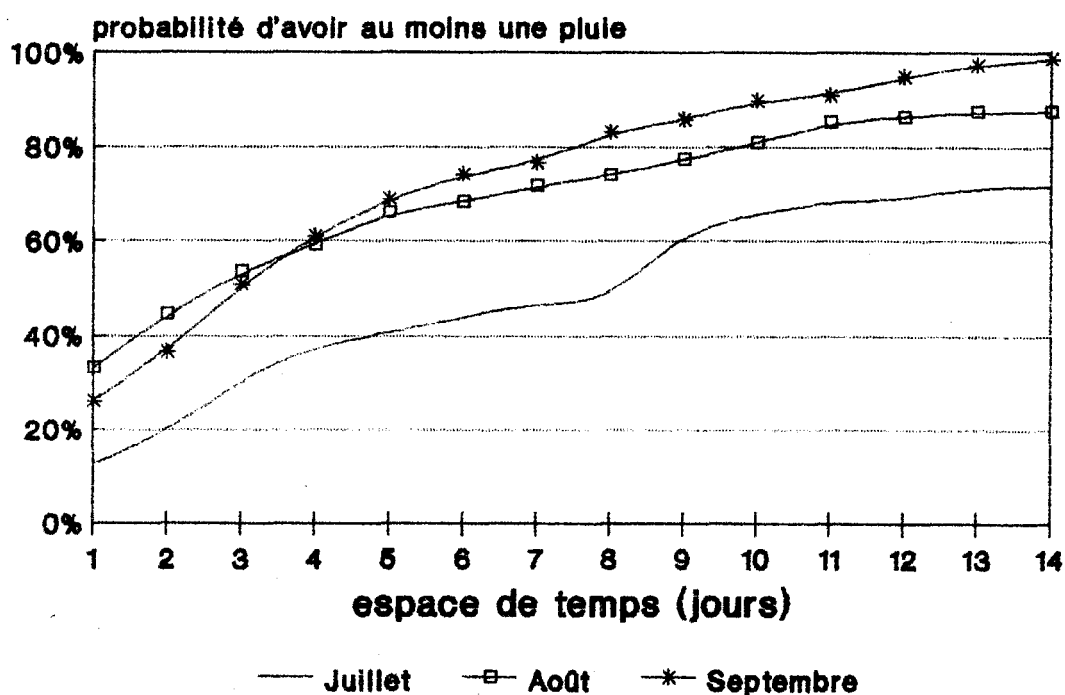


Figure 7.
 Probabilité d'avoir au moins une pluie, égale ou supérieure à 2mm, dans une espace de temps à Saint-Louis (période : 1976-1991).

- la probabilité d'avoir un intervalle supérieur à deux semaines entre deux pluies n'est pas négligeable (environ 30 % en Juillet, 15 % en Août et 10 % en Septembre).

Ceci n'est pas sans poser de grands problèmes pour des cultures pluviales dans cette zone de forte évapotranspiration. Dans ces conditions les rendements escomptés avec ces cultures ne peuvent qu'être très faibles.

2.3

Précipitations décadaires

Le total hivernal des précipitations n'est pas un critère suffisant pour déterminer un bon ou mauvais hivernage. Il faut en plus connaître la répartition des pluies durant l'hivernage. Ceci est étudié par l'analyse des précipitations décadaires.

Hauteur décadaire

Dans la Figure 8 les moyennes des hauteurs de pluies décadaires sont représentées pour les trois stations. Ces valeurs sont dans l'ensemble assez faibles et seules les valeurs décadaires des mois d'Août et Septembre et à la fin de mois de Juillet sont relativement élevées. Cette période correspond effectivement avec l'installation de l'hivernage.

Dans cette figure on remarque qu'à Saint-Louis les pluies augmentent dans le temps pour arriver à un maximum à la première décade de Septembre, pour ensuite décroître. Tandis qu'à Richard-Toll et NDiaye, on enregistre deux maximum situés au début (première décade d'Août) et à la fin (deuxième décade de Septembre) de la période effective de l'hivernage, avec un creux entre les deux.

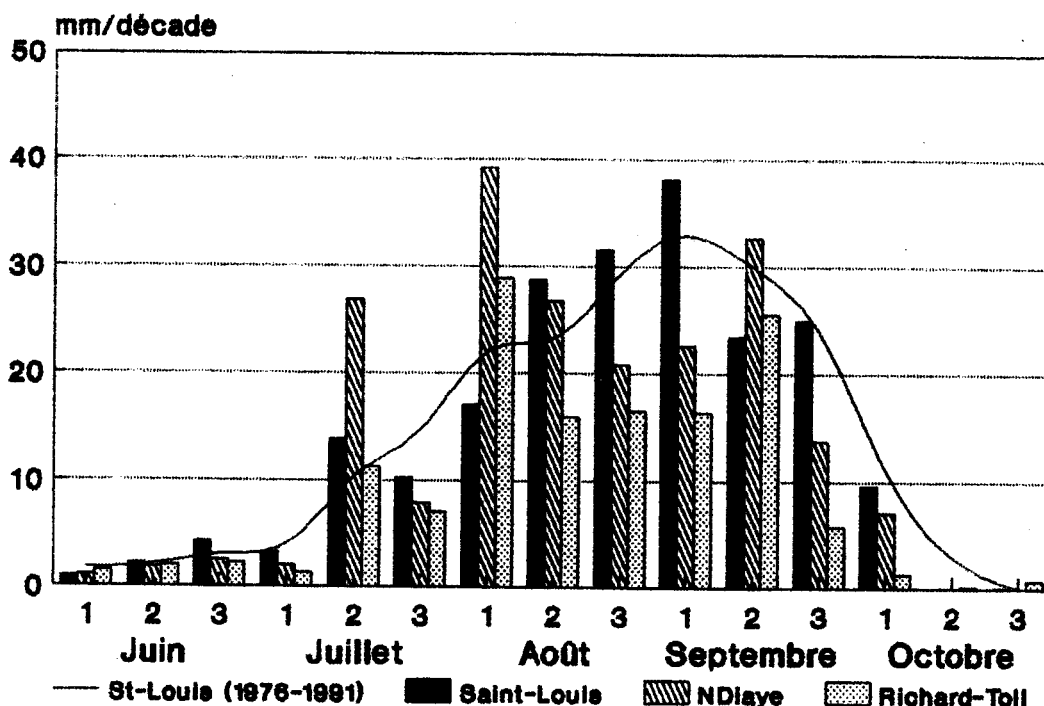


Figure 8.
Moyenne des précipitations décadaires
(période : 1983-1991).

Test d'homogénéité

Du test d'homogénéité effectué sur les séries des précipitations de chaque décade, il ressort que :

- les séries de 9 ans (1983 à 1991), peuvent être considérées comme homogènes au niveau des trois stations,
- les séries décadaires de 16 ans (1976 à 1991) sont homogènes à Saint-Louis, mais ne peuvent pas toutes être considérées tout à fait comme homogènes à Richard-Toll. Pour ces raisons, une analyse fréquentielle sur la série de 16 ans n'est effectuée qu'à Saint-Louis.

Variation interannuelle

Dans la Figure 9 les coefficients de variation de chaque décade et station sont tracés. Ce coefficient exprime la diversité des hauteurs de pluie d'une année à l'autre et ceci pour chaque décade. Ils sont très élevés au début et

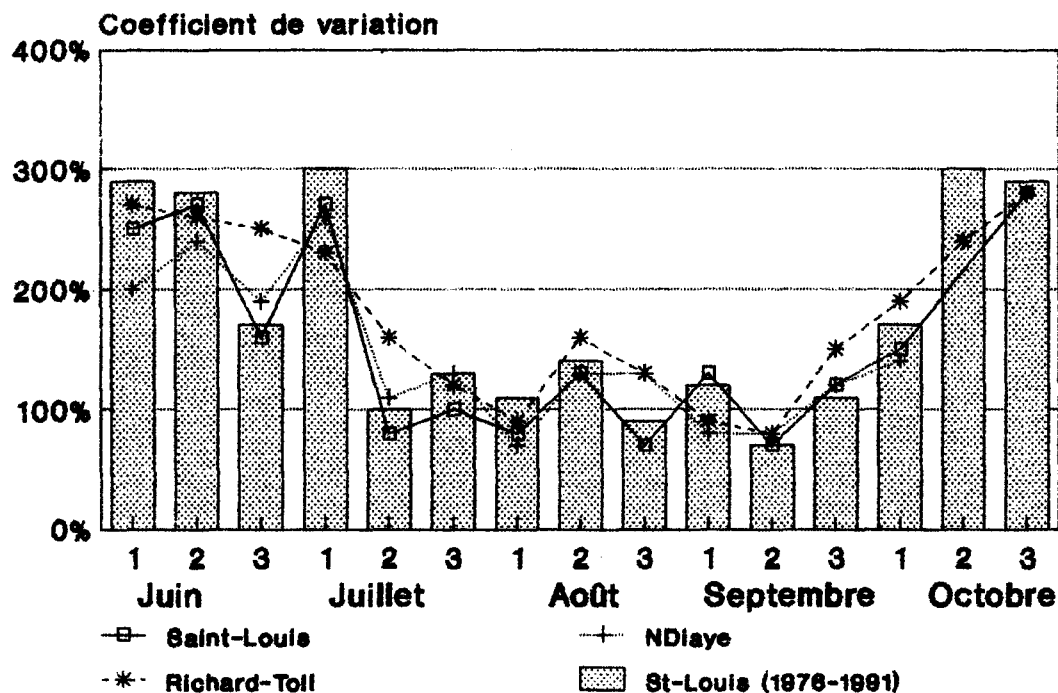


Figure 9.
Coefficient de variation des séries
de précipitations décadaires (période : 1983-1991).

à la fin de l'hivernage. Même en période d'installation effective des pluies, ils sont encore de 100 pour cent.

Distribution spatiale

Outre la variabilité interannuelle de pluies décadaires, on note aussi une grande variation entre les précipitations d'une station à l'autre. Une corrélation entre les données de deux stations ne se manifeste pas. L'absence d'une corrélation peut être due à la courte durée de la période d'observations.

Analyse fréquentielle

Les résultats de l'analyse fréquentielle des données des séries décadaires de 16 ans (1976-1991) de Saint-Louis sont reportés dans le Tableau 6. Elle indique les hauteurs de précipitations décadaires qui seront

Tableau 6.
 Hauteurs des précipitations décadaires qui seront
 dépassées à Saint-Louis à des probabilités différentes
 (période : 1976-1991).

Mois	Décade	Probabilité en nombre d'années sur 10								
		9	8	7	6	5	4	3	2	1
Juin	1	.	.	.	.	.	.	.	.	*
	2	.	.	.	.	.	.	.	.	*
	3	.	.	.	.	.	.	4	10	15
Juillet	1	.	.	.	.	.	.	.	2	5
	2	.	.	.	1	10	15	19	23	29
	3	.	.	.	3	6	10	14	23	40
Août	1	2	4	7	10	14	18	26	37	63
	2	.	.	.	.	7	14	23	36	64
	3	.	.	6	21	30	38	46	55	66
Septembre	1	.	.	4	10	16	24	37	58	105
	2	4	13	19	25	30	35	40	47	56
	3	.	2	5	9	13	19	27	41	71
Octobre	1	.	.	.	.	.	1	8	18	34
	2	.	.	.	.	.	.	.	*	*
	3	.	.	.	.	.	.	.	.	*

* = la hauteur des pluies non calculée à cause d'insuffisance des données.

dépassées pour un niveau donné de probabilité. Cette probabilité est exprimée en nombre d'années sur 10 (ce qui correspond avec les pourcentages). Par exemple, dans la deuxième décade du mois de Septembre on a la possibilité d'avoir une précipitation neuf ans sur 10 (probabilité de 90 %). Cette précipitation sera égale ou supérieure à 4 mm. La probabilité d'avoir une pluie d'au moins 40 mm est de 30 % (3 ans sur 10) pour cette même décade. Par contre, la probabilité d'avoir de la précipitation durant les première et deuxième décade de Juin n'est que d'une année sur 10 (donc 10 %). Pour ces décades, la hauteur des pluies ne pouvait pas être calculée à cause d'insuffisance des données dans ces séries.

Vu la forte variation de la précipitation d'une année à l'autre, et la courte durée de la période d'observation, les résultats de l'analyse fréquentielle sur les données des séries de 9 ans (1983 à 1991) ne peuvent donner que des approximations.

Dans la Figure 10 les résultats de l'analyse fréquentielle sur les séries de 9 ans (1983-1991) sont résumés. Dans chaque figure sont représentées trois courbes correspondant à des hauteurs de précipitations décadaires auxquelles on peut s'attendre avec trois différentes probabilités :

- La courbe correspondant à une occurrence de 5 ans sur 10, est nommée «Décade Normale»,
- La courbe nommée «Décade Humide», représente les hauteurs de précipitations qu'on ne dépasse que 2 ans sur 10, et
- La courbe nommée «Décade Sèche», représente les hauteurs de précipitations qu'on n'atteint pas 2 ans sur 10.

L'analyse fréquentielle étant effectuée décade par décade, il est évident qu'une saison sèche n'est pas composée d'une succession de décades sèches, ni une saison humide, de décades humides.

2.4 Conclusions

L'analyse de la précipitation de Saint-Louis a été effectuée sur la base d'une série de relevés de 16 ans. Une telle série est à même de donner de bonnes

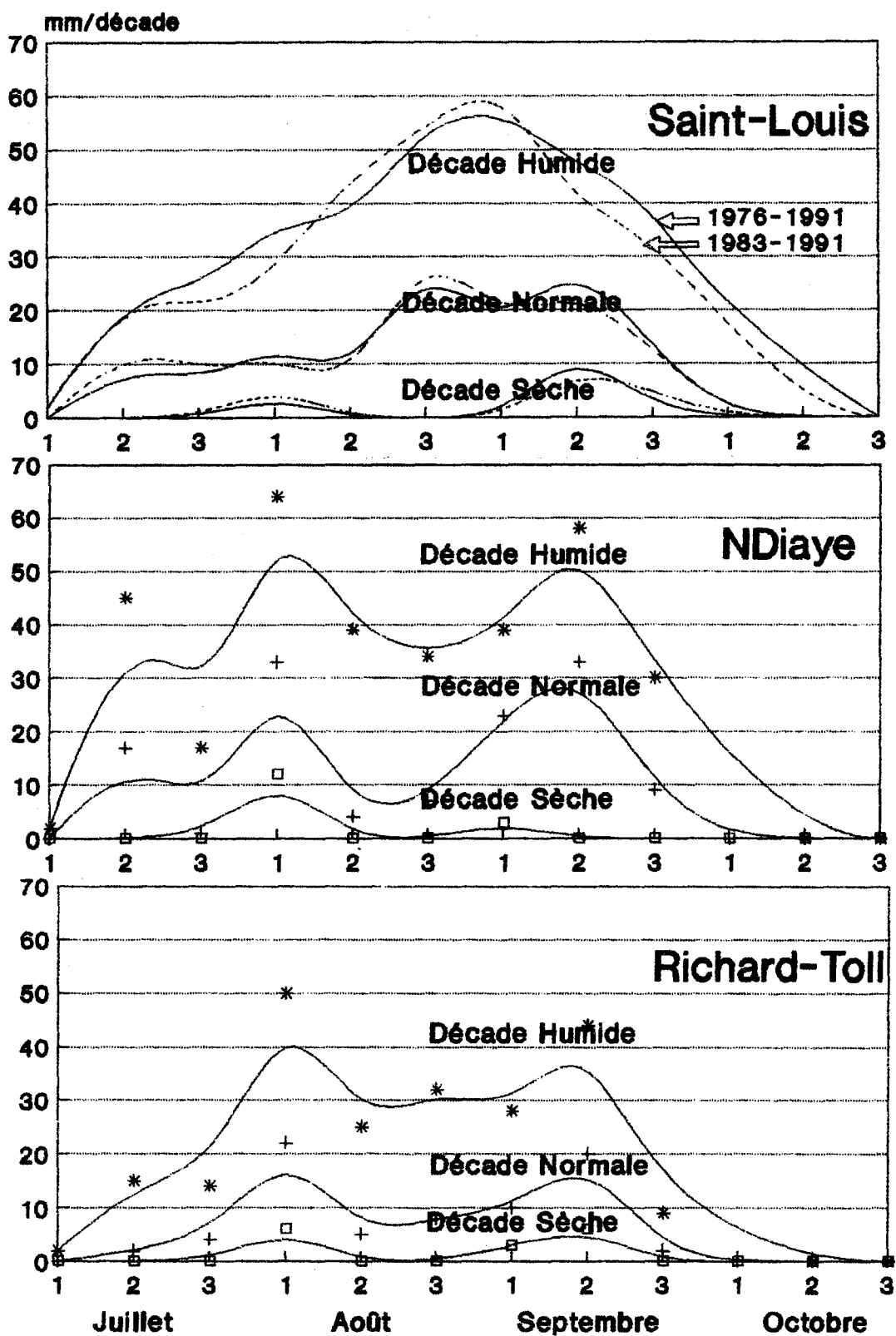


Figure 10.

Hauteurs de précipitations décadaires escomptées avec trois différentes hypothèses à Saint-Louis, NDiaye et Richard-Toll (période : 1983 - 1991).

estimations sur les précipitations à venir, pourvu qu'un changement brutal de climat ne survienne.

La longue série de Richard-Toll n'étant pas homogène, l'analyse a été effectuée sur la série d'observations de 9 ans. Une telle courte série ne peut donner que des approximations. Mais par contre elle permet une comparaison avec NDiaye où les observations ne sont disponibles que sur une période de 9 ans.

L'analyse montre que les précipitations annuelles tant à Saint-Louis, NDiaye et Richard-Toll sont faibles et irrégulières. Une bonne corrélation entre les totaux annuels des précipitations de Saint-Louis et NDiaye est notée sur les 9 dernières années. L'analyse fréquentielle, dont les résultats sont reportés dans la Figure 4, signale qu'au cours de ces 9 dernières années les hauteurs auxquelles on peut s'attendre à Richard-Toll sont inférieures de 50 à 100 mm à celles de Saint-Louis et NDiaye.

Dans la région les précipitations sont souvent orageuses et leur caractère discontinu dans l'espace comme dans le temps entraîne une insécurité climatique. Ces 9 dernières années, il pleut en moyenne 14 fois à Saint-Louis, 13 fois à NDiaye et 10 fois à Richard-Toll.

Les résultats de l'analyse fréquentielle des précipitations décadaires sont résumés dans la Figure 10. De cette figure il ressort que les précipitations ne commencent à s'installer réellement que lors de la deuxième décade de Juillet et se terminent en mi-October. Avec la forte variation de la précipitation d'une année à l'autre, et la courte durée de la période d'observation, les résultats ne peuvent qu'être utilisés avec circonspection.

Cependant, la Figure 10 peut être utilisée pour donner des indications sur la hauteur des précipitations décadaires, à laquelle l'on peut s'attendre si la décade est humide, normale ou sèche. Cette analyse est utile pour le design des structures de génie civil et pour la planification des activités agricoles (date de semis, l'accessibilité au champ des engins, calendrier cultural, date optimale des activités de récolte, etc.).

Chapitre 3.

Evapotranspiration de référence (ETo)

3.1 Définitions

Evapotranspiration

L'évapotranspiration est la quantité d'eau consommée dans le temps d'un sol couvert de végétation. Elle comprend d'une part l'eau transpirée par la couverture végétale, d'autre part l'évaporation directe à partir du sol. En exprimant la quantité d'eau consommée en millimètre (1 mm = 1 litre/m²) et le pas de temps en jour, l'unité de l'évapotranspiration devient mm/jour.

Le taux d'évapotranspiration est déterminé par des facteurs climatiques, la quantité d'eau disponible dans le sol, et des facteurs culturaux (type de culture, stade de développement, comportement de la culture).

Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle est l'évapotranspiration d'un couvert végétal bien approvisionné en eau et soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique. Le taux d'évapotranspiration potentielle est déterminé par des facteurs climatiques, le type de culture et son stade de développement.

Evapotranspiration potentielle de référence (ETo)

L'évapotranspiration potentielle de référence, nommée aussi brièvement l'évapotranspiration de référence (ETo), est comme son nom indique, l'évapotranspiration poten-

tielle d'un couvert végétal de référence. Comme référence on utilise dans ce bulletin un couvert gazonné vert de 8 à 15 cm de hauteur, poussant activement, ombrageant complètement le sol et ne manquant pas d'eau. C'est du reste la référence choisie par la FAO (Doorenbos et Pruitt, 1977).

Vu que le couvert végétal de référence est bien défini, le taux d'ET_o n'est déterminé que par des facteurs climatiques. En utilisant la même référence universellement, l'ET_o devient un index climatique. Il indique la capacité 'évapotranspirante' de l'air dans des conditions climatiques données.

Diverses méthodes permettent de calculer ET_o. La méthode de Penman incorpore dans une équation les principaux facteurs climatiques influençant le taux d'évapotranspiration, à savoir le rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité de l'air, et la vitesse du vent.

En utilisant un coefficient cultural (kc), l'évapotranspiration potentielle d'une culture autre que la culture de référence peut être définie par rapport à l'ET_o :

$$ET_{\text{culture}} = kc \text{ ET}_o$$

La valeur de kc varie avec la culture et son stade de développement. En déterminant donc l'ET_o, l'évapotranspiration des cultures et ses besoins en eau peuvent être calculés.

Evaporation d'une nappe d'eau libre

L'évaporation d'une nappe d'eau libre peut être considérée, ainsi que l'ET_o, comme un index climatique. Cet index exprime le pouvoir évaporant de l'air dans des conditions climatiques données.

Malgré la différence entre les surfaces de référence, les facteurs climatiques influençant le taux d'évaporation sont identiques à ceux influençant l'évapotranspiration. Il existe donc un rapport très net entre les deux index climatiques. Tous les deux peuvent être utilisés pour estimer les besoins en eau des cultures. Les taux d'évaporation ne seront bien-sûr pas identiques à ceux de l'ET_o, vu que leurs surfaces évapo(transpi)rantes sont dissemblables.

Des bacs d'évaporation et des évaporomètres sont utilisés comme appareils de mesure du taux d'évaporation :

▪ Bac d'évaporation classe A (Ebac)

On se sert souvent de bacs d'eau libre pour mesurer l'évaporation. Parce que le taux d'évaporation est fortement influencé par les dimensions du bac et son emplacement, il est capital qu'ils soient bien décrits. A Saint-Louis, Ndiaye et à Richard-Toll on trouve des bacs d'évaporation du type classe A.

La connaissance de l'évaporation bac, permet de calculer ETo ($ETo = k_{bac} E_{bac}$).

▪ Évaporomètre Piche (Epiche)

A Saint-Louis, NDiaye et Richard-Toll on trouve des évaporomètres Piche. Les évaporomètres ne donnent qu'une indication qualitative du pouvoir évaporant de l'air. Vu que la surface évaporante totale est très petite et que les évaporomètres Piche sont installés à l'intérieur de l'abri météorologique on peut se demander si les lectures donnent une valeur fiable de l'évaporation. Pour cette raison, les lectures de l'évaporomètre Piche ne sont pas analysées dans ce bulletin.

3.2

Facteurs climatiques

Les principaux facteurs climatiques influençant le taux d'évapotranspiration, aussi bien que l'évaporation d'une nappe d'eau libre, sont le rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité de l'air, et la vitesse du vent.

Rayonnement solaire

Une partie du rayonnement solaire, source d'énergie dans la nature, sera utilisée pour vaporiser l'eau dans le processus de l'évapo(transpi)-ration.

Le rayonnement solaire qui atteindrait le sol dans le Delta du fleuve Sénégal en l'absence d'atmosphère (R_a), est reporté dans la Figure 11. Le taux de ce rayonnement, nommé 'extraterrestre', est exprimé en mm/jour dans la figure. Il indique ainsi le taux d'évaporation qui serait

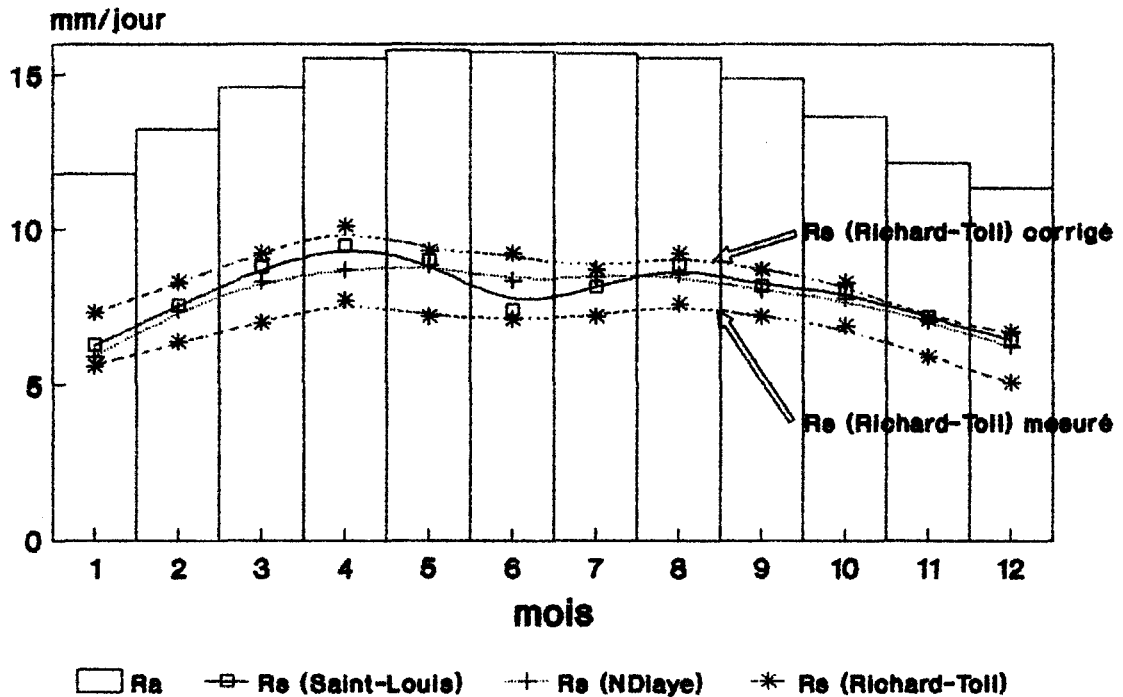


Figure 11.
Le rayonnement extraterrestre (Ra) et solaire (Rs).

atteint si toute l'énergie pourrait être utilisée pour l'évaporation.

En réalité, ce n'est qu'une partie du rayonnement extraterrestre qui va atteindre le sol. Cette partie dépendra des caractéristiques de l'atmosphère, et est donc fortement déterminée par le degré de nébulosité.

L'insolation relative, qui est l'inverse de la nébulosité, est maximale (100 %) en absence de nuages. A ce moment l'insolation réelle (n) est égale à l'insolation maximale théorique ($N =$ la durée du jour). Par contre, si toute la journée le ciel reste totalement couvert, l'insolation relative sera égale à zéro. L'ordre de grandeur de l'insolation relative dans la zone d'étude est de 60 pour-cent, ce qui correspond avec une durée d'insolation réelle de 7 à 7.5 heures/jour. Une baisse de l'insolation réelle est notée entre mai et juillet. A Saint-Louis, cette diminution est beaucoup plus accentuée qu'à l'intérieur du Delta. Le coefficient de variation, exprimant la variation inter-annuelle des moyennes mensuelles, est de l'ordre de 10 pour cent. La variation est la plus faible pendant l'hivernage et la plus forte en contre-saison froide (décembre à février).

Le rayonnement solaire, R_s , qui est la partie du rayonnement extraterrestre atteignant le sol, peut être ou bien

mesuré directement (avec un pyranometre) ou bien estimé à l'aide d'une formule. La formule d'Angström tient compte de l'insolation relative (n/N) et du rayonnement extraterrestre (R_a) pour estimer le rayonnement solaire :

$$R_s = (0.25 + 0.50 n/N) R_a$$

Les coefficients utilisés (0.25 et 0.50) sont proposés par Doorenbos et Pruitt (1977), et sont presque identiques aux valeurs trouvées par Rijks (1976) pour Richard-Toll (0.25 et 0.48).

La moyenne des valeurs mensuelles du rayonnement solaire des neuf dernières années est reportée dans la Figure 11. Les valeurs de Saint-Louis et NDiaye sont estimées à l'aide de la formule d'Angström, tandis que ceux-ci de Richard-Toll sont mesurées directement à l'aide d'un pyranomètre.

La Figure 11 fait sortir que le rayonnement solaire est minimum en décembre et janvier, c'est à dire pendant la période durant laquelle le rayonnement extraterrestre est minimum. Durant l'année, le rayonnement augmente proportionnellement avec l'augmentation du rayonnement extraterrestre. Au milieu de l'année on note quant-même une baisse du rayonnement par suite de la baisse de l'insolation relative. Comme l'insolation, la diminution en rayonnement solaire est beaucoup plus accentuée à la côte qu'à l'intérieur du pays.

Les valeurs du rayonnement solaire de Richard-Toll, qui sont pourtant mesurées directement avec un pyranomètre, ne sont pas en harmonie avec les valeurs calculées du rayonnement de Saint-Louis et NDiaye. Les valeurs de Richard-Toll se trouvent aussi au-dessous du niveau des valeurs publiées par la FAO (FAO, 1984) pour des stations dans les environs (Guede à 16°32'N, 14°47'W et Podor à 16°39'N, 14°58'W). Les mesures effectuées par l'ADRAO à NDiaye depuis Octobre 1991 avec un autre type de pyranomètre, confirment aussi la mesure irréaliste de Richard-Toll.

La durée de l'insolation réelle mesurée à Richard-Toll ne peut pas être utilisée pour vérifier, à l'aide de l'équation d'Angström, les valeurs mesurées du rayonnement solaire. Ceci est la conséquence du fait qu'à Richard-Toll l'insolation réelle est mesurée avec un indicateur de soleil au lieu d'un héliographe Campbell-Stokes. L'indicateur est utilisé pour estimer l'activité photosynthétique de la canne à sucre et ainsi, sa mise au point n'est pas propre à la mesure de l'insolation réelle.

En multipliant maintenant les valeurs mesurées de Richard-Toll avec un coefficient de correction on a essayé d'obtenir une indication plus réaliste du rayonnement solaire. La déviation avec les stations des environs est en moyenne de l'ordre de 25 % avec une sous-évaluation de 30 % en contre-saison et de 20 % en hivernage. Les valeurs mesurées et corrigées sont reportées dans la Figure 11.

Température de l'air

La température de l'air est liée au rayonnement solaire. En plus, elle commande en partie l'humidité de l'air (un autre facteur influençant l'évapotranspiration).

La moyenne des valeurs mensuelles de la température minimale et maximale de l'air des neuf dernières années est reportée dans la Figure 12. On note que plus qu'on s'éloigne de l'océan, plus l'amplitude diurne de la température est forte. Cette amplitude peut monter en pleine contre-saison jusqu'à 20°C à Richard-Toll. La figure fait aussi ressortir que les températures sont minimales à la fin et au début de l'année et augmentent

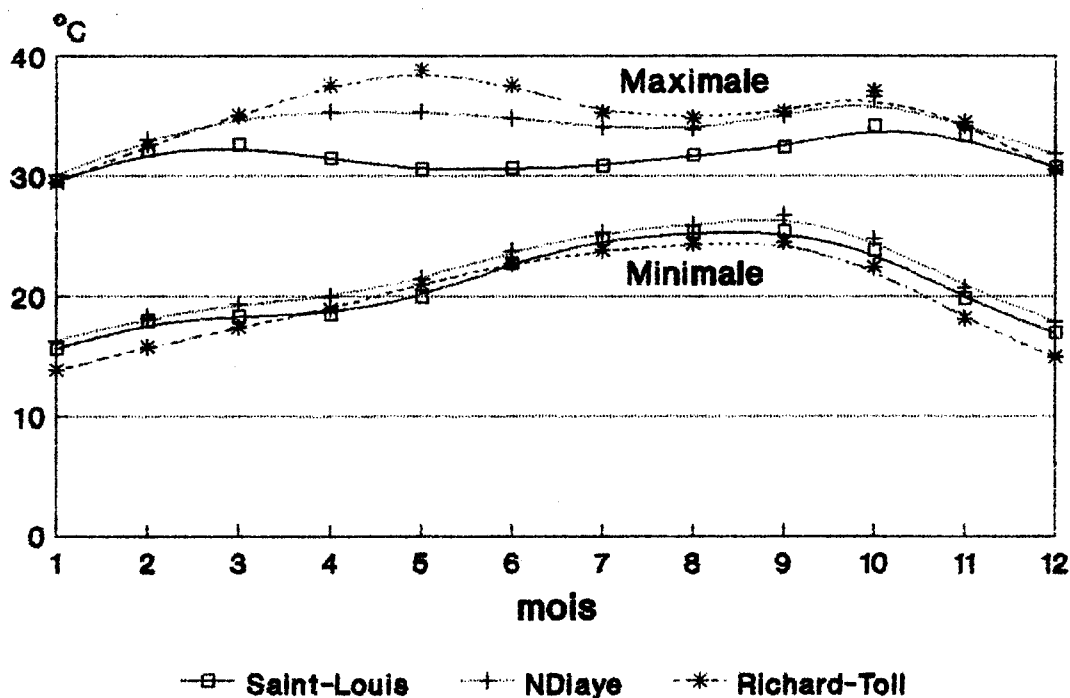


Figure 12.
Température de l'air.

progressivement durant l'année. On note pourtant une baisse relative de la température maximale qui se situe à NDiaye et Richard-Toll durant l'hivernage et en Mai - Juin à Saint-Louis. Ainsi, il fera nettement plus chaud à l'intérieur du delta qu'à la côte pendant la contre-saison chaude. Par contre, pendant l'hivernage et la contre-saison froide la variation de la température moyenne entre les trois stations du delta est seulement de l'ordre de 1 à 1.5 °C.

La variation inter-annuelle des moyennes mensuelles n'est pas très élevée. Le coefficient de variation est de l'ordre de 4 à 6 %.

Humidité de l'air

L'humidité de l'air détermine le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

La moyenne des valeurs mensuelles de l'humidité relative des neuf dernières années est reportée dans la Figure 13. La figure montre que l'humidité relative moyenne est de l'ordre de 70 à 80 pour cent pendant la saison des pluies

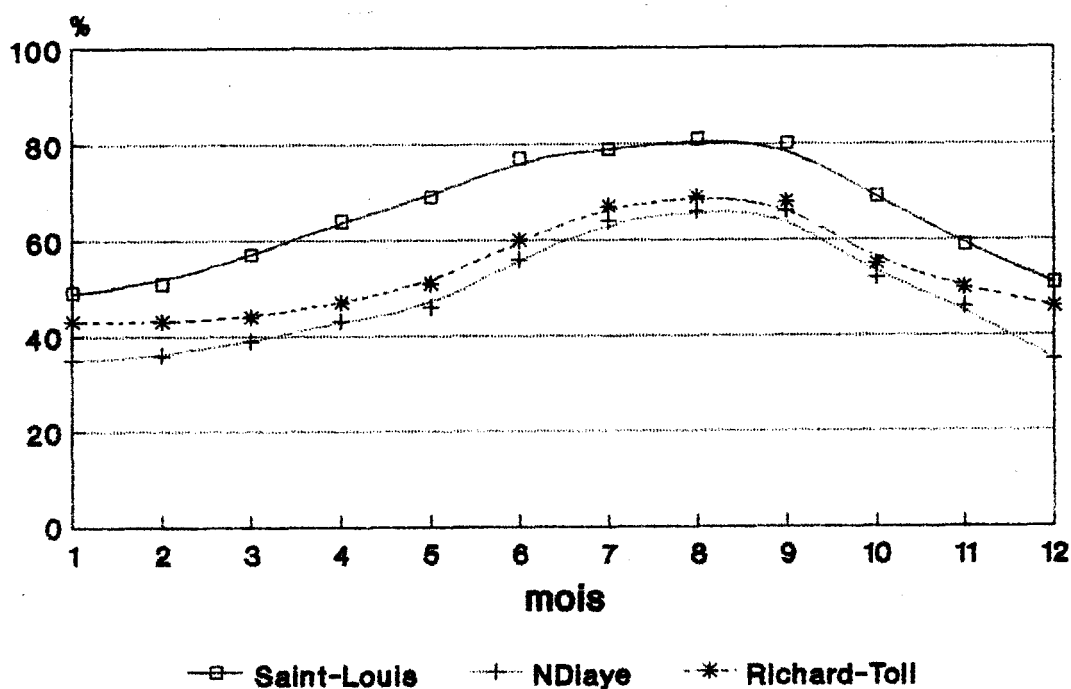


Figure 13.
Humidité relative de l'air.

et s'abaisse jusqu'à 40 pour cent en saison sèche. On note aussi que l'humidité relative à l'intérieur du delta est inférieure à celui de Saint-Louis.

La variation inter-annuelle des moyennes mensuelles est plus basse à la côte qu'à l'intérieur du delta. Le coefficient de variation est de l'ordre de 5 à 10 % à Saint-Louis, et de 15 à 30 % à NDiaye et Richard-Toll.

Vitesse du vent

La vitesse du vent détermine la vitesse avec laquelle la masse d'air, devenue saturée au-dessus de la surface évapo(transpi)rante, est remplacée par une masse d'air fraîche.

La moyenne des valeurs mensuelles de la vitesse du vent des neuf dernières années est reportée dans la Figure 14. La vitesse du vent mesurée à 12 mètres de sol à Saint-Louis est rapportée à deux mètres en multipliant les valeurs avec 0.72. La figure fait sortir que les vitesses sont les plus faibles en fin d'hivernage et augmentent progressivement pour atteindre leur maximum en contre-

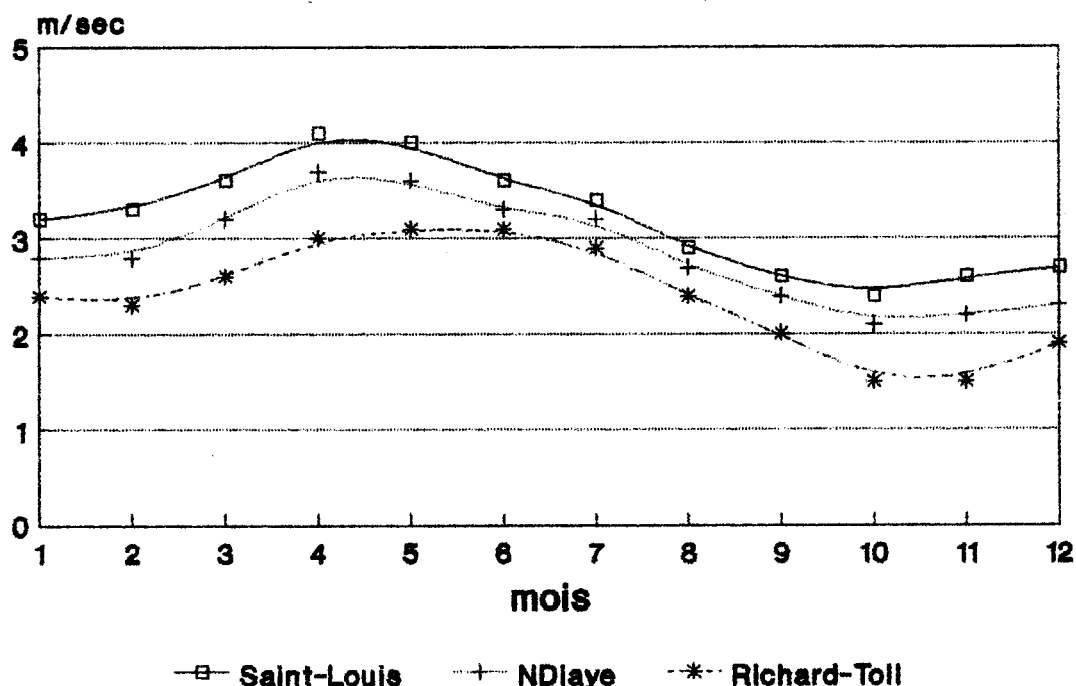


Figure 14.
Vitesse du vent à 2 m du sol.

saison chaude. On note aussi que plus près de l'océan les vitesses de vent sont supérieures à celles des stations plus éloignées de la côte.

La variation inter-annuelle des valeurs mensuelles n'est pas très élevée. Le coefficient de variation est de l'ordre de 6 (Saint-Louis) à 8.5 pour cent.

3.3 Evaporation d'un bac

La moyenne des valeurs mensuelles d'évaporation d'un bac Classe A des neuf dernières années, est reportée dans la Figure 15. Parce que à Saint-Louis le bac n'est installé qu'en 1989, la moyenne de cette station ne porte que sur les trois dernières années.

Vu que la variabilité inter-annuelle des facteurs climatiques influençant le taux d'évaporation est limitée, la variabilité inter-annuelle des valeurs mensuelles

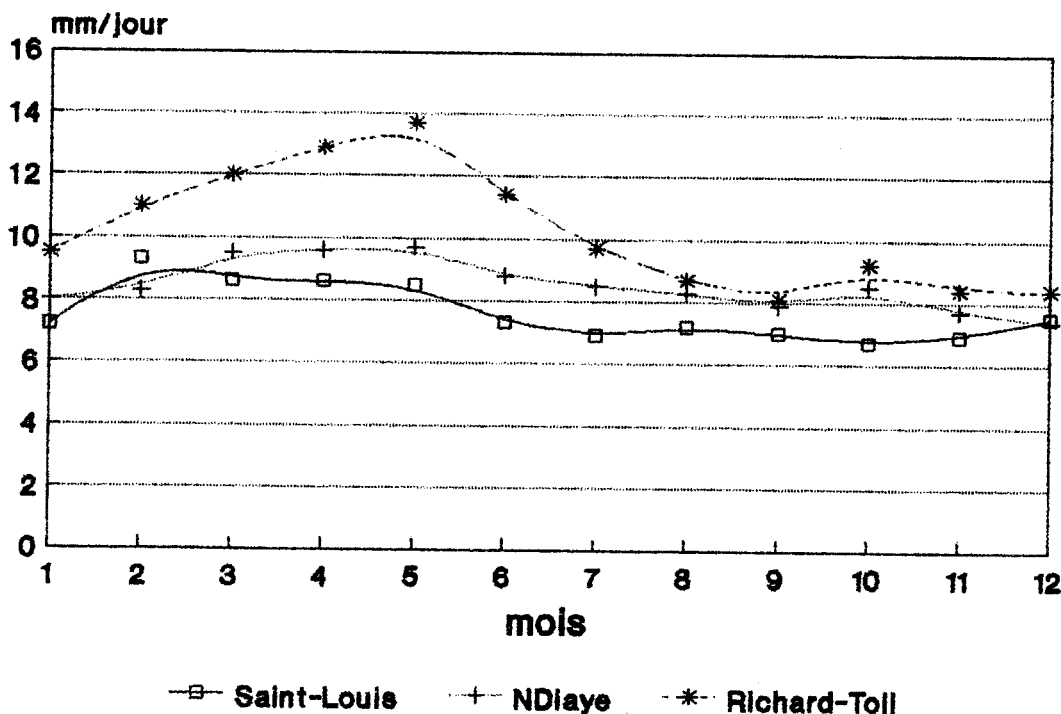


Figure 15.
Evaporation d'un bac Classe A.

d'évaporation d'un bac ne sera non plus pas trop élevée. Le coefficient de variation est de l'ordre de 10 pour cent.

L'évaporation est maximale pendant la contre-saison chaude (rayonnement et températures élevés, humidité relative basse et vitesse du vent importante). L'évaporation est minimale pendant l'hivernage (humidité relative élevée et vitesses du vent faibles) et la contre-saison froide (rayonnement et températures à leur minimum).

L'écart d'évaporation entre les stations est surtout dû à la divergence des valeurs du rayonnement et de la température de l'air entre les stations. L'écart est maximum en contre-saison chaude, durant laquelle les valeurs du rayonnement s'écartent le plus entre les stations et qu'il fait nettement plus chaud plus qu'on s'éloigne de l'océan.

3.4

Calcul de l'ETO

L'évapotranspiration de référence, ETo, est calculée à l'aide de la formule de Penman. Les coefficients proposés par Doorenbos et Pruitt (1977) sont utilisés. La méthode de calcul est présentée en Annexe C.

Les moyennes mensuelles de la température minimale et maximale, de l'humidité relative minimale et maximale, de l'insolation relative et de la vitesse du vent (reportée à 2 m du sol) sont utilisées pour calculer l'ETO de Saint-Louis et NDiaye.

L'ETO de Richard-Toll est estimée avec deux approches différentes. Une première estimation est obtenue en utilisant dans l'équation de Penman, les moyennes mensuelles corrigées du rayonnement solaire mesuré. Une autre estimation est obtenue à partir de l'évaporation du bac ($E_{To} = k_{bac} E_{bac}$). Le rapport (k_{bac}) trouvé par Rijks (1976) à Richard-Toll entre l'évaporation potentielle d'un gazon (E_{To} , obtenue à l'aide des cuves lysimétriques) et l'évaporation d'un bac type Classe A (E_{bac}) varie de 0.8 pendant l'hivernage à 0.7 pendant la saison sèche.

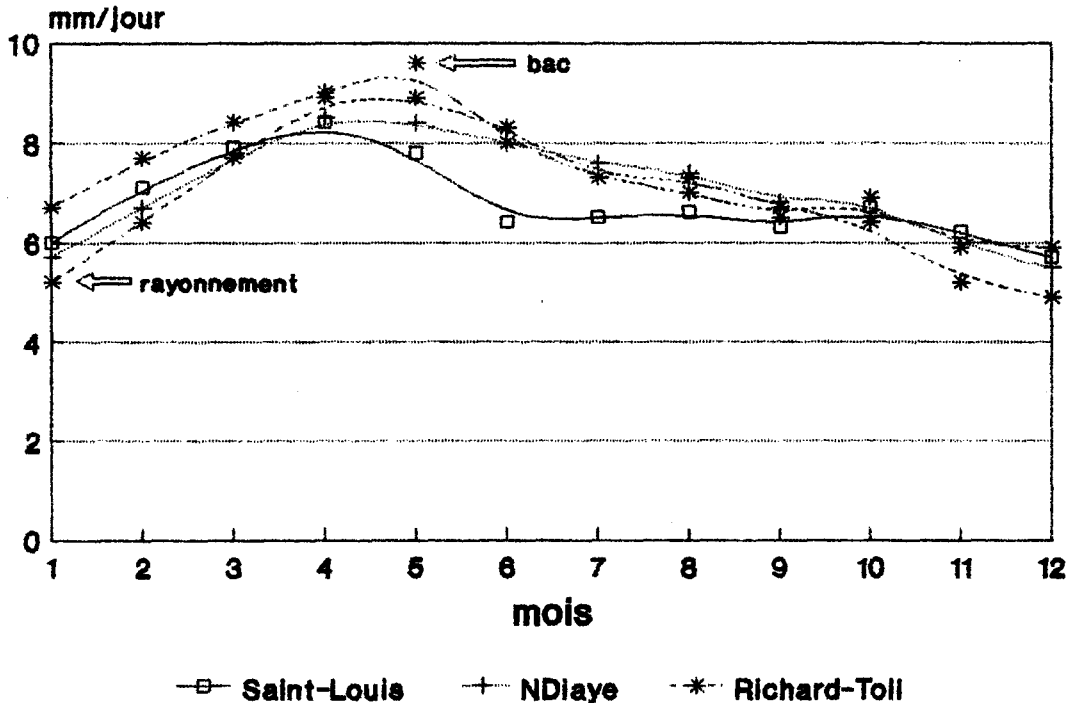


Figure 16.

L'évapotranspiration de référence (ET₀).
(Pour Richard-Toll deux courbes sont indiquées, la plus haute représente l'ET₀ dérivée du bac tandis que l'autre correspond à l'ET₀ calculée avec la formule de Penman en utilisant les valeurs corrigées du rayonnement solaire).

La moyenne des valeurs mensuelles d'ET₀ des neuf dernières années est reportée dans la Figure 16. Vu que la variabilité inter-annuelle des facteurs climatiques influençant le taux d'évapotranspiration est limitée, la variabilité inter-annuelle des valeurs mensuelles d'ET₀ ne sera non plus élevée. Le coefficient de variation est de l'ordre de 7 pour cent.

En contre-saison froide, l'ET₀ est minimale. C'est aussi dans cette saison que le rayonnement solaire et la température de l'air sont les moins élevés. L'humidité relative est quant-même aussi basse mais la vitesse du vent n'est pas encore très élevée.

En contre-saison chaude, l'ET₀ atteint son maximum. Le rayonnement solaire, ainsi que la température de l'air et la vitesse du vent sont très élevés, tandis que l'humidité relative n'est pas encore trop élevée. La diminution suivante de l'ET₀ pendant l'hivernage est surtout dû aux effets combinés de la chute de la vitesse du vent et de l'augmentation de l'humidité relative.

Comme l'évaporation d'un bac, l'écart d'ETo entre les stations est surtout dû à la divergence des valeurs du rayonnement et de la température de l'air entre les stations. L'écart est maximum en contre-saison chaude. Il est minimum en hivernage et en contre-saison froide. Pendant cette période, le rayonnement et les températures des trois stations se trouvent plus ou moins sur le même niveau. L'effet de l'humidité relative moins élevée à l'intérieur du pays sur le niveau d'ETo est compensé par l'occurrence de plus de vent à la côte.

3.5

Mesures directes

Pendant les années 1990 et 1991, l'évapotranspiration du riz était mesurée sur le champ à l'aide de lysimètres et de règles graduées. Une description des appareils utilisés se trouve en Annexe (Annexe B).

ADRAO (NDiaye)

Dans les parcelles expérimentales de l'ADRAO à Ndiaye, trois lysimètres étaient installés. Dans les mêmes parcelles se trouvaient des règles graduées. Le niveau d'évapotranspiration du riz (ET_{riz}) obtenu à l'aide des lysimètres, et la somme de l'ET_{riz} et percolation obtenue à l'aide des règles graduées, sont reportés dans la Figure 17. La figure fait ressortir que les pertes d'eau par percolation sont de l'ordre de un à deux millimètres par jour. Ceci correspond avec le niveau de la percolation des cuvettes du delta (OMVS/USAID, 1990; Raes et al., 1991).

L'évapotranspiration du riz est aussi dérivée de l'évapotranspiration de référence (ET_o) en utilisant un coefficient cultural (k_c). Ce coefficient varie de 1.15 à 1.3 en fonction du stade de développement du riz et du climat, sauf en fin de saison où il descend à 1.00. Pour des besoins de comparaison un k_c de 1.2 a été choisi pour tout le cycle. L'ET_o (Penman) et l'ET_{riz} ainsi calculées (1.2 ET_o) sont reportées dans la même figure (Fig. 17) où se trouvent les valeurs mesurées.

La figure fait ressortir que les valeurs calculées sont différentes des valeurs mesurées. Les mesures sont

obtenues à partir d'expériences sur de petites parcelles expérimentales en milieu contrôlé. Dans ces conditions, le coefficient cultural de 1.2 peut être considéré comme étant un peu sous-estimé. Mais il ne peut à lui seul expliquer la grande divergence entre l'ETriz calculée et celle mesurée. Cette différence provient sans doute de l'effet d'oasis qui survient dans des petites zones irriguées entourées de larges champs secs. En effet, durant l'hivernage 1991, la cuvette de NDiaye (125 ha) à côté du lieu expérimental de l'ADRAO est demeurée sèche parce que non cultivée. En plus, l'effet d'oasis est accentué par l'étroitesse des parcelles expérimentales ($\approx 25\text{m}^2$) chacune étant entourée de diguettes des quatre cotés.

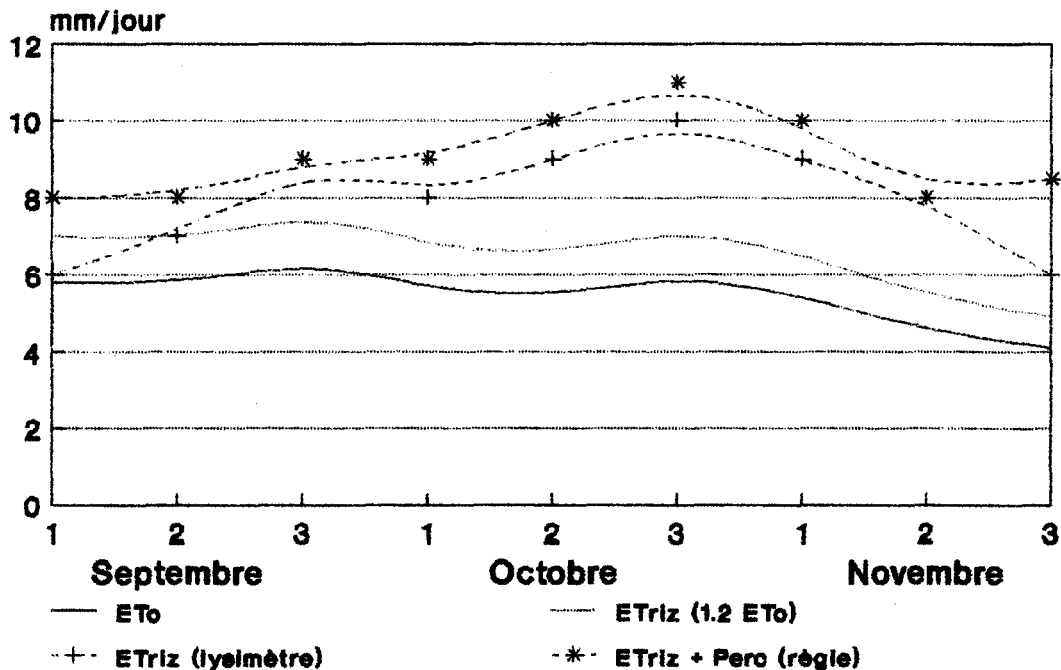


Figure 17.

Le niveau d'évapotranspiration du riz (ETriz) et de la percolation (Perc) obtenue à l'aide des lysimètres et règles graduées à la station expérimentale de l'ADRAO à NDiaye pendant l'hivernage 1991, et le niveau calculé de l'évapotranspiration de référence (ETo) et de l'ETriz (1.2 ETo).

Périmètre de Lampsar

L'effet d'oasis n'a pas existé dans les grandes cuvettes irriguées du Lampsar pendant l'hivernage 1990 (NDIaye, Pont-Gendarme) et 1991 (Pont-Gendarme) et la contre-saison de 1991 (Thilène). Dans ces cuvettes, des mesures avec des règles graduées sur des dizaines de champs ont été effectuées pour estimer la consommation en eau par évapotranspiration et percolation. Les résultats sont donnés dans la Figure 18. De cette figure il ressort que l'ET_{riz} calculée (1.2 E_{To}) est inférieure de 1 à 2 mm à la consommation en eau mesurée (ET_{riz} + Percolation). En sachant que la percolation dans ces cuvettes est de l'ordre de 1 à 2 mm, on peut conclure que l'ET_{riz} calculée correspond bien à la réalité.

Les mesures directes effectuées au champ montrent que l'E_{To} calculée à l'aide de la formule de Penman avec l'approche Doorenbos et Pruitt donne une bonne estimation de l'E_{To} de la zone.

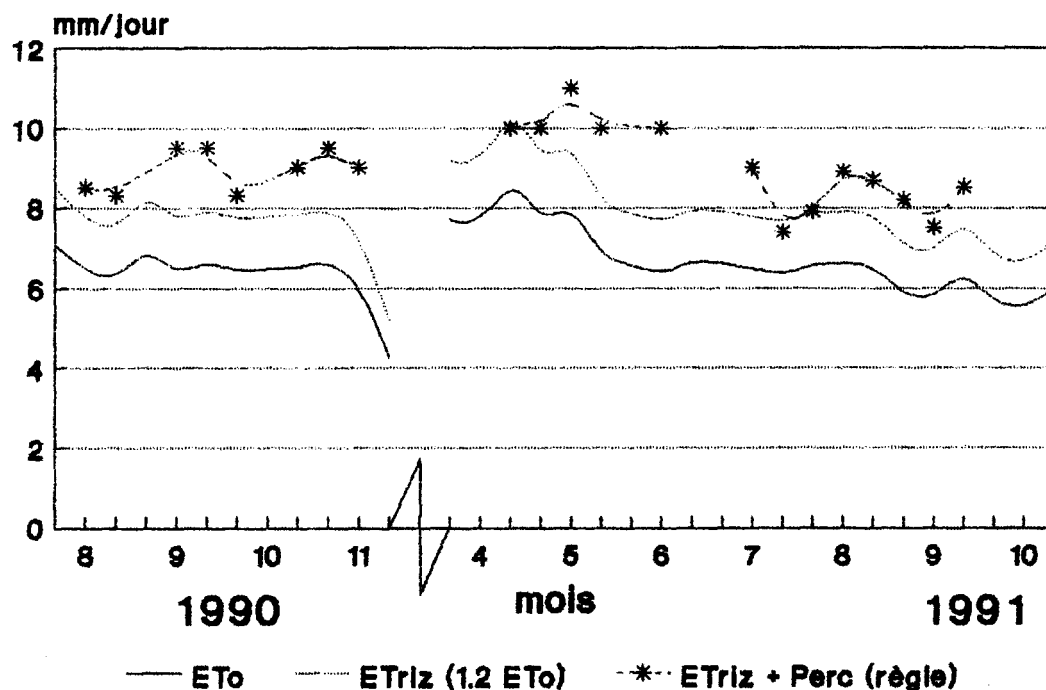


Figure 18.

La somme de l'évapotranspiration du riz (ET_{riz}) et de la percolation (Perc) obtenue à l'aide des règles graduées dans des champs de plusieurs cuvettes du Lampsar pendant les hivernage de 1990 et 1991 et la contre-saison de 1991, et le niveau calculé de l'évapotranspiration de référence (E_{To}) et de l'ET_{riz} (1.2 E_{To}).

3.6 Conclusions

La Figure 19 donne la tendance des valeurs mensuelles moyennes d'ETo obtenues à partir de l'évaporation réelle d'un bac classe A et d'une estimation selon la méthode de Penman (approche Doorenbos et Pruitt, 1997). Elle est dressée avec les données des neuf dernières années et pour trois lieux distincts du delta (Saint-Louis à la côte, NDiaye à l'intérieur et Richard-Toll à l'extrême est du delta). Les valeurs sont conformes avec celles tirées dans les champs et peuvent donner de bonnes indications sur des niveaux d'ETo auxquelles on peut s'attendre. En effet, la moyenne obtenue à Saint-Louis à partir de la série des neuf dernières années diffère peu de celle de la série des 21 dernières années.

L'analyse de la Figure 19 fait ressortir les conclusions suivantes :

- En période d'hivernage l'ETo est de l'ordre de 6.5 mm/jour à la côte et de 7.0 mm/jour à l'intérieur du delta excepté pendant le mois de juillet où elle est plutôt de l'ordre de 7.5 mm/jour.

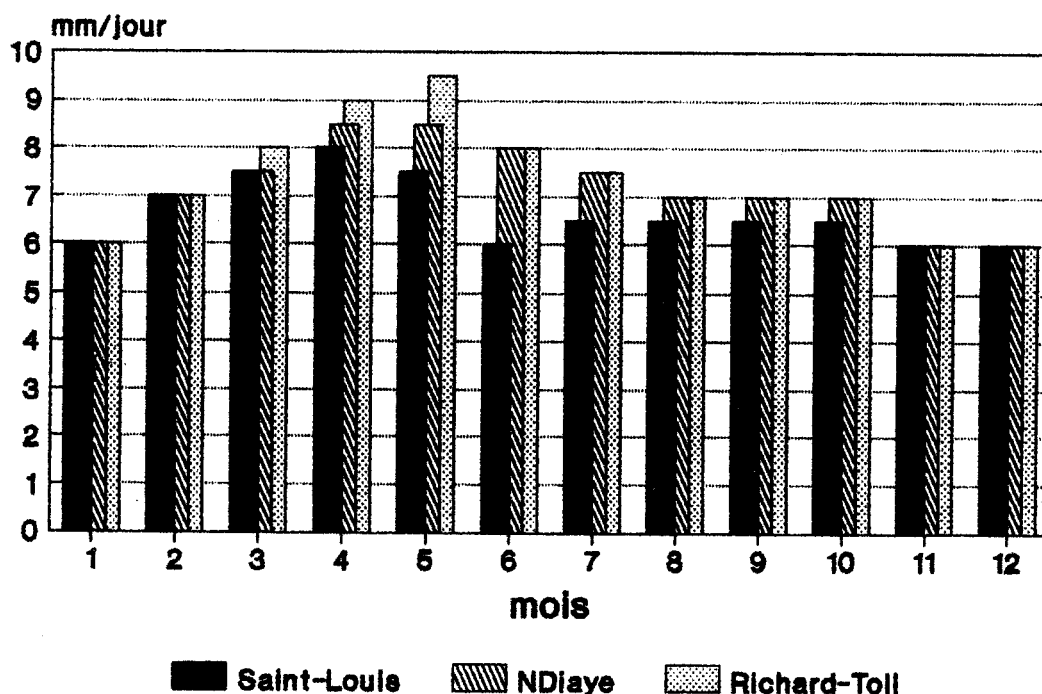


Figure 19.
ETo en fonction du temps
et de l'espace dans la zone du Delta.

- En **contre-saison froide** l'ETO descend pour se stabiliser à une valeur de 6 mm/jour dans toute la zone du delta. A la fin de cette période (février) elle monte jusqu'à 7.0 mm/jour,
- En **contre-saison chaude** l'ETO continue à croître pour arriver à son maximum en avril (côte) ou mai (extrême est du delta), pour ensuite retrouver son niveau hivernal. Le maximum noté varie de 8.0 mm/jour à la côte, de 8.5 mm/jour à l'intérieur et de 9.5 mm/jour à l'extrême est du delta.

Chapitre 4

Besoins en Eau

Dans ce chapitre, les besoins en eau d'irrigation pour toute la saison et en période de pointe sont estimés, et ceci pour les cultures maraichères et la riziculture. Cette estimation est faite pour la saison hivernale et pour les périodes de contre-saison.

4.1

Cultures Pluviales

Avant l'établissement des besoins en eau il a été tenté de voir s'il était possible de boucler des cycles de spéculations sans une irrigation d'appoint.

Indépendamment de toute référence précise aux cultures, une précipitation décadaire égale à 40 ou 50 pour-cent du taux d'évapotranspiration de référence (Fig. 19), peut être considérée comme équivalent aux besoins en eau d'une jeune plante. Cette valeur, considérée comme 30mm dans la région, n'est atteinte qu'en début Août et ceci seulement une année sur quatre (Fig. 20). Après le semis, la culture aura de plus en plus besoin d'eau, pour arriver en maturité à des besoins égaux ou supérieurs à ETo, soit 65 à 70 mm/décade. La probabilité d'avoir autant de pluie survient moins que deux ans sur dix (Fig. 20). Il en résulte que les stress hydriques pourront être importants et fréquents, et que les chutes en rendements seront très considérables en conséquence. Même si la culture en question ne demande pas d'investissements financiers trop importants, l'intérêt de cultiver dans cette zone sans irrigation est très douteux.

En comparant les besoins en eau d'une culture pluviale avec la possibilité d'avoir autant de pluie dans la région, on ne peut qu'arriver à la conclusion que les échecs cultureux seront très fréquents.

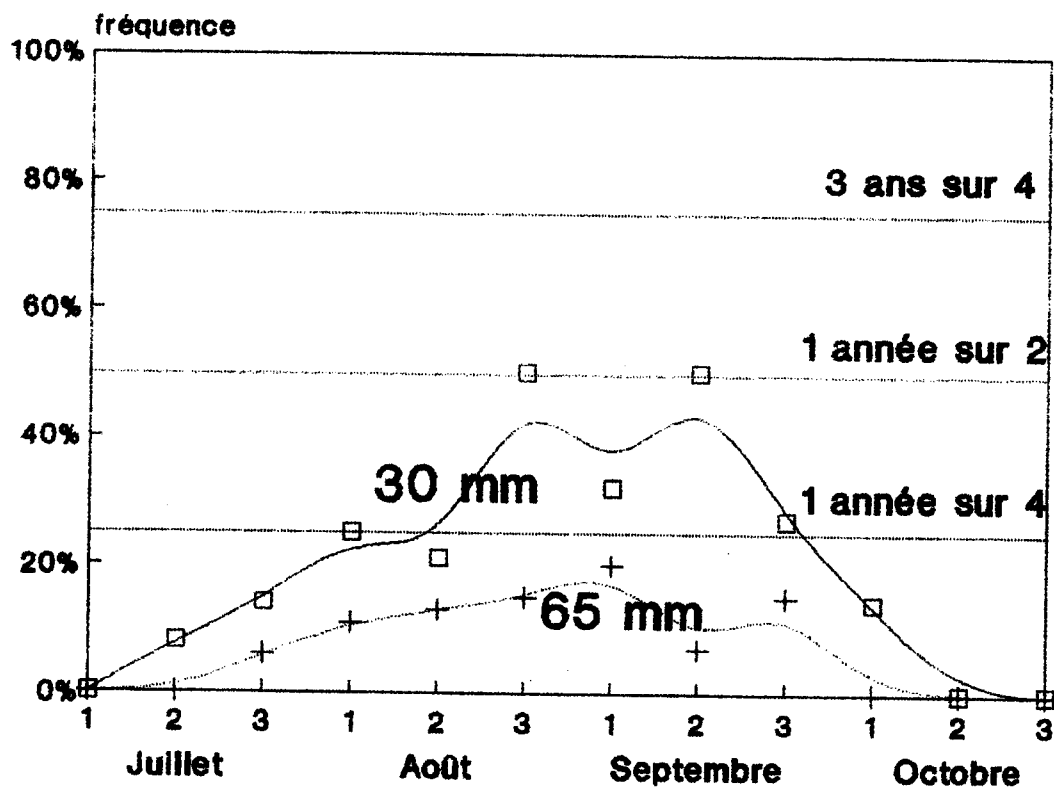


Figure 20.
 Probabilité d'occurrence d'une pluie décadaire
 égale ou supérieure à 30 et 65 mm à Saint-Louis
 (période : 1976-1991).

4.2 Méthodologie

Besoins nets en eau d'irrigation

Les besoins nets en eau d'irrigation (Inet) expriment la quantité d'eau qui sera effectivement consommée par la plante durant son cycle. Les calculs sont effectués en tenant compte des pertes et des gains d'eau par une source autre que l'irrigation :

$$\text{Inet} = \text{Pertes} - \text{Gains}$$

Les pertes d'eau sont constituées de l'évapotranspiration potentielle de la culture (ET_{culture}) qui est calculée en multipliant l'évapotranspiration de référence (ET_o) avec

un coefficient cultural (kc). En riziculture il faudra en plus tenir compte de l'eau nécessaire pour l'imbibition, pour l'établissement d'une lame d'eau, et pour remplacer l'eau perdue par percolation.

Les gains d'eau peuvent provenir de la précipitation, de la quantité d'eau stockée dans le sol et de la remontée à partir de la nappe phréatique.

En calculant les gains, plusieurs niveaux de précipitations avec différentes probabilités d'occurrence peuvent être considérés. En plus, il faut tenir compte du fait que seule une partie de cette précipitation sera efficace.

Un autre gain est constitué par l'eau stockée dans le sol en début de cycle. Mais dans la région, avec les faibles pluies enregistrées et avec une forte évaporation, la probabilité d'avoir un stock d'eau dans la zone radiculaire est quasi nulle. Même le sol risque d'être au point de flétrissement ce qui nécessitera une pré-irrigation en début du cycle. Au lieu d'être un gain, il s'agit donc en réalité d'un apport extra en eau d'irrigation.

L'apport d'eau par remontée à partir de la nappe n'est pas pris en considération. La nappe étant salée, il est à éviter que cette eau remonte dans la zone radiculaire.

Besoins bruts en eau d'irrigation

Les besoins bruts en eau d'irrigation sont obtenus en tenant compte de l'efficacité de l'irrigation et du contrôle de la salinité dans la zone radiculaire. Dans le calcul de l'efficacité d'irrigation on considère les pertes d'eau inhérentes à la distribution d'eau et à l'irrigation de la parcelle. Hormis la période de pointe, les besoins nets en eau sont majorés du volume d'eau nécessaire pour le contrôle de la salinité (lessivage) pour obtenir les besoins bruts de la saison.

Besoins en période de pointe

Les besoins en période de pointe représentent la quantité d'eau nécessaire pendant la période au cours de laquelle les besoins en irrigation sont maximum. Il est généralement exprimé comme un débit fictif continu (l/sec.ha).

4.3 Cultures maraîchères

Besoins en eau d'irrigation

• Les besoins nets en eau d'irrigation sont donnés par :

$$I_{net} = \delta S + ET_{culture} - P_{eff}$$

où δS = la pré-irrigation qui amène la zone racinaire de son humidité initiale à une humidité favorable pour une évapotranspiration potentielle,

$ET_{culture}$ = l'évapotranspiration potentielle de la culture (= $kc ETo$), et

P_{eff} = la précipitation efficace.

Le coefficient cultural (kc) varie en fonction du stade de développement, du climat et de la culture. Pour les besoins de l'étude une seule série de kc est proposée. Elle représente une bonne estimation pour les spéculations maraîchères (Tab. 7). La longueur du cycle de végétation varie en fonction de la culture, de la saison et de la date de semis. Les besoins en eau ont été établis sur la base d'une longueur de cycle de végétation de 100 jours, qui est une moyenne pour des spéculations maraîchères. Le cycle est décomposé en quatre phases distinctes de développement (Tab 7).

Pour élaborer les besoins en eau des trois saisons (l'hivernage, la contre-saison froide et la contre-saison chaude), les valeurs mensuelles d' ETo figurant dans la Figure 19 ont été utilisées.

Pour des raisons de sécurité une précipitation de probabilité d'occurrence de 8 ans sur 10 a été choisie pour les calculs. Parce qu'un tel apport d'eau est de peu d'importance, considérer séparément les précipitations des trois lieux n'est pas opportun. La référence choisie

Tableau 7.

La durée en jours et les valeurs de kc pour chaque stade de développement d'une spéculation maraîchère.

Stade de développement	Durée en jours	kc
Phase initiale	20	0.40
Phase de Développement	30	0.40 - 1.20
Mi-saison	30	1.20
Fin de saison	20	1.20 - 0.80

est la précipitation de Saint-Louis découlant de l'analyse statistique des précipitations des 16 dernières années (Tab. 6). Toute cette précipitation ne peut pas être considérée comme efficace, mais parce qu'étant faible, les pertes par ruissellement, par percolation profonde et par évaporation sont de ce fait négligées.

Au début du cycle, une pré-irrigation sera nécessaire pour amener la zone radiculaire à une humidité favorable. Avec les types de sol et de culture de la région, une pré-irrigation de 20 mm est juste en début de cycle. Cette pré-irrigation permet d'atteindre la réserve facilement utilisable sur les 20 premiers centimètres du sol. Ensuite il faudra procéder à des irrigations complémentaires au fur et à mesure que la zone radiculaire se développe.

Les besoins nets en eau d'irrigation en hivernage, en contre-saison froide et chaude sont obtenus en utilisant le logiciel IRSIS (Raes et al., 1988). Ils sont reportés dans la Figure 21.

▪ Les besoins bruts en eau d'irrigation sont obtenus en majorant les besoins nets par les pertes d'eau inhérentes à l'irrigation et par l'eau nécessaire pour le contrôle de la salinité.

Les besoins en eau pour contrôle de la salinité dépendent de plusieurs paramètres :

- type de sol ; dans le delta on observe une toposéquence des sols sableux (peu salés) jusqu'aux sols argileux des cuvettes (salés à très salés),
- type de précédent cultural (riz ou speculation maraichère).

Les pertes d'eau inhérentes à l'irrigation sont exprimées par l'efficacité de l'irrigation. L'efficacité dépend essentiellement de la méthode d'irrigation et de la nature et du type de régulation du réseau d'irrigation. Dans les conditions de fonctionnement relativement normales, cette efficacité varie entre 65 à 85 pour-

Besoins nets en eau

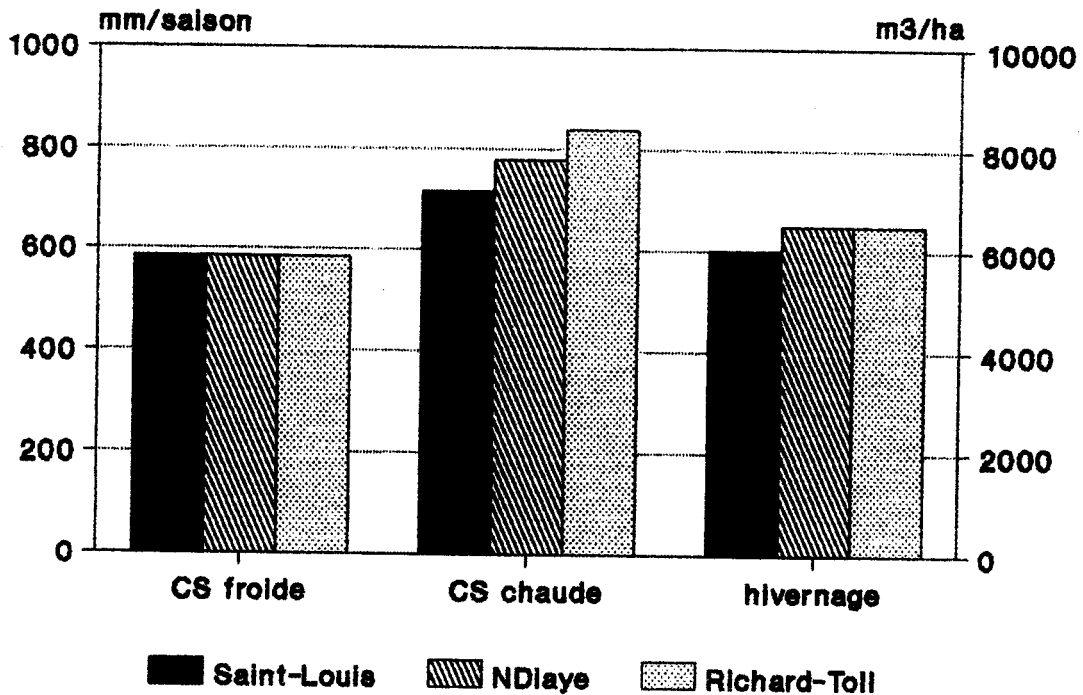


Tableau 8.
Besoins en eau d'irrigation des cultures maraichères
(cycle de végétation de 100 jours) en mois de pointe

	Besoins nets		Besoins bruts
	mm/jour	l/sec.ha	l/sec.ha
Contre-Saison froide :			
Saint-Louis	7.2	0.83	1.0...1.3
NDiaye	7.2	0.83	1.0...1.3
Richard-Toll	7.2	0.83	1.0...1.3
Contre-Saison chaude :			
Saint-Louis	9.1	1.05	1.2...1.6
NDiaye	9.8	1.14	1.3...1.8
Richard-Toll	11.0	1.27	1.5...2.0
Hivernage :			
Saint-Louis	7.4	0.85	1.0...1.3
NDiaye	7.9	0.92	1.1...1.4
Richard-Toll	7.9	0.92	1.1...1.4

Avec une efficacité d'irrigation de 65 à 85 pour-cent, les besoins bruts en eau d'irrigation en période de pointe sont reportés dans le Tableau 8.

Besoins bruts en eau

= besoins nets en eau

.. + 90 à 200 mm (900 à 2000 m ³ /ha)	en contre saison froide
ou + 115 à 270 mm (1150 à 2700 m ³ /ha)	en contre saison chaude
Dans les conditions favorables, à 225 mm cent. (2250 m ³ /ha)	en hivernage

ité

Besoins en mois de pointe

A l'aide du logiciel IRSIS, les besoins nets en eau d'irrigation en mois de pointe sont identifiés. Les résultats sont reportés dans le Tableau 8. En hivernage le mois de pointe correspond au mois d'Août, en contre-saison froide, en janvier et en contre-saison chaude, en avril ou mai.

• L'imbibition est fonction du type de sol et de l'état initial d'humidité du sol. Pour la zone du delta, l'imbibition est évaluée à 175 mm soit 1,750 m³/ha suite aux expérimentations effectuées dans quelques cuvettes.

• Un semis direct à l'aide de graines pré-germées est de coutume dans le delta. Avant le semis, une lame d'eau d'environ 5 cm est généralement apportée pour éviter tout stress hydrique. Après le semis, cette lame est évacuée (ou laissée évaporer) pour faciliter la levée et l'enracinement des plantules. Après quelques jours, la lame est progressivement restaurée jusqu'à une hauteur d'environ 7 à 10 cm. Dix jours avant la fin présumée du cycle végétatif du riz les champs sont progressivement vidés. En fonction des besoins de fertilisation, de traitement phyto-sanitaire ou de dessalement des parcelles, il sera nécessaire de prévoir un ou plusieurs processus d'évacuation et de restauration de la lame. Pour les besoins nets en eau d'irrigation, les calculs sont établis pour une hauteur de lame de 100 mm, soit 1,000 m³/ha.

• L'évapotranspiration du riz (ET_{riz}) est calculée pour une riziculture hivernale et une riziculture de contre-saison. Plusieurs dates de semis ont été simulées et des variétés du riz à cycles moyen et court ont été distinguées. L'ET_{riz} est calculée en multipliant l'ET₀ des trois lieux (Fig. 19) avec un coefficient cultural dont la valeur est fonction du stade de développement. Les coefficients culturaux ont été choisis selon les recommandations de la FAO. Une valeur de 1.15 a été sélectionnée pour le stade de végétation. En hivernage, ce premier stade aura une longueur de deux mois, tandis qu'en contre-saison il sera plutôt de deux à trois mois et ceci en fonction de la date de semis et de la variété. En mi-saison (floraison et formation du produit), le coefficient atteint la valeur de 1.30, pour ensuite descendre à 1.00 à un mois de la récolte. Toutes les irrigations seront arrêtées 10 jours avant la fin présumée du cycle. Dans la Figure 22 il est indiqué la variation de l'ET_{riz} en fonction de la date de semis, de la période (hivernage ou contre-saison) et du site et ceci pour une variété de riz à cycle moyen (ex. Jaya) et une à cycle court (ex. I Kong Pao). Les recherches de l'ADRAO (WARDA/ADRAO, 1992) ont permis de fixer les longueurs de cycle de chaque variété en fonction de la date de semis.

• Sur la base des mesures effectuées dans le delta (OMVS/USAID, 1990; Raes et al., 1991), et selon les normes citées dans les ouvrages techniques pour des sols argileux (Sharma and De Datta, 1986), une percolation de l'ordre de 2 mm/jour (20 m³/jour.ha) a été retenue comme moyenne pour la période de culture. Au début de la saison

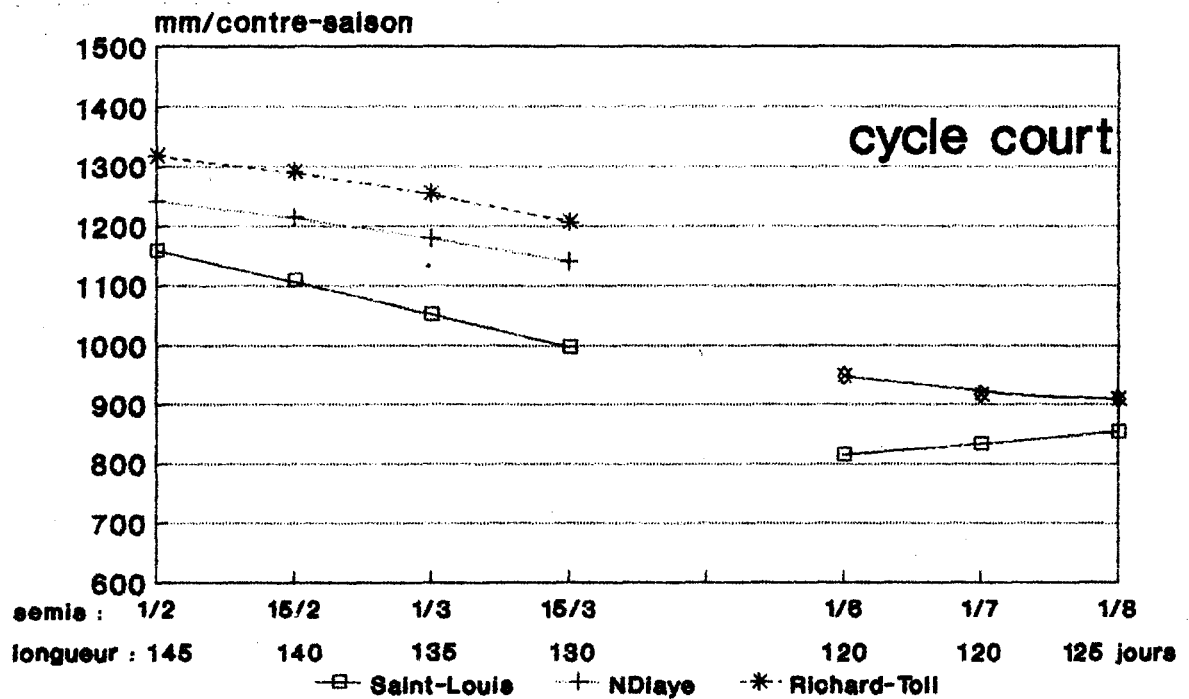
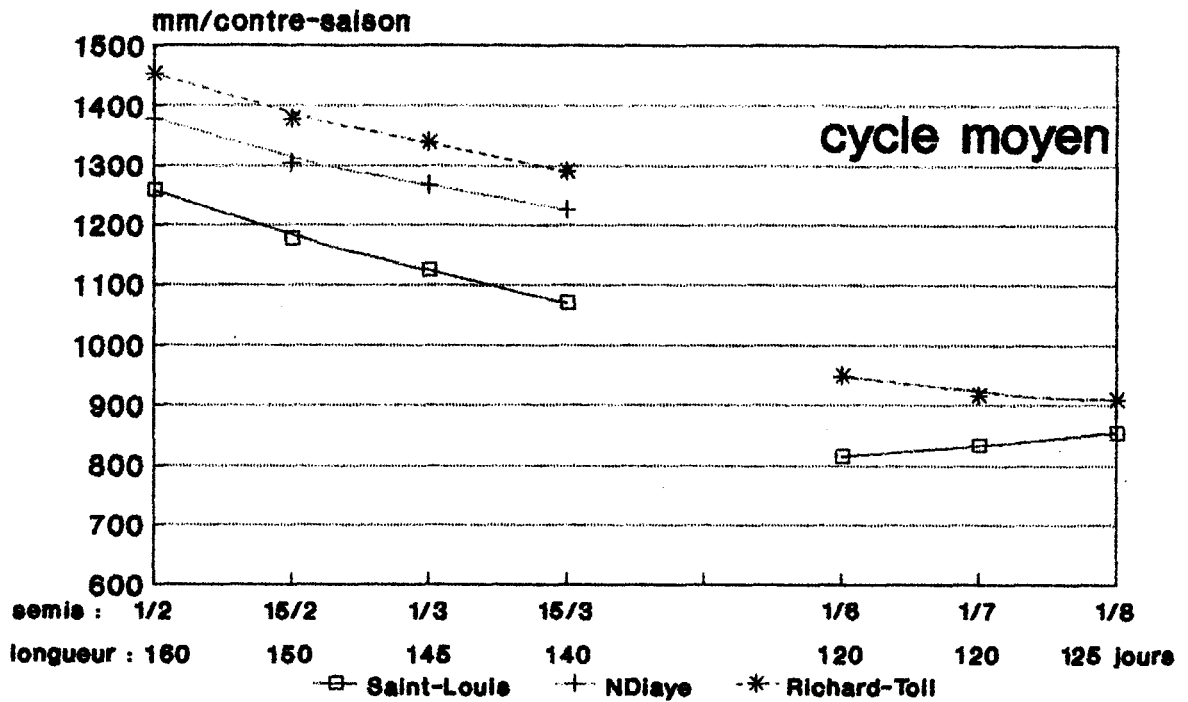


Figure 22.

La valeur totale d'ETriz en contre-saison et en hivernage pour une variété du riz à cycle moyen et une à cycle court, en fonction de la date de semis.

les valeurs seront plutôt de l'ordre de 4 à 5 mm/jour, mais une ou deux décades après la mise en eau la percolation se stabilisera à 1 à 2 mm/jour.

Tableau 9.
Précipitation efficace (mm).

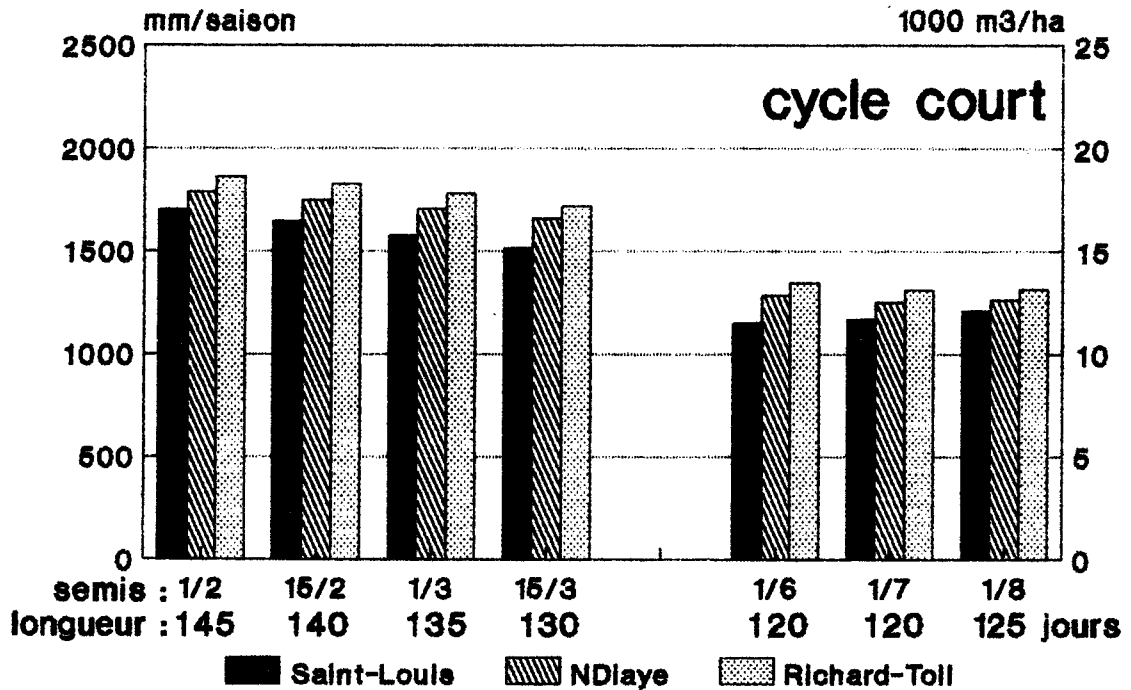
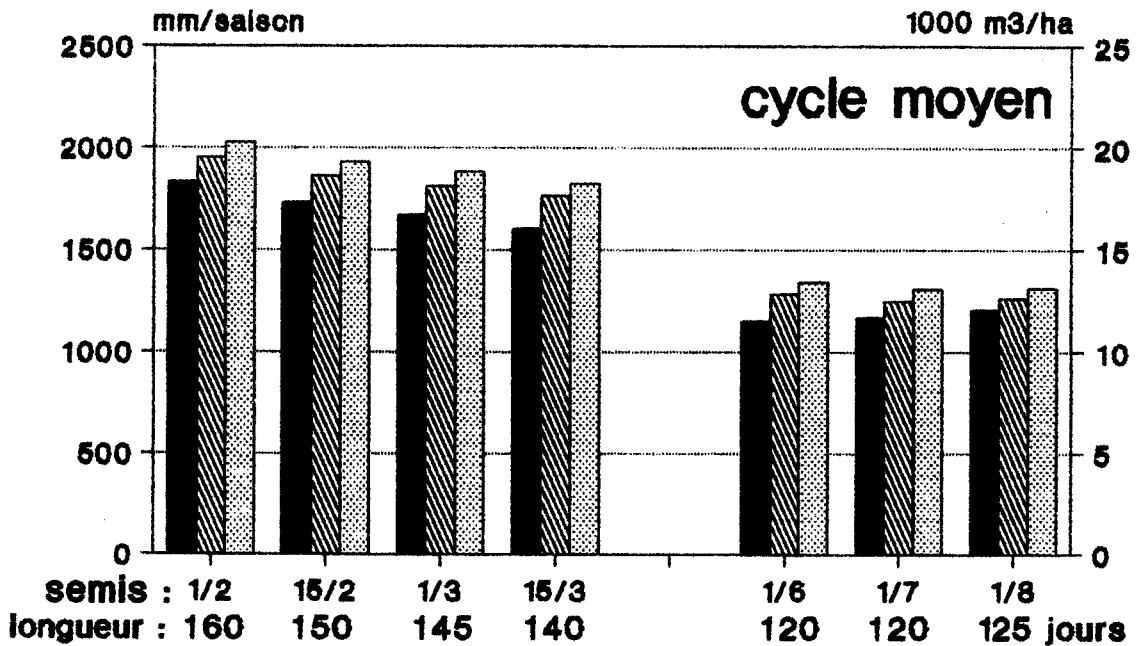
Type de Saison	Date de semis :		Date de semis :	
	Début hivernage		Mi-saison hivernale	
	St-Louis NDiaye	R-Toll	St-Louis NDiaye	R-Toll
Hivernage humide	190	130	160	110
Hivernage normal	160	100	140	90
Hivernage sec	130	80	110	70

▪ Vu le nombre de jours de pluie peu élevé et les hauteurs des diguettes relativement importantes, une grande partie des précipitations peut être stockée facilement dans les champs et en conséquent va contribuer au processus d'évapotranspiration. En considérant que 85 % des précipitations supérieures à 5 mm sont efficaces, les valeurs de la **précipitation efficace** ont été calculées. Dans le Tableau 9 les valeurs sont reportées en fonction du site, de la date de semis et de l'importance des pluies en hivernage. La valeur correspondant avec un hivernage humide, représente la hauteur des précipitations hivernales qu'on ne dépasse que 3 ans sur 10, tandis que celle qui correspond avec un hivernage sec représente la hauteur des précipitations hivernales qu'on n'atteint pas 3 ans sur 10.

▪ **Les besoins nets en eau d'irrigation** sont résumés dans la Figure 23 en fonction de la saison, de la date de semis, de la variété de riz et du site. Les calculs sont faits pour un hivernage avec une précipitation normale. Selon que l'année est humide ou sèche, les besoins en eau doivent être minorés ou majorés de 20 à 30 mm (Tab.9), soit 200 à 300 m³/ha.

▪ **Les besoins bruts en eau d'irrigation** sont obtenus en majorant les besoins nets avec les volumes d'eau nécessaires pour le contrôle de la salinité et en tenant compte de l'efficacité de distribution. Si le terrain n'est pas soigneusement nivelé, il faut en plus envisager un surplus d'eau pour atteindre une lame d'eau satisfaisante.

Besoins nets en eau



Besoins bruts en eau

= besoins nets en eau

en contre-saison

en hivernage

.. + 350 à 450 mm
(3500 à 4500 m³/ha)

+ 250 à 350 mm
(2500 à 3500 m³/ha)

Figure 23.

Besoins en eau d'irrigation du riz en période d'hivernage et en contre-saison dans le delta du fleuve Sénégal.

L'efficacité de distribution dépend du design et du mode de gestion des périmètres. Vu que les sols sont argileux donc relativement imperméables, et que beaucoup de pertes de distribution à l'intérieur du périmètre sont en effet des irrigations, une valeur de 85 pour cent a été retenue comme efficacité. Cette valeur correspond avec une perte d'eau de 200 mm (2,000 m³/ha) en hivernage et 300 mm (3,000 m³/ha) en contre-saison.

Les besoins de vidange pour contrôle de salinité sont fonction du degré de salinité de la parcelle et du système de rotation des cultures. Ils seront d'autant plus grands que la lame est faible. Pour l'estimation des besoins bruts, une fourchette de 50 à 150 mm (500 à 1,500 m³/ha) a été retenue d'après les résultats provisoires de nos recherches effectuées dans le delta.

Besoins en période de pointe

• Phase de mise en eau

La période de pointe se situe généralement en phase de mise en eau, phase durant laquelle les sols sont imbibés jusqu'à saturation. En plus une lame d'eau est établie dans la rizière durant cette période. Les besoins en eau varient largement avec la durée totale de la phase. Ils peuvent être estimés avec la formule (Van De Goor and Zijlstra, 1983) :

$$q = M e^{(MT/S)} / (e^{(MT/S)} - 1)$$

où q = le besoin total en eau d'irrigation (mm/jour) de la phase de mise en eau,

M = le besoin en eau d'irrigation (mm/jour) pour compenser les pertes journalières des parcelles où l'imbibition est déjà achevée,

T = la durée totale (jours) de la phase de mise en eau, et

S = la quantité d'eau nécessaire (mm) pour la mise en eau des parcelles (imbibition et établissement d'une lame)

La quantité nette nécessaire pour la mise en eau des parcelles, S, est estimée à 225 mm, soit la somme de l'imbibition (175 mm) et de la lame initiale d'eau (50 mm). Le besoin net en eau pour faire face aux pertes journalières des parcelles imbibées, M, est estimé à 12.5 mm/jour. Cette valeur ne prend pas l'apport de pluies en compte vu leur faible occurrence. Elle est uniquement composée des pertes par évapotranspiration (ET_{riz} = 1.15 ETo) et par percolation (4 mm/jour au début de la campagne).

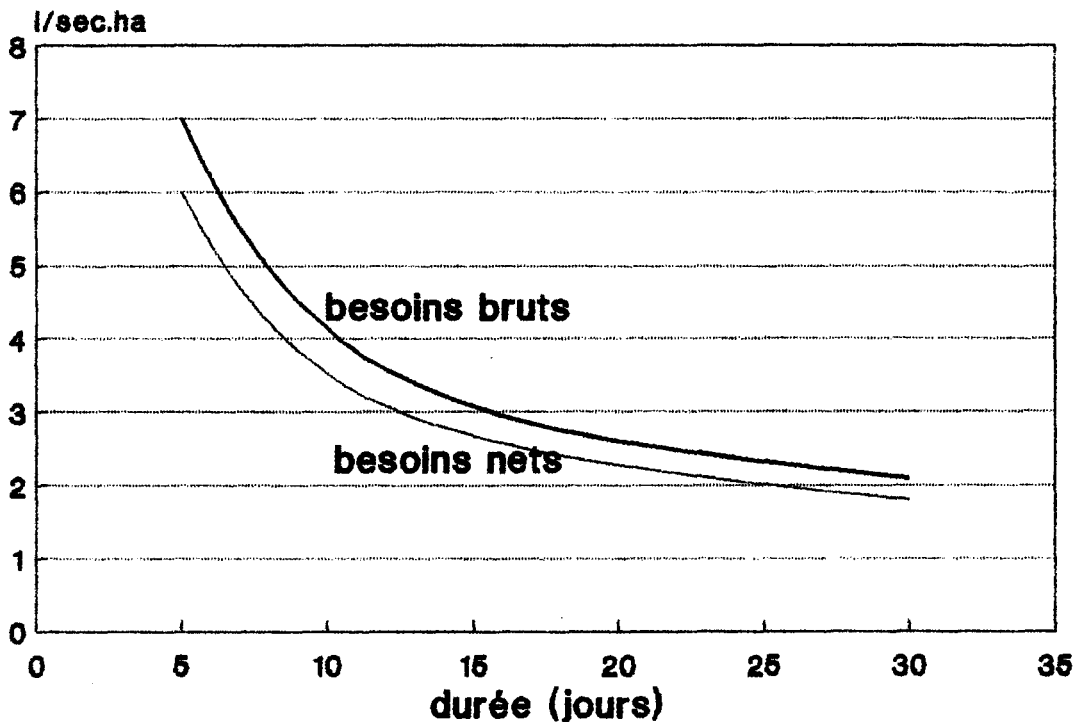


Figure 24.

Besoins en eau d'irrigation du riz en phase de mise en eau en fonction de la durée totale de cette phase.

Dans la Figure 24, les besoins en eau d'irrigation durant la phase de mise en eau sont reportés en fonction de la durée totale de cette phase. Les besoins bruts en eau tiennent compte d'une efficacité de distribution de 85 pour cent.

▪ Phase d'entretien

La période de pointe de la phase d'entretien de l'hivernage et de la contre-saison, correspond avec la période de floraison. Etant donné que durant la floraison le riz est très sensible aux stress hydriques, il sera indispensable d'assurer un apport d'eau satisfaisant durant cette période.

En fonction des dates de semis retenues, la période de pointe en hivernage se situera en Août, Septembre ou Octobre. En contre-saison, le mois de pointe est le mois de Mai. Dans le Tableau 10 les besoins en eau d'irrigation durant le mois de pointe de la phase d'entretien sont reportés. Les besoins bruts en eau tiennent compte d'une efficacité de distribution de 85 pour cent.

Tableau 10.
Besoins en eau d'irrigation
durant le mois de pointe de la phase d'entretien.

	Besoins nets		Besoins bruts
	mm/jour	l/sec.ha	l/sec.ha
Hivernage :			
Saint-Louis	10.5	1.2	1.4
NDiaye	11.1	1.3	1.5
Richard-Toll	11.1	1.3	1.5
Contre-Saison (Mai) :			
Saint-Louis	11.8	1.4	1.6
NDiaye	13.1	1.5	1.8
Richard-Toll	14.4	1.7	2.0

REFERENCES

- Buishand, T.A. 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58: 11 - 27.
- Demarée, G. and M.S. Chadilly. 1988. The Sahelian Drought(s) as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. In : "Computer Methods and Water Resources, Vol.3 Computational Hydrology". D. Ouazar, C.A. Brebbia and V. de Kosinsky (Eds.). Computational mechanics publications and Springer-Verlag : 15 - 23.
- Doorenbos, J. 1976. Stations agrométéorologiques. FAO, Bulletin d'Irrigation et de Drainage n° 27. Rome, Italie. 84 p.
- Doorenbos, J. et W.O. Pruitt. 1977. Les besoins en eau des cultures. FAO, Bulletin d'Irrigation et de Drainage n°42. Rome, Italie. 144 p.
- FAO. 1984. Agroclimatological data for Africa. Volume 1 : Countries north of the equator. FAO, Plant Production and Protection Series n°22. Rome, Italy.
- Jones, K.R. 1981. Arid zone hydrology. FAO, Irrigation and Drainage Paper n° 37. Rome, Italie. 265 p.
- Leroux, M. 1983. Climat. En : Atlas du Sénégal. Editions Jeune Afrique. Paris, France : 12-17.
- OMVS. 1986. Etude climatologique - Vallée du fleuve Sénégal. OMVS, Cellule d'évaluation et de planification continue (CEPC). Saint-Louis, Sénégal. 102 p.
- Projet OMVS/USAID. 1990. Rapport de synthèse hydrogéologique du Delta du fleuve Sénégal. OMVS, Eaux Souterraines, Rapport final, Volume II. Saint-Louis, Sénégal. 76 p.
- Raes, D., H. Lemmens, P. Van Aelst, M. Vanden Bulcke and M. Smith. 1988. IRSIS - Irrigation Scheduling Information System. KULeuven, Institut for Land and Water Management, Reference Manual n°3. Leuven, Belgium. 119 p.
- Raes, D., Z. Song, D. Mallants and G. Wyseure. 1990. RAINBOW - frequency analysis and probability plotting of hydrologic data. KULeuven, Center for irrigation Engineering, Reference Manual. Leuven, Belgium. 44 p.

Raes, D, B. Sy, S. Serneels et L. Van Passel. 1990. Analyse du bilan d'eau de deux cuvettes du Delta du fleuve Sénégal - Campagne Hivernale 1990. SAED, Projet Gestion de l'Eau, Bulletin Technique n°3. Saint-Louis, Sénégal. 69 p.

Rijks, D.A. 1976. Développement de la recherche agronomique dans le bassin du fleuve Sénégal - Agrométéorologie. PNUD, Rapport technique 2. Rome, Italie. 171 p.

Rochette, C. 1974. Le bassin du fleuve Sénégal. ORSTOM, Monographies Hydrologiques n°1. Paris, France. 325 p.

Sharma, P.K. and S.K. De Datta. 1986. Physical properties and processes of puddled rice soils. In Advances in Soil Science (Ed. Stewart), Springer-Verlag, New York. Volume 5 : 139-178.

Van De Goor, G.A.W. and G. Zijlstra. 1983. Irrigation requirements for double cropping of lowland rice in Malaya. ILRI, Wageningen, The Netherlands. 57 p.

WARDA/ADRAO. 1992. Annual report for 1991. WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire. (In press).

ANNEXES

- A. Techniques d'analyse
- B. Appareils de mesure
- C. Formule de Penman
- D. Stations Météorologiques

Annexe A. Techniques d'analyse

Coefficient de variation

Le coefficient de variation (CV) d'une série d'observations est donné par :

$$CV = \sigma / \bar{X}$$

où σ est l'écart-type de la série et \bar{X} la moyenne. Le coefficient de variation donne une mesure de la variabilité, dans les données, exprimée en pourcentage de la valeur moyenne.

Rangement de Kendall

Une rapide comparaison entre les données provenant de deux stations peut être faite par la méthode de rangement de Kendall. La méthode est décrite par Doorenbos (1976). Avec la méthode on compare des paires de données, une paire représentant des observations couvrant la même période à deux stations voisines (voir exemple ci-dessous

Tableau 11.
Calcul de la valeur de Kendall.

Année	Précipitations hivernales (en mm)				R
	Observation		Classement		
	St-Louis	NDiaye	St-Louis	NDiaye	
1983	95	68	95	68	0
1984	109	128	109	128	0
1985	259	263	156	240	2
1986	156	240	179	161	0
1987*	179	161	180	237	0
1988	316	264	182	243	1
1989	240	241	240	241	0
1990	182	243	259	263	0
1991	180	237	316	264	0

* sans les précipitations de la
lième décade du septembre. R = 3

$$T \text{ de Kendall} \approx 1 - 4R/[n(n-1)] = 1 - (4 \times 3)/[9(9-1)] = 0.83$$

avec les précipitations hivernales de Saint-Louis et NDiaye, Tableau 11).

Un échantillon de données, soit Saint-Louis, est classé par ordre de valeurs croissantes, avec en regard la valeur correspondante de l'autre échantillon, soit NDiaye. En partant du haut, chaque valeur de NDiaye est comparée avec les autres de NDiaye qui suivent et on compte le nombre de fois (R) où une valeur suivante de NDiaye est inférieure à la valeur considérée. On recommence l'opération avec la deuxième valeur de NDiaye, puis les valeurs suivantes, et on additionne les nombres trouvés. La valeur de T de Kendall $\approx 1 - 4R/[n(n-1)]$, dans laquelle R est le décompte total et n le nombre de paires d'observations, se situe entre +1 (concordance complète) et -1 (discordance complète).

Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle d'une série de données, utilisée dans cette étude se base sur l'analyse des fréquences cumulées. Cette analyse est conduite de la manière suivante :

- classement des n observations (x) par ordre de grandeur décroissante avec attribution d'un rang : 1, ... m, ... n à chacune d'elles,
- calcul des probabilités expérimentales de chacune de ces pluies par la méthode de Gringorten :

$$F(x) = (m - 0.44)/(n + 0.12)$$

- report des couples (x, f(x)) sur le graphique à probabilité (Figure 25), et
- tracé de la meilleure droite (par la méthode des moindres carrés).

L'estimation des valeurs correspondant avec différentes probabilités de dépassement se déduit facilement du graphique.

L'analyse fréquentielle est exécutée à l'aide du logiciel RAINBOW (Raes et al., 1990). Il donne la possibilité de tester plusieurs lois de distribution, telles que les lois de distribution normale, logarithmico-normale, Gumbel, etc.

RAINBOW utilise le théorème de la probabilité pour analyser des séries dont un certain nombre de données peuvent être égales à zéro. Cette relation est écrite comme :

$$G_X(x) = p + (1-p) F_X(x)$$

où $G_X(x)$ est la probabilité cumulée de distribution de tous les X ,
 p est la probabilité de $X = 0$, et
 $F_X(x)$ est la probabilité cumulée de distribution de tous les $X > 0$.

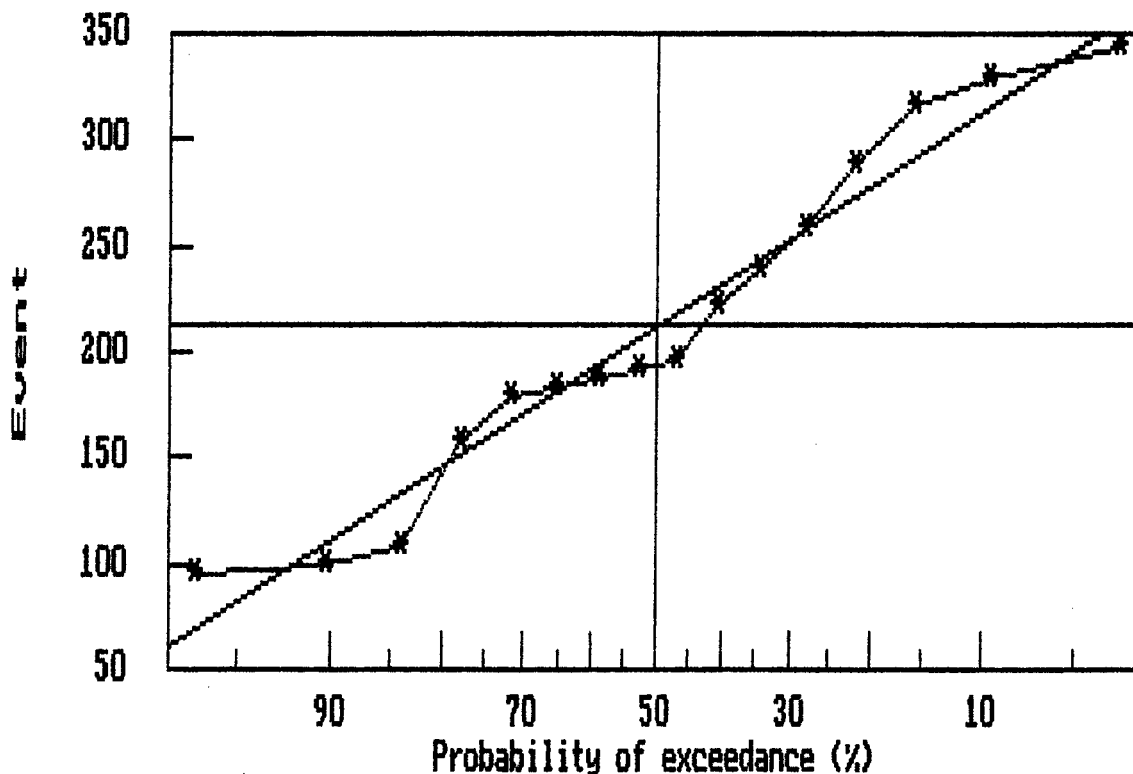


Figure 25.

Probabilité (en %) de dépassement d'une certaine hauteur des précipitations hivernales (en mm) à Saint-Louis.

Test d'homogénéité

Le test d'homogénéité est effectué à partir du logiciel RAINBOW (Raes et al., 1990). Le test est basé sur les déviations cumulatives à partir de la moyenne d'une série de données comme décrit par Buishand (1982) et Demarée and Chadilly (1988) :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}), \quad k = 1, \dots, n$$

ou Y_i sont les observations de la série et \bar{Y} est la moyenne arithmétique de la série.

Si la série est homogène, l'on peut s'attendre à ce que les S_k 's fluctuent autour de zéro, parce qu'il n'y a pas une déviation systématique des valeurs annuelles par rapport à la moyenne.

Après une remise à l'échelle (en divisant les valeurs S_k 's par l'écart-type de la série), RAINBOW dessine les déviations cumulatives par rapport à la moyenne de la série et indique sur la même figure les lignes donnant la probabilité de rejet de l'homogénéité de la série des données.

Annexe B.

Appareils de mesure

Lysimètre

De simples fûts à huile, en métal, d'environ 200 litres de capacité sont utilisés. Le diamètre est 0.56 m et la hauteur 0.94 m. La hauteur est réduite jusqu'à 0.65 m en conservant le fond.

Pour ne pas créer des différences d'évapotranspiration, on veille qu'à l'intérieur du fût la hauteur de la lame d'eau, la densité de semis, la dose de fumure et tout autre traitement de la culture soient semblables à ceux-ci du champ.

Règle graduée

La règle graduée a la forme d'un triangle rectangle isocèle de 0.40 m de coté. L'un des cotés du triangle (la hauteur) est prolongée de 0.40 m avec au bout une pointe permettant de l'enfoncer facilement dans la parcelle.

La règle est confectionnée avec du bois rouge, protégée par du vernis. Un morceau gradué de ruban d'acier est

fixé à l'hypoténuse pour les mesures. Cette position est préférable à celle sur la verticale, car la précision de lecture augmente d'environ 40 %. Les lectures sont ramenées à la verticale en les multipliant par le cosinus de 45° (0.71).

Annexe C. Formule de Penman

L'évapotranspiration de référence (gazon) est calculée à l'aide de la formule de Penman selon l'approche de Doorenbos et Pruitt (1977).

L'évapotranspiration de référence (ET_o) en mm/jour s'obtient à l'aide de la formule :

$$ET_o = c [W R_n + (1-W) f(u) (E_{sat} - E_{act})]$$

où $W = \delta / (\delta + \tau)$ est un coefficient de pondération dépendant de la température et de l'altitude. δ est la pente (mbar/°C) de la courbe de la tension de vapeur saturante en fonction de la température t ($\delta = 2(0.00738t + 0.8072)^7 - 0.00116$) et τ est la constante psychrométrique ($\tau = 0.67$ mbar/°C à 25°C),

R_n est le rayonnement net en mm/jour, soit la différence entre le rayonnement net de courte longueur d'onde (R_{ns}) et le rayonnement net de grande longueur d'onde (R_{nl}). Le rayonnement net de courte longueur d'onde $R_{ns} = 0.75[0.25 + 0.50 n/N]R_a$, est fonction de la durée d'insolation réelle (n) en heures/jour, de la durée maximum d'insolation possible (N) en heures/jour et du rayonnement extraterrestre (R_a) en mm/jour. Le rayonnement net de grande longueur d'onde $R_{nl} = \sigma T^4 [0.34 - 0.044 \sqrt{E_{act}}] (0.1 + 0.9 n/N)$ est fonction de la température moyenne (T) en degrés Kelvin, de la tension de vapeur réelle (E_{act}) en mbar et de n et N exprimés en heures/jour. $\sigma = 1.9838 \cdot 10^{-9}$ mm/jour, °K⁴ est la constante de Stefan-Boltzman,

$f(u) = 0.27 (1 + 0.86 u)$ est la fonction du vent, avec u la vitesse du vent à 2 m du sol en m/sec,

(Esat - Eact) est le déficit de la tension de vapeur en mbar, c'est à dire la différence entre la tension de vapeur saturante (Esat) à la température moyenne et la tension de vapeur réelle (Eact).

c est un facteur de correction. Il est fonction de l'humidité relative maximale (RHmax), du rayonnement solaire (Rs), de la vitesse du vent de la journée (ujour) et du ratio de la vitesse du vent de la journée par celle de la nuit (uratio):

$$c = 0.6817006 + 0.0027864 \text{ RHmax} + 0.0181768 \text{ Rs} \\ - 0.0682501 \text{ ujour} + 0.0126514 \text{ uratio} \\ + 0.0097297 \text{ ujour uratio} \\ + 0.43025 \times 10^{-4} \text{ RHmax Rs ujour} \\ - 0.92118 \times 10^{-7} \text{ RHmax Rs uratio}$$

Annexe D. Stations météorologiques

Saint-Louis (ASECNA)

• Historique

En 1862, le Docteur BORINS, médecin de la marine Française, fonda la première station météorologique officielle de l'Afrique à la rue Carnot (face à l'hôpital de Saint-Louis). Par la suite, elle sera implantée successivement sur le quai Est du port, à Léona et à l'ancienne piste avant de finir en 1958 à la nouvelle piste où elle passera sous tutelle ASECNA en 1961.

Dans ces différentes mutations la station aura servi comme observatoire à la marine avant de s'occuper de la protection aéronautique et de la climatologie.

L'Aérodrome lui requière des responsabilités de veille météorologique d'aérodrome en assistance à la navigation aérienne. En plus l'ASECNA lui requière du relevé, traitement et transmission des données météorologiques ayant trait aux statistiques climatologiques et à la veille météorologique mondiale (prévision de temps, échange des données, sauvetage et alerte contre les catastrophes naturelles).

▪ Environnement

La station se trouve dans l'enceinte de l'Aérodrome sur un terrain sablonneux bien dégagé dans les pourtours immédiats, mais boisé à partir de 100 mètres. La nappe phréatique se trouve à faible profondeur (2 mètres environ).

La station se trouve à 4 m d'altitude, à la latitude de 16°03'N et à la longitude 16°17'W.

▪ Instruments

Dans une parcelle de 30 mètres de côté, clôturée de grillage métallique haut de 2 mètres, on y trouve des instruments classiques pour l'observation synoptique et pour l'observation aéronautique :

Température :

- un thermomètre à maximum et un à minimum,
- un géothermomètre coudé pour la température du sol à une profondeur de 0.10 m,
- trois géothermomètres suspendus (pour la température du sol à une profondeur de 0.20, 0.50 et 1.00 m), et
- un thermographe.

Humidité de l'air :

- un psychromètre, et
- un hygromètre à cheveux.

Vent :

- anémomètre et girouette situés à 12 mètres du sol (moyenne aéronautique 2 minutes, moyenne synoptique 10 minutes).

Insolation :

- un héliographe.

Précipitation :

- un pluviomètre association, et
- un pluviographe à augets basculeurs.

Evaporation :

- un bac d'évaporation de classe A.

Pression atmosphérique :

- un baromètre à mercure, et
- un barographe à poids

Mesure Aérologique :

Quatre fois par jour des observations en altitude aux ballons sondes gonflés à l'hydrogène sont effectuées grâce à la poursuite avec un théodolite optique. Ceci permet d'obtenir la direction et la force du vent aux

différentes altitudes pouvant aller jusqu'à 16,5 km. Les ballons sondes ont une vitesse de 200 à 300 m/minute.

Les instruments pour la mesure de la température et de l'humidité de l'air sont placés dans un abri. L'abri à hydrogène contient 3 générateurs à gaz d'une capacité de 3 m³. Dans la salle d'observation se trouve le barographe à poids, le baromètre, le télévent, les indicateurs de vent instantané couplé à un coffret enregistreur anémogirouette, un mini ordinateur pour le dépouillement des sondages et les calculs statiques, une transmission des données et messages à la tour de contrôle, au centre national météorologique de Dakar et pour la liaison avec les autres stations de l'intérieur du pays.

▪ Conduite des observations

Le station fonctionne à feu continue avec 24 observations horaires, 8 observations synoptiques, 4 observations aérologiques et enfin des observations aéronautiques durant des heures d'ouverture de terrain.

La station dispose d'un effectif de 6 observateurs météorologistes en plus de Chef de la station.

NDiaye (SAED)

▪ Historique

Dans le cadre de la création du CNAPTI (Centre National d'Application des Techniques d'Irrigation), la station agro-météorologique de NDiaye a été créée en 1983 dans un souci de former les différents stagiaires, particulièrement les conseillers agricoles dans le domaine météorologique.

Cette station sert aussi d'outil de travail pour les différents chercheurs tant nationaux qu'internationaux, qui séjournent à la SAED.

La station est gérée par la SAED (Direction de la Formation et Recherche-Développement, DFRD), qui a mis un observateur pour le recueil régulier des données.

▪ Environnement

La station est située dans un endroit bien dégagé sur un sol argileux, non-irrigué, à côté du drain principal qui longe la cuvette d'irrigation de NDiaye (144 ha). La cuvette qui fait partie du périmètre de Lampsar, est

irriguée à partir du Lampsar, un bras mort du Fleuve Sénégal qui sert comme ressource d'eau d'irrigation.

A part des roseaux dans le drain et les quelques arbustes (acacia et tamarix) on ne trouve presque pas une végétation dans les environs immédiats de la station, même pas pendant la saison des pluies (l'hivernage). Ceci est dû à la précipitation qui dépasse rarement 200 mm/an et surtout à la nappe phréatique qui est très salée et se trouve à une faible profondeur (de deux mètres à moins d'un demi-mètre).

La station se trouve à 300 mètres du Nord de la Route Nationale 2 (Saint-Louis - Richard-Toll). Cette route est la limite sud du delta du fleuve Sénégal. Au sud de cette route s'étend le Ferlo, savane sèche qui n'est verte que durant la saison des pluies.

La station se trouve à 8 mètres d'altitude, à la latitude 16°13'N et la longitude 16°15'W.

• Instruments

La station météorologique est installée sur une parcelle carrée de 10 mètres de côté. Elle est clôturée avec un grillage métallique de 2 m de hauteur.

On y trouve les instruments classiques pour l'observation de la température, de l'humidité, du vent, des précipitations, de la durée d'insolation et de l'évaporation. Les instruments pour la mesure de la température de l'air et de l'humidité, ainsi que l'évaporomètre de Piche sont placés dans un abri Stevenson qui se trouve à 2 mètres au-dessus du sol.

Température :

- un thermomètre à maximum et un à minimum,
- deux géothermomètres coudés (pour la température du sol à une profondeur de 0.10 et 0.15 m),
- deux géothermomètres suspendus (pour la température du sol à une profondeur de 0.50 et 1.00 m), et
- un thermographe.

Humidité de l'air :

- un psychromètre à aspiration muni d'un ventilateur incorporé qui brasse l'air autour des réservoirs des thermomètres à une vitesse d'environ 3 m/sec, et
- un hygrographe à cheveux.

Vent :

- un anémomètre totalisateur à coupelles à 2 mètres de hauteur, et
- une girouette.

Insolation :

- un héliographe Campbell-Stokes.

Précipitation :

- un pluviomètre association, et
- un pluviographe à siphon.

Les deux instruments sont fixés à une hauteur de 1.5 m au-dessus du sol :

Evaporation :

- un bac d'évaporation classe A sur sol nu, muni d'un puits de tranquillisation et un thermomètre flottant, et
- un évaporomètre Piche.

• Conduite des observations

Chaque jour, à 8 heures, 12 et 18 heures, les observations de la température et de l'humidité de l'air, de la précipitation, de la vitesse et de la direction du vent sont faites à NDiaye. Les températures du sol sont relevées à 8 et à 12 heures.

Chaque jour à 8 heures, l'observateur note aussi la température maximale de l'air (affectée au jour précédent), la température minimale de l'air, et l'évaporation Piche et sur bac (affectées au jour précédent). En même temps il met en place la bande d'enregistrements d'héliographe, et une fois par semaine les bandes de thermographe, d'hygrographe et de pluviographe.

• Traitement

Les observations quotidiennes sont régulièrement contrôlées et entrées dans l'ordinateur. A l'aide du logiciel AGROMET elles sont traitées. AGROMET est décrit dans le Bulletin Technique n°1, du Projet Gestion de l'Eau (KULeuven - SAED, Septembre 1990).

Le logiciel fournit des rapports journaliers, décennaires et mensuels.

Richard-Toll (CSS)

• Historique

La station est implantée en 1962 et faisait partie de l'infrastructure de la station de recherche agronomique gérée par l'IRAT jusqu'à 1975. Aujourd'hui la station est gérée par la CSS (Compagnie Sucrière Sénégalaise).

▪ Environnement

La station est située sur la rive gauche du Sénégal dans un endroit bien dégagé sur un sol argileux, très salé et non irrigué. Le terrain, entouré par des larges pistes de production, se trouve au milieu des champs de canne à sucre de quelque 6,000 ha sous culture toute l'année.

▪ Instruments

La station météorologique est installée sur une parcelle carrée de 24 mètres de côté. La station est clôturée avec un grillage métallique de 2 m de hauteur.

On y trouve des instruments pour l'observation de la température, de l'humidité, du vent, des précipitations, de l'évaporation et du rayonnement solaire. Les instruments pour la mesure de la température de l'air et de l'humidité, ainsi que l'évaporomètre de Piche sont placés dans un abri Stevenson qui se trouve à 2 mètres au-dessus du sol.

Température :

- un thermomètre à maximum et un à minimum,
- trois jeux de géothermomètres (pour la température du sol à une profondeur de 0.10, 0.20, 0.30 et 0.50 m), à des endroits naturel, humidifié en surface et inondé,
- un thermographe.

Humidité de l'air :

- un psychromètre à aspiration d'après Assmann, et
- un hygrographe.

Vent :

- un enregistreur mécanique de la vitesse et de la direction de vent à 2 mètres de hauteur.

Rayonnement solaire :

- un indicateur de soleil (HAENNI - Solar 110) pour la transmission électronique des mesures de durée d'insolation. Chaque fois quand le signal du détecteur (spectre : 0.4 ... 1.1 μm) dépasse un seuil, il est interprété comme si le temps est ensoleillé. La valeur du seuil est réglable et mise à 50 W/m^2 . La valeur au-dessus de laquelle un héliographe Campbell-Stokes obtient des enregistrement est comprise normalement entre 140 et 280 W/m^2 .
- un pyranomètre silicone (HAENNI - Solar 118). Cet instrument mesure le courant électrique engendré par une cellule silicone lorsqu'elle est exposée au rayonnement.

Précipitation :

- un pluviomètre association

Evaporation :

- un bac d'évaporation classe A sur sol nu, muni d'un puits de tranquillisation et un écran au-dessus du bac, et
- un évaporomètre Piche.

• Conduite des observations

Chaque jour, à 5 heures et demie et à 16 heures les observations sont faites.

• Traitement

Les calculs de moyennes et d'évaporation sont effectués manuellement. Toutes les semaines un rapport hebdomadaire est rédigé. Après chaque pluie un rapport, donnant les hauteurs de pluie enregistrées à 16 différents postes, est distribué. Un bulletin météo mensuel est publié par la Compagnie Sucrière Sénégalaise à la fin du mois.