
PRINCIPAUX SIGLES ET ABREVIATIONS

- CERAAS** : Centre d'étude régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse
- CIRAD** : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
- CNRA** : Centre national de recherches agronomiques
- DAAD** : Deutscher Akademischer Austausch Dienst (German academic exchange service)
- CSTR** : Coefficient de stress hydrique
- DAPS** : Direction de l'analyse et de la prévision statistique
- DIFN** : Diffuse non interceptance ou radiation non interceptée
- ETM** : Evapotranspiration maximale
- ETo** : Evapotranspiration standard ou de référence
- FAO** : Food and agriculture organization
- FESW** : Fraction évaporable soil water ou fraction d'eau évaporable dans le sol
- FNRAA** : Fonds national de recherches agricoles et agroalimentaires
- FST** : Faculté des sciences et techniques
- FTSW** : Fraction transpirable soil water ou fraction d'eau transpirable dans le sol
- IRES** : Indice de rendement espéré
- ISRA** : Institut sénégalais de recherches agricoles
- JAS** : Jours après semis
- LAI** : Leaf area index ou indice de surface foliaire
- ONG** : Organisation non gouvernementale
- PAR** : Photosynthetically active radiation ou rayonnement photosynthétiquement actif
- RG** : Rayonnement global
- RU** : Réserve utile
- SARRA** : Système d'analyse régionale des risques agroclimatiques
- SARRAH** : Système d'analyse régionale des risques agroclimatiques - version « habillé »
- SIG** : Système d'information géographique
- SLA** : Specific leaf area ou surface foliaire spécifique
- SNRA** : Systèmes nationaux de recherches agricoles
- STR** : Traitement « stress hydrique »
- UCAD** : Université Cheikh Anta Diop de Dakar

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1: Représentation des stades phénologiques de l’arachide (source : Syahbuddin, 2001.)	8
Figure 2 : Modèle de bilan hydrique (source : CIRAD, 2002).	10
Figure 3: Représentation schématique du modèle conceptuel de bilan hydrique et de bilan carbone.	18
Figure 4: Répartition mensuelle de la pluviométrie au cours l’hivernage 2005 (station CNRA de Bambey)	20
Figure 5: Répartition décadaire de la pluviométrie au cours de la période d’expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).	20
Figure 6: Evolution des températures maximale et minimale au cours de l’expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).	20
Figure 7 : Evolution des humidités relatives maximale et minimale au cours de l’expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).....	21
Figure 8: Evolution de la vitesse du vent au cours de l’expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).	21
Figure 9: Evolution du rayonnement global (RG) au cours de l’expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).	22
Figure 10: Evolutions des évapotranspirations de référence (ET _o) et bac A au cours de l’expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).....	23
Figure 11: Schéma du dispositif expérimental de l’essai « Calage SARRAH-arachide 2005 »	25
Figure 12: Droites d’étalonnages de l’humidimètre neutronique (<i>CPN Model 503</i>) au niveau du site expérimental (juillet à octobre 2005, CNRA de Bambey).	33
Figure 13: (a) : Evolution des densités du semis à la récolte. (b) : Evolution de la matière sèche des fanes (MSFanes) en fonction des densités	35
Figure 14 : Evolution de la matière sèche foliaire produite par plante (a) et à l’hectare (b) en fonction des densités au cours du cycle.	36
Figure 15: Evolution de la matière sèche de tiges produite par plante (a) et à l’hectare (b) en fonction des densités au cours du cycle.	37
Figure 16: Evolution de la matière sèche de fanes produite par plante (a) et à l’hectare (b) en fonction des densités au cours du cycle.	37
Figure 17: Evolution de la matière sèche des gousses au cours du cycle.	37
Figure 18: Rendement final en fanes, gousses et graines des deux variétés d’arachide.	38
Figure 19: Evolution de l’indice de surface foliaire (LAI-2000) au cours du cycle.	40
Figure 20: Evolution des surfaces foliaires par plante (a) et du SLA (b) du 44 ^{ème} JAS à la fin du cycle.	41
Figure 21: Evolution des LAI-SF des variétés 55-128 (a) et 55-437 (b) en fonction des densités.....	41

Figure 22: Evolutions comparatives de LAI-2000 et LAI-SF mesuré à densités réelle.	42
Figure 23: Evolutions comparatives de LAI-2000 et LAI-SF à densité de semis (a) et à densité de levée (b).....	43
Figure 24: Evolutions comparatives de LAI-2000 et LAI-SF mesuré à densité de levée avec des valeurs corrigées de SLA.	43
Figure 25: Valeurs re-estimées de LAI à partir des valeurs LAI-2000 et des densités.....	44
Figure 26: Evolution du DIFN au cours du cycle.	45
Figure 27: Evolution de la fraction de lumière transmise (PARt) au cours du cycle.....	45
Figure 28: Evolution comparative du DIFN et du PARt (a) et relation entre DIFN et PARt (b).	46
Figure 29: Evolution des valeurs de Kdf calculées en fonction du DIFN (a) et du PARt (b)..	47
Figure 30: Profils hydriques du sol sur les parcelles 6 (a) et 9 (b) au cours du cycle.....	49
Figure 31 : Evolution de l'ETRj (a) et de la FTSW (b) en fonction des variétés au cours du cycle.	50
Figure 32: Relation entre la biomasse sèche aérienne totale produite (MS Aéro) et l'énergie lumineuse absorbée (PARa) selon les deux variétés : 55-128 (a) et 55-437 (b).	52
Figure 33: Corrélation entre la biomasse foliaire et la biomasse aérienne selon deux variétés (Fleur 11 et 55-437).....	53
Figure 34: Corrélation entre la biomasse des gousses et la biomasse aérienne à partir du 51 ^{ème} JAS jusqu'en fin de cycle selon les deux variétés (55-128 et 55-437).	53
Tableau 1: Déroulement des phases phénologiques au cours de l'expérimentation.	34
Tableau 2: Durée moyenne en temps thermique des 3 principales phases de développement de la variété 55-437.....	34
Tableau 3: Composantes des rendements et analyses ANOVA.....	39
Tableau 4: Valeurs calculées de $K\epsilon_b$ pour les trois principales phases phénologiques.	51
Tableau 5: Récapitulatif des paramètres ajustés du modèle de bilan carbone.	54

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1. PRESENTATION GENERALE DE L'ESPECE.....	3
1.1.1. Origine et classification botanique	3
1.1.2. Mode de reproduction et stades de développement	3
1.1.3. Exigences édapho-climatiques	4
1.1.4. Mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse	5
1.2. PRESENTATION DU MODELE SARRAH.....	6
1.2.1. Définitions générales	6
1.2.2. Description de SARRAH	7
1.2.2.1. Le module phénologique	7
1.2.2.2. Les modules spécifiques de bilan hydrique.....	9
1.2.2.2.1 Evaluation de l'offre en eau	9
1.2.2.2.2. Evaluation de la demande en eau	11
1.2.2.2.3. Evaluation de la contrainte hydrique : Cstr.....	12
1.2.2.3. Les modules spécifiques de bilan carbone	13
1.2.2.3.1. L'interception	13
1.2.2.3.2. La conversion	14
1.2.2.3.3. La partition entre les organes	15
1.2.2.4. Mise en place de la surface foliaire	16
1.2.2.4.1. Densité de peuplement et biomasse initiale	16
1.2.2.4.2. Evolution du LAI	17
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES	19
2.1. INTRODUCTION.....	19
2.2. CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DE L'ESSAI : CLIMAT ET SOL.....	19
2.2.1. Données climatiques	19
2.2.1.1. Pluviométrie	19
2.2.1.2. Températures et humidités relatives.....	20
2.2.1.3. Vitesse du vent et rayonnement global	21
2.2.1.4. Evaporations bac et évapotranspirations potentielles.....	22
2.2.2 Le sol	23
2.3. MATERIEL VEGETAL.....	24
2.4. METHODES D'ETUDE.....	24
2.4.1. Traitements étudiés	24
2.4.2. Dispositif expérimental	25
2.4.3. Conduite de la culture.....	266
2.5. MESURES DES PARAMETRES DE : DEVELOPPEMENT, CROISSANCE ET PRODUCTION.....	27
2.5.1. Suivi de la phénologie	27
2.5.2. Croissance et production de biomasse	27

2.5.3. Développement de l'indice foliaire	28
2.5.4. Rayonnements interceptés par le couvert et transmis au sol	30
2.5.5. Rendement et ses composantes	31
2.6. SUIVI DE L'ETAT HYDRIQUE DU SOL ET CONSOMMATION EN EAU DES PLANTES	31
2.6.1. Principe de suivi du bilan hydrique	31
2.6.2. Réalisation des mesures	32
2.7. ANALYSES STATISTIQUES	33
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	34
3.1. RESULTATS	34
3.1.1. Développement et production	34
3.1.1.1. Phénologie et temps thermiques	34
3.1.1.2. Evolution des densités de peuplement végétal	35
3.1.1.3. Développement des biomasses	36
3.1.1.3.1 Evolutions des matières sèches feuilles et tiges	36
3.1.1.3.2 Evolution de la matière sèche des gousses	37
3.1.1.4. Rendements	38
3.1.1.4.1. Rendement en fanes, gousses et graines	38
3.1.1.4.2. Composantes de rendement	38
3.1.1.5. Développement des surfaces foliaires	39
3.1.1.5.1. Indice de surface foliaire mesuré au LAI-2000	39
3.1.1.5.2. Surfaces foliaires mesurées au planimètre et SLA	40
3.1.1.5.3. Comparaison des mesures de LAI : LAI-2000 – LAI-SF	41
3.1.2. Aspects radiatifs	44
3.1.2.1. Fractions de lumière transmises au sol	44
3.1.2.1.1. Valeurs de DIFN mesurées au LAI-2000	44
3.1.2.1.2. Mesures de PAR transmis au ceptomètre	45
3.1.2.1.3. Comparaison DIFN – PAR transmis	46
3.1.2.2. Valeurs de Kdf	46
3.1.3. Bilan hydrique (Etat hydrique et consommation en eau)	48
3.1.3.1. Etat hydrique du sol	48
3.1.3.2. Consommation en eau des deux variétés et fraction d'eau transpirable du sol	49
3.1.4. Bilan carbone	50
3.1.4.1. Coefficient de conversion du PARa en biomasse sèche : KepsilonB	50
3.1.4.1.1. Variation des coefficients en fonction des phénophases	50
3.1.4.1.2. Relation entre biomasse aérienne produite et énergie lumineuse absorbée	51
3.1.4.2. Dynamique de répartition de la biomasse : les relations allométriques	52
3.1.4.2.1. Partition biomasse foliaire - biomasse aérienne	52
3.1.4.2.2. Partition biomasse gousses - biomasse aérienne	53
3.2. DISCUSSION GENERALE	55
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	60

INTRODUCTION

L'arachide (*Arachis hypogaea* L.) est l'une des principales cultures oléagineuses au monde. Cultivée sur près de 25 millions d'hectares, elle représente environ 12% de la production mondiale des oléagineux alimentaires et au moins 5% des échanges internationaux des produits oléagineux (Schilling, 2002). La production mondiale d'arachides en coques en 2003 est estimée à 36 millions de tonnes, la Chine et l'Inde représentant 59% de cette production. Le Sénégal avec une production pouvant atteindre 1 million de tonnes, est le deuxième producteur africain derrière le Nigeria (FAO, 2003). Au Sénégal, l'arachide occupe une superficie d'environ 1 million d'hectares et tient une place très importante dans l'économie nationale du pays qui participe pour 60% dans les échanges mondiaux d'arachide (DSDIA/DAPS/MAE, 2003). Dans le secteur de l'exportation de l'huile et du tourteau, le Sénégal, malgré un net recul ces dernières années dû à des fluctuations très importantes dans la production et à la crise du secteur arachidier, joue encore un rôle de premier plan avec des niveaux d'exportation souvent supérieurs à 1/3 du marché mondial (43% en 2001 selon la FAO, 2003). Principale culture industrielle, l'arachide constitue une source considérable de revenus pour les populations rurales et concourt largement à l'alimentation humaine et animale. Au Sénégal, la culture de l'arachide est établie depuis un siècle dans les zones sèches (sahéliennes) marquées par une forte variabilité climatique interannuelle. La culture pluviale y étant très largement majoritaire, la sécheresse demeure une contrainte permanente de la production agricole (Ceccarelli et Grando, 1996).

En effet, depuis les changements climatiques intervenus dans les années 70, le Sahel et le Sénégal en particulier enregistrent des périodes de sécheresses récurrentes, marquées par des totaux pluviométriques inférieurs à ceux des années 1950 et une mauvaise distribution spatio-temporelle des pluies (Morel, 1991). Ces anomalies pluviométriques couplées à la baisse de fertilité des sols peuvent se traduire par des diminutions de la production en graines de 60% (Watson et *al.*, 1998) et entravent par conséquent le développement socio-économique des pays sahéliens. Cette situation fragilise de manière persistante les capacités de production agricole de ces pays et le problème se pose de manière particulièrement aiguë en terme d'alimentation voire de survie des populations rurales.

L'aide alimentaire continue de progresser de 5% par an depuis 1980 et l'importation accrue des denrées alimentaires telles que les céréales, compromet l'équilibre des processus de croissance économique.

L'équilibre de la balance des ressources alimentaires reste une préoccupation majeure dans les pays sahéliens, celle-ci s'exprime d'une part par le souci d'autosuffisance et, d'autre part, par la mise en œuvre de réseaux de surveillance destinés à avertir des risques de disettes et des besoins d'aide d'urgence (Bartholomé, 1991). Cependant, ces pays éprouvent encore des difficultés à produire des estimations fiables en temps réel des rendements des principales cultures alimentaires. Un appui efficace des autorités publiques, des ONG et des bailleurs de fonds aux producteurs nécessite avant tout un diagnostic rapide et précoce de la situation de la campagne agricole.

Au Sénégal, le suivi des cultures et l'estimation précoce des rendements agricoles constituent une préoccupation majeure pour les décideurs chargés de gérer et de contrôler les stocks alimentaires et de déclencher en cas de calamités l'état d'urgence pour les zones déterminées à risques. Malheureusement, les méthodes classiques d'enquête utilisées se sont avérées lourdes et coûteuses avec des résultats relativement tardifs (Samba *et al.*, 2001). Cette situation motive la recherche de méthodes de prévision rapides et plus performantes. La combinaison de données d'enquêtes de terrain et de modèles de développement des cultures alimentés par les données météorologiques réelles et prévisionnelles, couplés à des systèmes d'information géographique, constitue une solution pertinente capable de répondre à cette attente (FNRAA, 2004). Ces systèmes de prévision des productions des cultures pourraient être un outil d'aide à la décision pour les autorités dans la planification et l'exécution des politiques agricole, alimentaire et économique.

Notre étude s'inscrit dans l'objectif global de contribuer à la mise en place d'un système de diagnostic rapide et précoce de la campagne agricole pour l'amélioration des systèmes d'alerte des Systèmes nationaux de recherches agricoles (SNRA). Son objectif spécifique est de contribuer à améliorer un modèle de simulation du développement de la culture d'arachide, le modèle SARRAH©CIRAD-arachide, pour qu'il puisse être utilisé parmi les outils de diagnostic précoce de la campagne agricole. L'étude vise à récolter des données sur les développements des biomasses et les consommations hydriques de l'arachide et à les mettre en relation avec les paramètres climatiques, afin d'en tirer des informations pour améliorer les algorithmes de simulation.

Après avoir présenté l'état des connaissances relatives à l'arachide et au modèle SARRAH dans le chapitre 1, les chapitres 2 et 3 présentent respectivement le matériel végétal et les méthodes d'étude utilisés, les résultats obtenus et leur discussion.

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. PRESENTATION GENERALE DE L'ESPECE

1.1.1. Origine et classification botanique

Le centre d'origine du genre *Arachis* se situe très probablement dans la région centre-sud du Brésil (Gregory et al., 1980). La dissémination de l'arachide s'est faite au XVI^{ème} siècle à partir de la côte péruvienne en direction de l'Extrême-Orient d'une part, et à partir de la côte brésilienne en direction de l'Afrique de l'Ouest d'autre part, respectivement par les navigateurs espagnols et portugais (Schilling, 1996).

L'arachide cultivée est une légumineuse de 20 à 70 cm, à fructification souterraine, appartenant à la famille des Fabacées. Toutes les variétés cultivées appartiennent à l'espèce *Arachis hypogaea* L, elle-même subdivisée en deux sous-espèces : *A. hypogaea* subsp. *hypogaea* correspondant au type Virginia et *A. hypogaea* subsp. *fastigiata* correspondant aux types Spanish et Valencia (Clavel, 2004). Le type Virginia regroupe des variétés (*hypogaea*, *hirsuta*) rampantes à érigées, à ramification alterne, à tige principale sans inflorescences, à graines dormantes et à cycle végétatif de 120 à 150 jours. Les types Spanish et Valencia regroupent des variétés (*fastigiata*, *vulgaris*) à port toujours érigé, à ramification séquentielle, à tige principale avec inflorescences, à graines non dormantes et un cycle de 80 à 95 jours.

1.1.2. Mode de reproduction et stades de développement

L'autogamie est le mode normal de reproduction de cette plante à fleurs cléistogames (non ouverture des fleurs avant la fécondation nocturne). Une semaine après la fécondation, la base de l'ovaire s'allonge à travers les pièces florales pour donner naissance au gynophore qui s'enterre verticalement tandis que la gousse en formation prend une position horizontale entre 2 et 7 cm dans le sol. L'arachide est une plante à floraison indéterminée, elle émet entre 600 et 1000 fleurs selon son cycle, mais on distingue ainsi une période de floraison utile, très brève en région sub-sahélienne, au delà de laquelle les produits formés n'arrivent pas à maturité (Schilling, 1996).

Le cycle de développement de l'arachide varie de 80 à 125 jours en région tropicale. Trois grandes phases de développement peuvent être distinguées selon Boote (1982) :

➤ **Germination-début floraison** : c'est une phase durant laquelle la croissance de la plante est exponentielle et entièrement végétative. Sa durée est une caractéristique variétale et dépend aussi du milieu : en climat tropical, elle est en moyenne de 20 à 35 jours, plus courte pour les variétés de type Spanish que pour les variétés tardives de type Virginia (Gillier et Sylvestre, 1969 ; Caron et Granès, 1993).

➤ **Floraison-fructification** : elle correspond au stade où la couverture du sol est au maximum et prend fin lorsque le nombre maximum de gousses est atteint. Pour les variétés hâtives, le nombre de fleurs émises passe par un maximum entre le 25^{ème} et le 35^{ème} JAS et décroît ensuite régulièrement; tandis que pour les variétés tardives, ce maximum est atteint entre le 40^{ème} et le 60^{ème} JAS puis décroît lentement sans s'annuler (Clavel et Gautreau, 2001).

➤ **Fructification-maturation** : cette phase dure entre 30 et 40 jours pour les variétés hâtives et 50 et 60 jours pour les variétés tardives. Cette dernière phase est une période de croissance rapide de la gousse (pod filling) et elle s'achève par la maturation (maturing) (Schilling, 2001).

1.1.3. Exigences édapho-climatiques

Les caractères de structure du sol et sa compacité sont très importants en raison du mode de fructification de l'arachide. Selon Schilling (2001), l'arachide requiert des sols aérés et bien drainés ; les sols sableux ou à texture fine mais meubles et perméables, sont ceux qui la conviennent le mieux. Peu sensible au pH, l'arachide préfère les sols voisins de la neutralité.

Les températures ont un effet très important sur la vitesse des processus physiologiques et sur la durée des différentes phases de développement (Caron et Granès, 1993). L'optimum de température se situe entre 25 et 35°C; les températures de 15 et 45°C sont des extrêmes en deçà et au-delà desquelles la germination est inhibée et la croissance ralentie.

L'arachide est réputée peu sensible à la photopériode, mais les jours longs semblent avoir une influence positive sur le développement et la productivité : les semis précoces sont généralement plus productifs (Ketring et *al.*, 1982 ; Schilling, 2001).

Une pluviosité comprise entre 500 et 1000 mm permet généralement de conduire avec succès une culture commerciale d'arachide. Mais, la répartition des précipitations, ainsi que l'adéquation avec le cycle de la variété choisie, ont une importance fondamentale. L'arachide, bien que tolérante à la sécheresse, présente des phases de sensibilité variables selon le stade physiologique :

La période de préfloraison (0 à 30 JAS) correspond à une phase de bonne résistance à la sécheresse, suivie d'une période de sensibilité maximum (floraison et formation des gousses). La maturation par contre, sera favorisée par une sécheresse relative (Schilling, 2001). La tolérance à la sécheresse de l'arachide conduit souvent à la cultiver dans des zones sub-arides où l'irrigation d'appoint permet de compenser le déficit hydrique et d'améliorer la productivité et la qualité des produits (Annerose et Mayeux, 1995).

1.1.4. Mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse

La résistance d'une plante à la sécheresse caractérise sa capacité de survivre ou de produire en conditions de déficit hydrique. Il existe une large gamme de mécanismes qui ne sont pas exclusifs l'un de l'autre et qui peuvent même être complémentaires (Jones et *al.*, 1980). Diverses classifications des mécanismes de résistance à la sécheresse ont été élaborées et on distingue trois grandes formes d'adaptation à la sécheresse (Levitt, 1980 ; Turner, 1986) :

➤ **L'esquive de la sécheresse (*drought escapers*)** : les variétés capables d'esquiver la sécheresse sont caractérisées par un développement phénologique rapide. Elles ont ainsi la possibilité de boucler complètement leur cycle de développement avant qu'un déficit hydrique important ne se manifeste (De Raissac, 1984). Ceci permet de réduire la durée réelle d'exposition de la plante au stress hydrique (Khalifaoui, 1988 ; Annerose, 1990).

➤ **L'évitement de la sécheresse (*drought avoiders*)** : il regroupe tous les mécanismes de régulation des pertes en eau et de maintien de l'absorption racinaire qui permettent à la plante de maintenir ses tissus à un potentiel hydrique élevé lors d'une sécheresse. En effet, un système racinaire profond et développé est essentiel au maintien de l'absorption hydrique (Chopart, 1980). Les mécanismes de fermeture des stomates, d'enroulement des feuilles et de réduction de la surface foliaire permettent de réguler les pertes en eau de la plante (Samui et Kar, 1981 ; Bunting et *al.*, 1982 ; Bennet et *al.*, 1984 ; Clark, 1986).

➤ **La tolérance à la sécheresse (*drought tolerants*)** : on regroupe sous ce terme les mécanismes qui permettent à la plante de maintenir l'intégrité de ses fonctions métaboliques tout en endurant un déficit hydrique. Les principaux mécanismes de tolérance à la sécheresse sont le maintien du potentiel de turgescence et la tolérance protoplasmique à la dessiccation. L'accumulation active de solutés (glycérol, inositol, sels de potassium, glucose, saccharose, bétaine, proline) dans les tissus cellulaires déshydratés, l'augmentation de l'élasticité des parois cellulaires et la diminution de la taille des cellules contribuent à maintenir la pression

de turgescence cellulaire (Ackerson et Hebert, 1981; Johnson et *al.*, 1984). La tolérance à la déshydratation dépend de la capacité des membranes cellulaires, des protéines membranaires et cytoplasmiques, à résister à la dégradation et à la dénaturation (Turner, 1986).

1.2. PRESENTATION DU MODELE SARRAH

1.2.1. Définitions générales

Un modèle de simulation d'une culture est un ensemble de relations mathématiques qui permet de décrire de façon simplifiée le fonctionnement de la culture dans un milieu donné (Ameziane, 1994). Les modèles de simulation de l'environnement agricole peuvent répondre à diverses demandes des utilisateurs : analyse prospective des changements climatiques, gestion des risques, prévision des récoltes et planification de la politique agricole et alimentaire d'un pays (Whisler, 1986 ; Affholder, 1997). Dans un processus de modélisation, on peut distinguer les étapes suivantes (Diaou, 2003 ; Agossou, 2004) :

- Définition du système à modéliser et des objectifs du modèle ;
- Collecte et analyse des données disponibles sur le système (bibliographie, essai) ;
- Construction du modèle : développement des algorithmes décrivant le système, avec identification des paramètres d'entrée ;
- Calage ou ajustement des paramètres afin d'obtenir des valeurs efficaces ;
- Vérification du modèle consistant à tester sa performance en comparant les résultats calculés par le modèle aux valeurs observées et ayant servi au paramétrage ;
- Validation du modèle consistant à tester sa fiabilité et sa robustesse en utilisant des données indépendantes de celles qui ont servi à sa construction ;
- Analyse de la sensibilité du modèle pour tester sa capacité prédictive.

Notre étude portera essentiellement sur les quatre premières étapes, mais il faut noter que le modèle ne pourra être utilisé dans la pratique qu'une fois vérifié et validé dans un environnement donné.

1.2.2. Description de SARRAH

Le modèle SARRA (Système d'analyse régionale des risques agroclimatiques) simule les indicateurs hydriques de production (IRESP ou indice de rendement espéré), basés sur la consommation en eau réelle et maximale, et par conséquent l'état de confort hydrique de la plante en relation avec les techniques culturales (Forest et Clopes, 1994). La nouvelle version de SARRA, dite SARRAH est un simulateur de la croissance et du rendement potentiel des cultures (mil, sorgho, maïs, palmier, arachide) limités par l'eau (Baron et *al.*, 1999). Ce modèle semi-déterministe intègre en plus de la pluviométrie et l'évapotranspiration, la température moyenne du jour pour calculer les phases phénologiques et le rayonnement solaire pour déterminer l'assimilation du carbone (Dingkuhn et *al.*, 2003).

SARRAH est fondé sur l'assimilation du carbone selon trois processus : l'interception du rayonnement absorbé par la surface foliaire, la conversion du rayonnement intercepté en matière sèche et la répartition de cette biomasse en feuilles, tiges, racines, graines selon les besoins de croissance. A partir de la maturation, la répartition de biomasse s'oriente en priorité vers les graines au détriment des feuilles (Ruget, 1990).

1.2.2.1. Le module phénologique

La phénologie se définit comme étant la chronologie des étapes caractéristiques du cycle de végétation de la plante (Daudet et Haréna, 1990). La connaissance de ces étapes de développement est très importante pour étudier le fonctionnement de la plante. Traditionnellement on découpe ce cycle en phases où cette dynamique suit une même loi, définie par des stades phénologiques.

SARRAH divise le cycle de la culture d'arachide en 3 phases principales:

- Phase juvénile (ou BVP), « basic vegetative period » = $X \text{ d.j}^{-1}$.
- Phase reproductive (ou RPR), « reproductive phase » = $Y \text{ d.j}^{-1}$.
- Phase de maturation (ou Matu) = $Z \text{ d.j}^{-1}$.

D'après Mathieu (1990) cité par Syahbuddin (2001), le cycle des variétés précoces d'arachide de 95 jours en moyenne évolue comme ci-dessous :

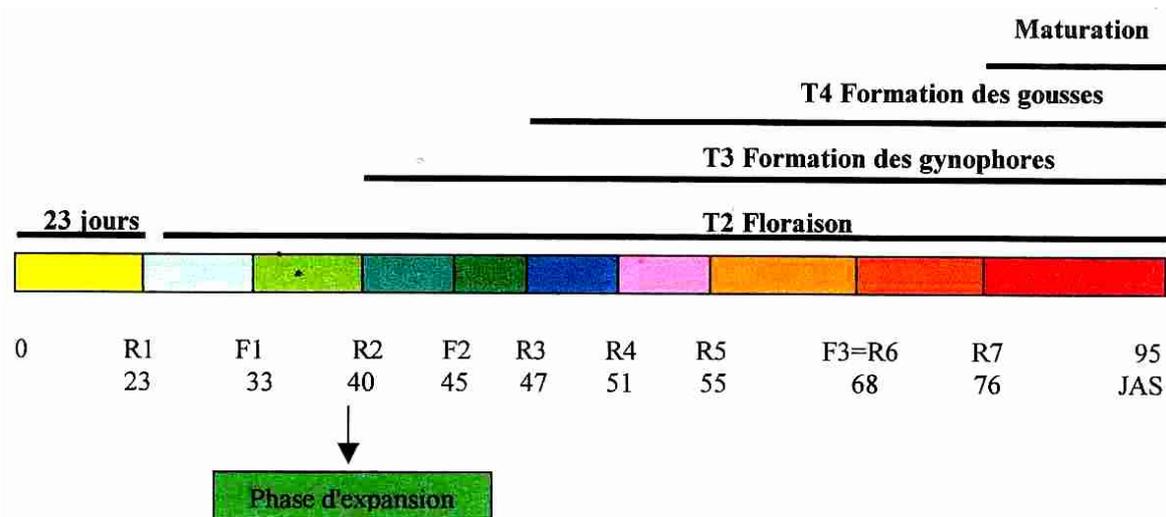


Figure 1: Représentation des stades phénologiques de l'arachide (source : Syahbuddin, 2001).

R1= premières fleurs émises au 23^{ème} JAS,

F1= début de la floraison intensive au 33^{ème} JAS (plus de 3 fleurs par jours),

F2= 50% des fleurs produites au 45^{ème} JAS,

F3= fin de la floraison au 68^{ème} JAS,

R2= premiers gynophores en formation au 40^{ème} JAS,

R3= premières gousses en formation au 47^{ème} JAS,

R4= premières gousses formées,

R5= remplissage et formation des graines au 55^{ème} JAS,

R6= premières graines formées au 68^{ème} JAS,

R7= début de maturation des gousses au 76^{ème} JAS,

JAS = jours après semis.

La température est le facteur environnemental le plus important à prendre en compte pour simuler la phénologie. En effet, elle affecte directement le rendement en influençant les taux de croissance et de développement, la répartition de la matière sèche et la durée du cycle de la culture (Hanks et Ritchie, 1991; Kiniry et Bonhomme, 1991; Bonhomme, 1997).

La vitesse de développement est proportionnelle à la température dans une certaine gamme (entre une température seuil à vitesse de développement nulle appelée température de base ou *K_{temPhase}* et une température maximale) (Ndiaye, 1997 ; Dingkhun & Asch, 1999). Le concept de somme de degrés/jours est utilisé pour rendre compte de cette relation. Pour le calcul du temps thermique nécessaire pour chaque phase de développement de la plante, on considère que la vitesse de croissance augmente linéairement avec la température depuis une

base (*KtempPhase*) jusqu'à un optimum au delà duquel la croissance diminue linéairement et peut même s'annuler (Jones et Kiniry, 1986 ; Brisson et Delécolle, 1991).

Exceptée la phase 2 (PSP) dont la durée dépend de la photopériode quotidienne, toutes les autres phases sont définies par une durée en degré/jours (T° du jour – T° de base) et chaque phase doit donc atteindre un cumul de degré/jours pour passer au stade suivant (Vaksmann et al., 1996 ; Ouattara et al., 1998).

$$\text{Somtemp} = \Sigma [(T_{\max} + T_{\min})/2] - T_{\text{base}} \quad (1)$$

1.2.2.2. Les modules spécifiques de bilan hydrique

Le bilan hydrique dans SARRAH simule plusieurs réservoirs avec pour modification notable la séparation des processus d'évaporation et de transpiration ainsi qu'une évolution dynamique de la demande de la plante symbolisée par le coefficient cultural, en fonction de l'évolution du couvert (LAI) (Sultan et al., 2005).

La simulation du bilan hydrique permet d'évaluer la dynamique de l'eau dans le système plante-sol-atmosphère et de quantifier la satisfaction en eau des cultures à un stade quelconque de leur cycle végétatif (Lacape et al., 1998). Le modèle de bilan hydrique est un ensemble d'équations mathématiques permettant de simuler sur un pas de temps journalier la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) en fonction du climat, des caractéristiques physiques du sol, ainsi que du développement foliaire et racinaire (Samba et al., 2001).

1 2.2.2.1 Evaluation de l'offre en eau

Trois réservoirs sont retenus, permettant d'estimer l'eau disponible selon les processus d'évaporation, de transpiration et de stockage d'eau non accessible encore par les racines :

- Le réservoir de surface de taille fixe, permettant de gérer le processus d'évaporation.
- Le « réservoir sol » jusqu'à la profondeur maximale des racines, évoluant en fonction de la profondeur maximum d'enracinement, permettant de gérer l'offre en eau pour le processus de transpiration. La profondeur maximale racinaire est bornée par le front d'humectation.
- La couche de sol en dessous des racines et jusqu'à la profondeur maximale connue du sol : cette couche peut stocker de l'eau, qui ne sera pas utilisée par la culture.

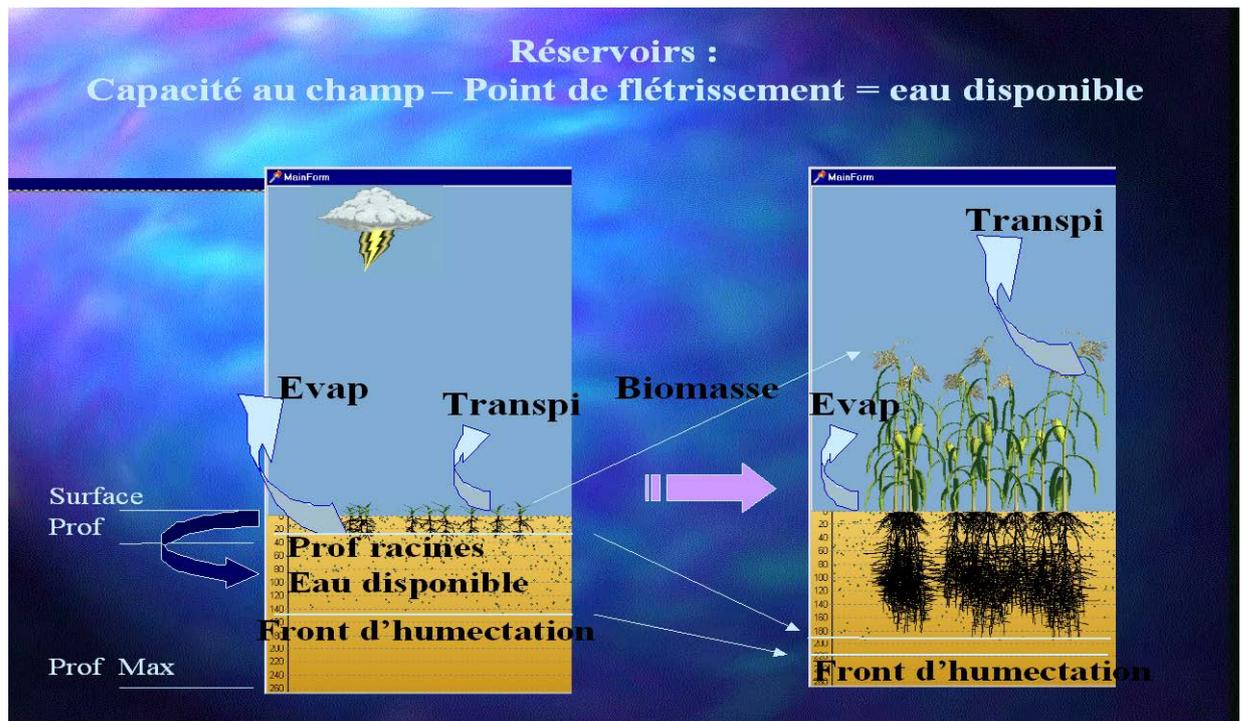


Figure 2 : Modèle de bilan hydrique (source : CIRAD, 2002).

L'évolution du stock d'eau entre deux dates consécutives est calculée à partir de l'équation du bilan hydrique :

$$\text{Stock}_j = \text{Stock}_{j-1} + (\text{Pluie}_j + \text{Irrigation}_j) - (\text{Drainage}_j + \text{Ruissellement}_j + \text{ETR}_j) \quad (2)$$

L'offre est constituée par la fraction d'eau disponible pour la plante dans le réservoir racinaire (FTSW) et la fraction d'eau disponible dans le réservoir de surface (FESW).

$$\text{FTSW} = \text{StockRUR (mm)} / \text{StockRUR Max (mm)} \quad (3)$$

$$\text{StRUR} = \text{StockPER} - \text{Stock pF 4.2PER} \quad (4)$$

$$\text{StRUR Max} = \text{Stock pF 3.0} - \text{Stock pF 4.2} \quad (5)$$

d'où

$$\text{FTSW} = (\text{StockPER} - \text{Stock pF4.2}) / (\text{Stock pF3.0} - \text{Stock pF4.2}) \quad (6)$$

StockRUR est le stock d'eau du réservoir contenant les racines,

StockRUR Max est la quantité d'eau maximale potentiellement transpirable par la plante,

StockPER est le stock d'eau pour une profondeur d'extraction racinaire donnée,

Stock pF4.2 et **Stock pF3.0** sont respectivement les stocks d'eau au point de flétrissement permanent et à la capacité au champ du sol pour une même **PER**.

La fraction d'eau évaporable dans le réservoir de surface (20 cm) est calculée à partir du taux d'humidité du sol (en %) à la capacité de rétention et de la moitié du taux d'humidité du sol au point de flétrissement permanent (Allen et *al.*, 1998).

$$\mathbf{FESW} = (\mathbf{Stock\ pF3.0} - 0.5 \mathbf{Stock\ pF4.2}) * \mathbf{H} \quad (7)$$

Où **H** correspond à la profondeur du réservoir de surface (20 cm).

1.2.2.2.2. Evaluation de la demande en eau

On évalue les besoins en eau ou demande potentielle de la culture à partir des coefficients culturaux (**Kc**) et de la demande climatique (**ETo**). Cette demande intègre deux processus : l'évaporation du sol et la transpiration de la plante. Ces deux processus s'effectuent de façon simultanée et varient en fonction de (**ETo**), du taux de couverture du sol et des phases phénologiques de la plante.

Pour l'évaporation, on considère qu'elle s'effectue sur un réservoir dimensionné (exemple : 20 cm de profondeur) que l'on définit comme réservoir de surface. Un coefficient d'auto mulching (ou de rugosité) permet de réduire l'évaporation du sol. Pour la transpiration, la demande dépend du stade et/ou de l'état de développement de la plante (surface foliaire). Elle s'effectue uniquement sur le réservoir racinaire qui dépend de la vitesse d'enracinement de la plante. Dans ce cas le **Kc** est dissocié en : (**Kctot = Kcp + Kce**).

Kcp : qui ne représente que la demande en transpiration de la plante.

Kce : qui est déduit d'une relation avec le **Ltr** et d'un coefficient de mulch ou auto mulching. **Kcp** et **Kce** évoluent en fonction du taux de couverture du sol par la plante qui détermine le taux de transmission de la lumière.

$$\mathbf{Kcp} = \mathbf{KcMax} * (\mathbf{1} - \mathbf{Ltr}) \quad (8)$$

Avec **Ltr = exp (-Kdf * LAI)** et **Kdf = -ln DIFN/Surf.foliaire**

Ltr est la fraction de radiation transmise au sol et **Kdf** est le coefficient d'extinction du PAR.

LAI est l'indice de surface foliaire et **DIFN** est la fraction de ciel visible sous le couvert.

La transpiration potentielle correspond à une consommation potentielle en eau des cultures lorsque l'eau n'est pas un facteur limitant.

$$\mathbf{Tr} = \mathbf{TrPot} * \mathbf{Cstr} \quad (9)$$

$$\mathbf{TrPot} = \mathbf{Kcp} * \mathbf{ETo} \quad (10)$$

A partir des équations (5), (6) et (7) on obtient:

$$\mathbf{Tr} = [\mathbf{KcMax} * (1 - \mathbf{Ltr})] * \mathbf{ETo} * \mathbf{Cstr} \quad (11)$$

L'évaporation potentielle du sol est fonction des variables \mathbf{Kmulch} , \mathbf{ETo} et \mathbf{Ltr} .

$$\mathbf{EvapPot} = \mathbf{Kce} * \mathbf{ETo} = \mathbf{Kmulch} * \mathbf{Ltr} * \mathbf{ETo} \quad (12)$$

Après avoir simulé une demande potentielle, on évalue la transpiration réelle en faisant intervenir un indice de stress hydrique et l'évaporation réelle du sol en fonction de \mathbf{FESW} .

En séparant la transpiration de l'évaporation, la demande potentielle est réduite d'une part par la contrainte hydrique ($\mathbf{Tr} = \mathbf{TrPot} * \mathbf{Cstr}$) et d'autre part par la fraction d'eau disponible du réservoir de surface, borné par le stock d'eau disponible.

$$\mathbf{Evap} = \mathbf{Min} (\mathbf{EvapPot} * \mathbf{FESW}, \mathbf{StRuSurf})$$

Par simple somme des demandes on a :

$$\mathbf{ETR} = \mathbf{Tr} + \mathbf{Evap} \quad (13)$$

$$\mathbf{ETM} = \mathbf{TrPot} + \mathbf{EvapPot} \quad (14)$$

1.2.2.2.3. Evaluation de la contrainte hydrique : \mathbf{Cstr}

On considère qu'en fonction de (\mathbf{ETo}) et de (\mathbf{FTSW}), la plante va avoir une dynamique de consommation différente. Dans le modèle SARRAH, la contrainte hydrique intervient directement par son coefficient de stress (\mathbf{Cstr}) dans la réduction de la transpiration, de la production quotidienne de matière sèche et dans la sénescence des feuilles lorsque $\mathbf{FTSW} < \text{Seuil Stress}$. Le stress hydrique intervient aussi indirectement via l'indice de compétition, dans la réduction du rendement potentiel si $\mathbf{Ic} < 0.3$ et par le biais de l'humidité de la couche de surface, dans le retard du début de la phase de maturation si le contenu du réservoir de surface est nul.

Pour la transpiration, \mathbf{Cstr} peut se calculer selon 3 procédures :

➤ \mathbf{Cstr} (**pFactor** FAO): $\mathbf{Cstr} = \mathbf{FTSW} / 1 - \mathbf{pFactor} \quad (15)$

Où $\mathbf{pFactor} = \mathbf{parP} + 0.04 * (5 - \mathbf{ETM})$

Avec **parP** : paramètre spécifique à chaque espèce. Il exprime selon Doorenbos et Jassam (1979) un seuil critique d'humidité du sol à partir duquel le stress hydrique réduit linéairement la transpiration.

➤ **Cstr (Eagleman) :**
$$\text{Cstr} = \text{ETR}/\text{ETo} \quad (16)$$

C'est une relation empirique unique pour toutes les plantes, fonction de l'Eto et de la fraction d'eau disponible.

➤ **Cstr (Exponentiel de FTSW) :**
$$\text{Cstr} = 1 / (1 + \exp (-(\text{FTSW}-f)/g)) \quad (17)$$

C'est une relation de type exponentielle qui fait appel à deux paramètres spécifiques de la plante qui doivent donc être calibrés en absence de références. Cette fonction, selon les valeurs de f et g, permet de paramétrer plusieurs formes de courbe de réponse.

Dans toutes ces équations, il n'y a pas de différenciation liée à des effets potentiels de la structure des sols ; on se rapporte de fait à une variable calculée : la FTSW.

1.2.2.3. Les modules spécifiques de bilan carbone

Le modèle de bilan carbone comprend une série d'équations qui décrivent la croissance et le développement de la culture. Le couvert végétal peut être considéré comme un système d'absorption de l'énergie solaire et de transformation de cette énergie en biomasse végétale. Le modèle décrit alors les processus d'interception du rayonnement, de sa conversion en biomasse totale et de la répartition de cette biomasse dans les différents organes de la plante (Dingkhun et *al.*, 1999).

1.2.2.3.1. L'interception

Dans le modèle de simulation du fonctionnement des cultures, l'interception du rayonnement est une variable cruciale pour la prévision de la production en biomasse (Denoroy et *al.*, 2002). Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR variant de 400 à 700 nm) correspond à la partie visible du rayonnement global (RG) (Bonhomme, 1994). C'est une fraction à priori constante du rayonnement global : cette fraction se définit au travers d'un coefficient d'interception KPAR dont la valeur varie de 0.48 à 0.5.

PAR = Kpar * RG (18)

Une fraction du PAR est interceptée, c'est-à-dire absorbée par le couvert (PARa) et c'est elle qui active la photosynthèse. La quantité interceptée et absorbée est fonction de la surface foliaire qui, est communément traduite par le LAI (Leaf Area Index) au niveau du peuplement. La fraction de rayonnement intercepté (EpsilonA, ϵ_a) est déduite du LAI par un

algorithme de type loi de Beer (Varlet-Grancher et *al.*, 1982 ; Gosse et *al.*, 1986 ; Ruget et *al.*, 1990) :

$$\mathbf{PARa} = \mathbf{PAR} * \boldsymbol{\varepsilon}_a = \mathbf{PAR} * (1 - \mathbf{Ltr}) = \mathbf{PAR} * (1 - \exp(-\mathbf{Kdf} * \mathbf{LAI})) \quad (19)$$

Avec $\boldsymbol{\varepsilon}_a = (1 - \mathbf{Ltr})$ qui correspond au coefficient d'absorption du PAR. Ltr est la fraction non interceptée du PAR, c'est-à-dire transmise à travers un couvert végétal d'indice foliaire (LAI) et de coefficient d'extinction de la lumière (Kdf). Le Kdf caractérise la quantité et la disposition des éléments du couvert et la manière dont cela joue dans l'interception du PAR. Il dépend des propriétés géométriques et optiques du couvert et varie entre 0.4 et 0.8 selon la hauteur des plants et l'angle des feuilles, si bien qu'il est faible pour des ports foliaires dressés et élevé pour des feuilles plus ou moins horizontales (Bonhomme, 1994 ; Flenet et *al.*, 1996).

1.2.2.3.2. La conversion

La quantité d'énergie absorbée (PARa) permet la création d'assimilats, mais cette dernière peut être plus ou moins importante suivant le type et l'état du couvert végétal. L'activité photosynthétique peut en effet être contrainte par l'état hydrique et minéral de la plante. On introduit ainsi un coefficient de conversion de l'énergie lumineuse. Ce coefficient correspond à la production en Kg de matière sèche par Mj de PARa (Cavero et *al.*, 2000 ; Collino et *al.*, 2001) et dépend de l'espèce et du type métabolique de la plante (les plantes en C4 ayant des valeurs supérieures à celles en C3) (Gosse et *al.*, 1986 ; Ameziane, 1994). La capacité de conversion de KepsiB ainsi que le coefficient d'assimilation Kassim varient en fonction du stade de développement (Cavero et *al.*, 2000).

L'assimilation potentielle est calculée au niveau du peuplement sans prise en compte de contraintes hydrique et minérale. On définit une relation empirique entre l'activité photosynthétique et le taux de couverture foliaire et un coefficient de conversion de l'énergie lumineuse en matière sèche (KepsiB : Kg.ha⁻¹.j⁻¹.Mj⁻¹).

$$\mathbf{AssimPot} = \mathbf{Kpar} * \mathbf{RG} * (1 - \mathbf{Ltr}) * \mathbf{KepsiB} * 10 * \mathbf{TabKassim} [\mathbf{phase}] \quad (20)$$

A partir des équations (18), (19) et (20) on obtient :

$$\mathbf{AssimPot} = \mathbf{PARa} * \mathbf{KepsiB} * 10 * \mathbf{TabKassim} [\mathbf{phase}] \quad (21)$$

10: facteur de conversion pour obtenir des Kg.ha⁻¹.j⁻¹ à partir de RG (Mj.m⁻².j⁻¹) et KepsiB (g.Mj⁻¹).

La contrainte hydrique est considérée comme un frein à l'accroissement de biomasse et est traduite par l'indice de satisfaction en eau de la plante ($C_{str} = Tr/Tr_{Pot}$).

Le gain quotidien de biomasse ($DayBiomTot$) est fonction de l'AssimPot, du coefficient de stress hydrique C_{str} et de la respiration de maintenance ($RespMaint$) (Ledent, 2000).

$$DayBiomTot = AssimPot * C_{str}Biom - RespMaint \quad (22)$$

$$Soit BiomGain = 0.5 * RG * (1 - Ltr) * K_{epsiB} * 10 * (Tr/Tr_{Pot}) - RespMaint \quad (23)$$

$DayBiomTot$ peut être négatif lorsque la respiration de maintenance excède la photosynthèse brute ; dans ce cas, il n'y a pas d'offre pour la croissance.

Le gain journalier de biomasse ($BiomGain$) est cumulé au cours du cycle pour constituer la biomasse totale du jour j ($BiomTot_j$ en $Kg.ha^{-1}$).

$$BiomTot_j = BiomTot_{j-1} + BiomGain_j \quad (24)$$

La matière sèche accumulée est le résultat d'un bilan entre le gain de carbone grâce à la photosynthèse et la perte de carbone par la respiration cellulaire, d'autres catabolismes et la sénescence. La respiration d'entretien est fonction de la température et réduit la croissance journalière de la biomasse sèche totale (Ruget, 1983 ; Penning de Vries, 1989).

$$RespMaint = K_{respMaint} * BiomTot * [(temp - KtempMaint)/10]^2 \quad (25)$$

$K_{respMaint}$: coefficient de respiration de maintenance

$KtempMaint$: température de référence de respiration de maintenance = 25°C

$temp$: température ambiante.

Le coût de la respiration d'entretien (m) par rapport à la biomasse sèche est estimé par Mc Cree (1970) cité par Ruget (1983) par la formule : $m = RespMaint / BiomTot$ (26)

1.2.2.3.3. La partition entre les organes

Selon les besoins de croissance, la biomasse produite est accumulée vers les organes souterrains (racines, gousses) et/ou aériens (tiges, feuilles). La répartition des assimilats entre les différents organes de la plante suit des règles d'allocation de type allométrique :

➤ **Partition biomasse aérienne-biomasse foliaire**

La partition biomasse aérienne-foliaire n'est à priori pas affectée par le stress hydrique mais varie seulement en fonction des phases phénologiques (Samba et *al.*, 2001). Avant la floraison, la biomasse foliaire est déduite de la biomasse aérienne par la relation :

$$\mathbf{BiomLeaf = BiomAéro * (KpenteLeaf * BiomAéro + KbaseLeaf)} \quad (27)$$

➤ **Partition biomasse totale-biomasse aérienne**

Après la floraison, en se basant sur le concept de compétition, une sénescence des feuilles peut apparaître si l'apport c'est à dire le gain total de biomasse, est inférieur à la demande. La biomasse aérienne est déduite de la biomasse totale par la relation :

$$\mathbf{BiomAéro = BiomTot * (KpenteAéro * BiomTot + KbaseAéro)} \quad (28)$$

➤ **Partition biomasse totale-biomasse racinaire**

La partition d'assimilats entre biomasse totale et biomasse racinaire est donnée par la relation

$$\mathbf{BiomRac = BiomTot * (KpenteRac * BiomTot + KbaseRac)} \quad (29)$$

Kpente et **Kbase** représentent respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine des relations de répartition des biomasses.

1.2.2.4. Mise en place de la surface foliaire

1.2.2.4.1. Densité de peuplement et biomasse initiale

La valeur initiale de la biomasse totale (**BiomIniTot**) correspond au produit de la densité effective de semis (**Densité**), du taux de réserves transformées en biomasse (**KresGrain**) indépendant de la taille de la semence, du poids sec (g) d'un grain (**biomGrain**) et du nombre de grains semés (Pommel, 1990 ; Asch et *al.*, 1999).

$$\mathbf{BiomIniTot = Densité * KresGrain * biomGrain * n \text{ grains semés}/1000 \text{ en Kg/ha}} \quad (30)$$

La densité de semis ajustée par le taux de levée permet de simuler la densité de population.

1.2.2.4.2. Evolution du LAI

Le LAI (« Leaf Area Index ») est un indice de surface foliaire du peuplement. Il se mesure par le rapport entre la surface des limbes (m^2) et la surface de sol. Le LAI est un paramètre déterminant dans la dynamique de croissance de la biomasse et peut donc se déduire de la biomasse foliaire en fonction de la surface massique moyenne (SLA) des feuilles du jour :

$$\mathbf{LAI = BiomLeaf * SLA} \text{ (par unité de surface de sol)} \quad \mathbf{(31)}$$

Le LAI initial (LAIInit) est estimé sur la base de la biomasse initiale (BiomInit) en supposant que la plupart de la biomasse en début de cycle est présente dans les feuilles (60%) (Sarr, 2000).

$$\mathbf{LAIInit = BiomInit * SLA * 0.6} \quad \mathbf{(32)}$$

La SLA est un paramètre clé dans les méthodes de calcul des processus d'accroissement de biomasse s'appuyant sur le LAI pour l'évaluation du processus d'assimilation. Elle est un caractère génétique qui peut être défini par des valeurs minimum et maximum ; et sa dynamique varie en fonction des types de plantes (mono et dicotylédone). (Combres, 2001).

$$\mathbf{SLA = Leaf\ area/BiomLeaf} \quad \mathbf{(33)}$$

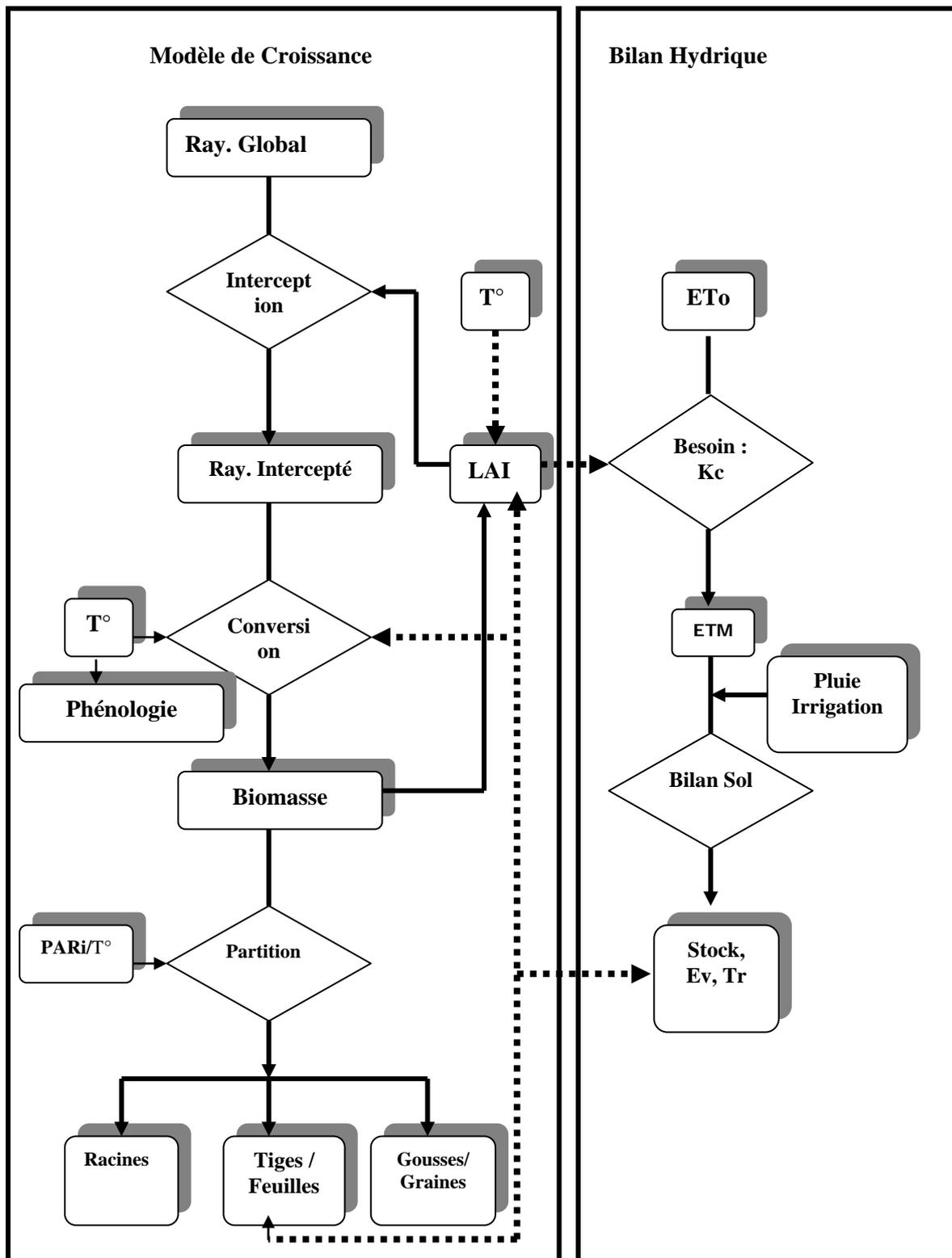


Figure 3: Représentation schématique des modèles conceptuels de bilan hydrique et de bilan carbone.

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1. INTRODUCTION

Le travail exposé dans ce mémoire a été réalisé en 2005 sur la station expérimentale du CNRA de Bambey (14°42'N, 16°28'W, altitude : 20m) situé dans le Centre Ouest du Sénégal. Le climat de cette localité est caractéristique de la zone sahélienne, avec une saison sèche de novembre à mai, marquée par des températures extrêmes de 19 à 40°C, et une saison des pluies de juin à octobre dont le total médian des précipitations est voisin de 430 mm. Les sols, d'appellation locale *dior-modal*, sont caractéristiques des sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés. Il s'agit de sols de type peu évolués constitués d'apport sableux dunaires fossiles à faible teneur en argiles et limons, et dont le pH est compris entre 6 et 6,5.

2.2. CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DE L'ESSAI : CLIMAT ET SOL

2.2.1. Données climatiques

Les données climatiques journalières ont été recueillies sur une station météorologique située dans le même site expérimental (à environ 200 m des essais) : la pluviométrie, les températures maximale et minimale, les humidités relatives maximale et minimale, la vitesse du vent, la durée d'insolation et l'évaporation bac (bac normalisé de classe A) ont été suivies.

2.2.1.1. Pluviométrie

Au cours de l'expérimentation, les apports en eau ont été assurés uniquement par les pluies. La saison des pluies 2005 a duré environ 5 mois (de juin à octobre) et, a été marquée par une pluviosité élevée comparativement à la moyenne interannuelle de la zone nord du bassin arachidier (300-500 mm) avec 678.8 mm d'eau tombée pour 38 jours de pluie. Les mois de juillet et d'août ont été les plus pluvieux avec respectivement 222 mm et 295.1 mm de pluie enregistrés (figure 4). Le cumul pluviométrique de la période d'expérimentation a été de 429.2 mm pour 26 jours de pluies. La pluviosité décadaire a varié entre 0.9 mm et 172.8 mm et on a enregistré de petites poches de sécheresse en fin septembre et mi-octobre (figure 5), correspondant à la phase de fructification-maturation de l'arachide.

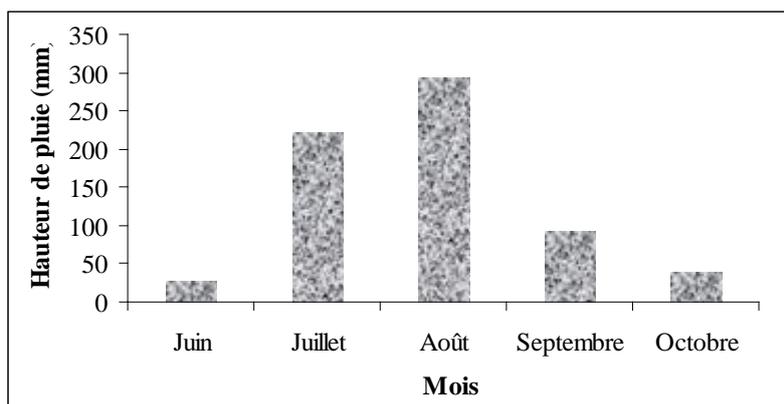


Figure 4: Répartition mensuelle de la pluviométrie au cours l'hivernage 2005 (station CNRA de Bambey)

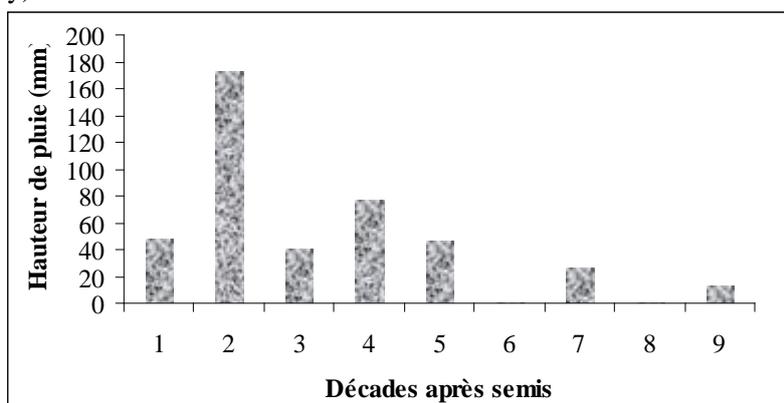


Figure 5: Répartition décadaire de la pluviométrie au cours de la période d'expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).

2.2.1.2. Températures et humidités relatives

Durant la période de culture, les maxima de température ont varié entre 27.5 °C et 40.2 °C et les minima entre 20.6 °C et 26.3 °C (figure 6). Les moyennes journalières des maxima et minima de température ont été respectivement de 34 °C et 23.9 °C.

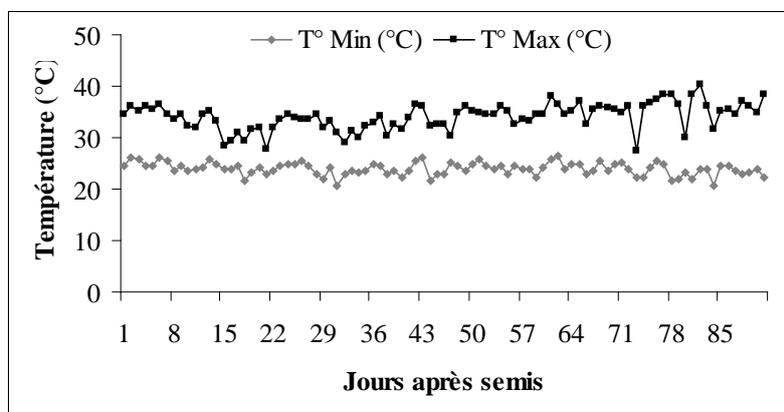


Figure 6: Evolution des températures maximale et minimale au cours de l'expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).

Les humidités relatives maximale et minimale ont augmenté durant la période de culture à cause de l'influence des pluies. Les maxima ont varié entre 92 et 100 % et les minima entre 34 et 94 % (figure 7). Les moyennes journalières des humidités relatives maximale et minimale ont été respectivement de 99.3 % et 62.5 %.

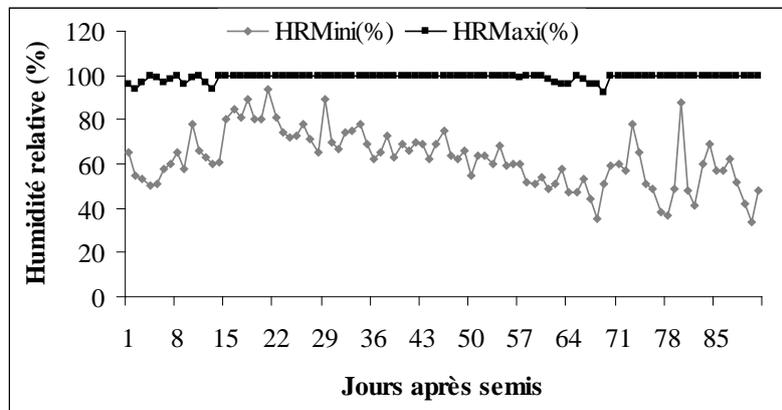


Figure 7 : Evolution des humidités relatives maximale et minimale au cours de l'expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambe).

2.2.1.3. Vitesse du vent et rayonnement global

La vitesse du vent mesurée à 2m du sol a été très variable avec une moyenne de 1.4 m.s^{-1} , elle a fluctué durant l'expérimentation entre 0.8 et 3 m.s^{-1} (figure 8).

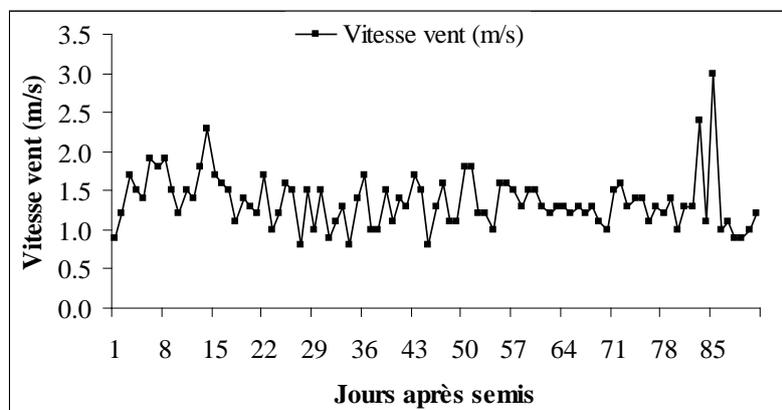


Figure 8: Evolution de la vitesse du vent au cours de l'expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambe).

Le rayonnement solaire global (RG) a été estimé à partir de la durée d'insolation mesurée par un héliographe de type Campbell-Stokes. Il a été calculé à partir de la relation d'Angstrom (appelée également relation de Black-Angstrom ou de Black) (Vaksmann *et al.*, 1992) :

$$\mathbf{RG = I_{ga}*[a + b*(h/H)]} \quad (34)$$

Iga : le rayonnement solaire à la limite supérieure de l'atmosphère, déterminé à partir de la connaissance de la date et de la latitude du lieu (Bonhomme, 1994) ;

a et **b** : coefficients d'ajustement, dont les valeurs dépendent du lieu, voire de la saison, car elles dépendent de la nébulosité moyenne ; les valeurs moyennes préconisées par la FAO sont respectivement de 0.25 et 0.50 pour la zone tropicale. Nous avons utilisé pour le site de Bambey les valeurs suivantes (0.32 et 0.40) préconisées par Diouf (2000).

h et **H** : respectivement la durée réelle d'insolation du jour considéré (en heures et dixièmes d'heure) et la durée astronomique du jour (en heures et dixièmes d'heure) pour la date considérée et la latitude du lieu (Bonhomme, 1994 ; Allen et *al.*, 1998).

Le rayonnement global a été peu stable au cours du cycle de la culture du fait de la couverture nuageuse très variable dans la journée. Avec une moyenne de $19.01 \text{ Mj.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$, le RG a varié entre $10.5 \text{ Mj.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ et $24.4 \text{ Mj.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ au cours de l'expérimentation (figure 9).

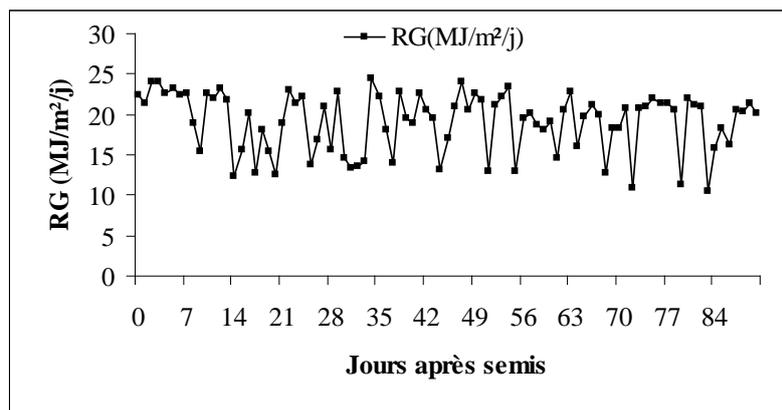


Figure 9: Evolution du rayonnement global (RG) au cours de l'expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).

2.2.1.4. Evaporations bac et évapotranspirations potentielles

Les évapotranspirations potentielles (ETo) journalières, ou évapotranspirations de référence, ont été déterminées à partir des données météorologiques journalières (températures, humidités, vitesse du vent et rayonnement global) par la formule de Penman-Montheith qui est désormais le standard de calcul recommandé universellement (Allen et *al.*, 1998).

Les ETo ont varié de 2.4 à 5.8 mm.j^{-1} avec une moyenne de 4.4 mm.j^{-1} durant la période de culture. En parallèle, les évapotranspirations bac (A) journalières ont varié entre 0.9 et 11.2 mm.j^{-1} (figure 10) avec une moyenne de 5.5 mm.j^{-1} durant la période de culture.

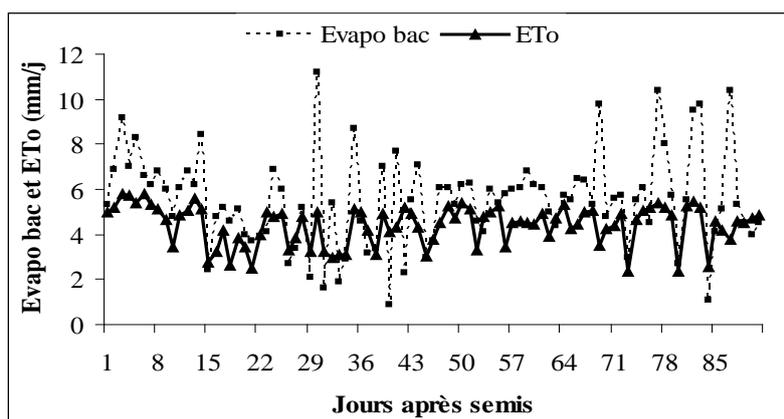


Figure 10: Evolutions des évapotranspirations de référence (ETo) et bac A au cours de l'expérimentation (août à octobre 2005, CNRA de Bambey).

On constate logiquement que dans leur grande majorité, les évaporations bac sont supérieures aux ETo (importance des phénomènes d'advection au niveau du bac).

2.2.2 Le sol

On se réfère ici à des analyses physico-chimiques du site expérimental effectuées en 1997 au laboratoire d'analyse de sol de l'ISRA. Le sol de type *Dior-Deck* (sablo-argileux) est caractérisé par des teneurs faibles en matière organique (0.27 à 0.34%) et en azote (0.16 à 0.19%). La faible teneur en matière organique associée à une teneur en argile également faible (3.5 à 5.6%), se traduit par un complexe adsorbant pauvre (capacité d'échanges cationiques faible, 1.7 à 2.2 meq.100g⁻¹) et un faible pouvoir tampon (pH acide). Cependant, les teneurs en phosphore sont nettement au-dessus des seuils de déficience. La capacité de rétention hydrique est faible en raison du pourcentage élevé de sables (91 à 95%) dans les horizons de surface. En moyenne, l'humidité au point de flétrissement permanent (pF 4.2) est de 14 mm.m⁻¹; elle passe à 134.5 mm.m⁻¹ à la capacité au champ (pF 3), soit une réserve utile maximale de 120.5 mm.m⁻¹ (Sarr *et al.*, 1999). De par ses caractéristiques physico-chimiques, ce sol est représentatif des sols dégradés rencontrés dans la zone (Pieri, 1989 ; cité par Diouf, 2000).

2.3. MATERIEL VEGETAL

Les variétés **55-437** et **55-128** de l'espèce *Arachis hypogaea* L. ont été utilisées :

- La variété **55-437** vulgarisée au Sénégal a été obtenue de l'ISRA ; elle a été sélectionnée en 1955 dans une population d'origine probable sud-américaine reçue de Hongrie. De type botanique Spanish, elle a un cycle végétatif de 90 jours avec un port érigé, de grandes folioles et un groupement excellent des gousses autour du pivot. C'est une variété non dormante, très productive à condition de respecter la densité préconisée qui est de 160000 pieds.ha⁻¹. Son taux de décorticage « TV » est de 75% ; son poids de 100 graines = 35 à 38 g. Elle est très bien adaptée à une saison des pluies courte, et résiste bien à la sécheresse.
- La **55-128** est une variété hybride obtenue du croisement entre les variétés **55-437** et **Chico** (75 jours) pour la sélection de l'allèle de précocité. Avec un cycle végétatif de 80 jours, elle présente des caractères agronomiques intéressants (graines assez grosses et fanes abondantes).

2.4. METHODES D'ETUDE

2.4.1. Traitements étudiés

En pratique, l'essai a été conduit sous régime pluvial strict et seul le facteur variété a été étudié, avec deux niveaux :

- **Niveau 1 : Variété 55-437** vulgarisée au Sénégal, de cycle 90 jours.
- **Niveau 2 : Variété 55-128** hybride sélectionnée non vulgarisée de cycle 80 jours.

En fait le dispositif expérimental prévu initialement, et mis en place, était un split-plot avec 2 facteurs : (1) le régime hydrique à deux niveaux (ETM et Pluvial strict) en grandes parcelles, et (2) les variétés (55-437 et Fleur 11) en petites parcelles. Mais faute de semences disponibles et compte tenu du retard de semis déjà consommé, la 55-128 a été choisie en remplacement de la Fleur 11. Aussi, l'hivernage très pluvieux n'a pas permis de réaliser une différenciation des régimes hydriques. Par ailleurs, lors de la seule petite période sèche (fin septembre jusqu'à mi-octobre), des problèmes avec les rampes d'irrigation n'ont pas permis d'irriguer les parcelles supposées être à l'ETM. Ainsi, toutes les parcelles ont subi un petit stress hydrique. Donc au final aucune différence hydrique n'a été imposée aux parcelles, de sorte que le facteur « traitement hydrique » n'existe pas dans cet essai. Toutes les parcelles ont donc été en pluvial strict avec une petite poche de sécheresse en fin de cycle.

2.4.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est un bloc complet randomisé à 8 répétitions (4 étaient prévues mais sont devenues 8 du fait de la disparition du facteur hydrique) avec les 2 variétés réparties en parcelles élémentaires (soit 16 parcelles). Les parcelles élémentaires espacées de 1,5 m, sont des carrés de 6 m x 6 m soit une surface unitaire de 36 m² avec 12 lignes par parcelle. La détermination du rendement et de ses composantes ainsi que les mesures non destructives ont été réalisées sur un carré central de 2,5 m x 2,5 m au milieu duquel un tube d'accès sonde de 3,60 m de profondeur a été installé avant le semis afin de suivre l'évolution des profils hydriques (figures 11).

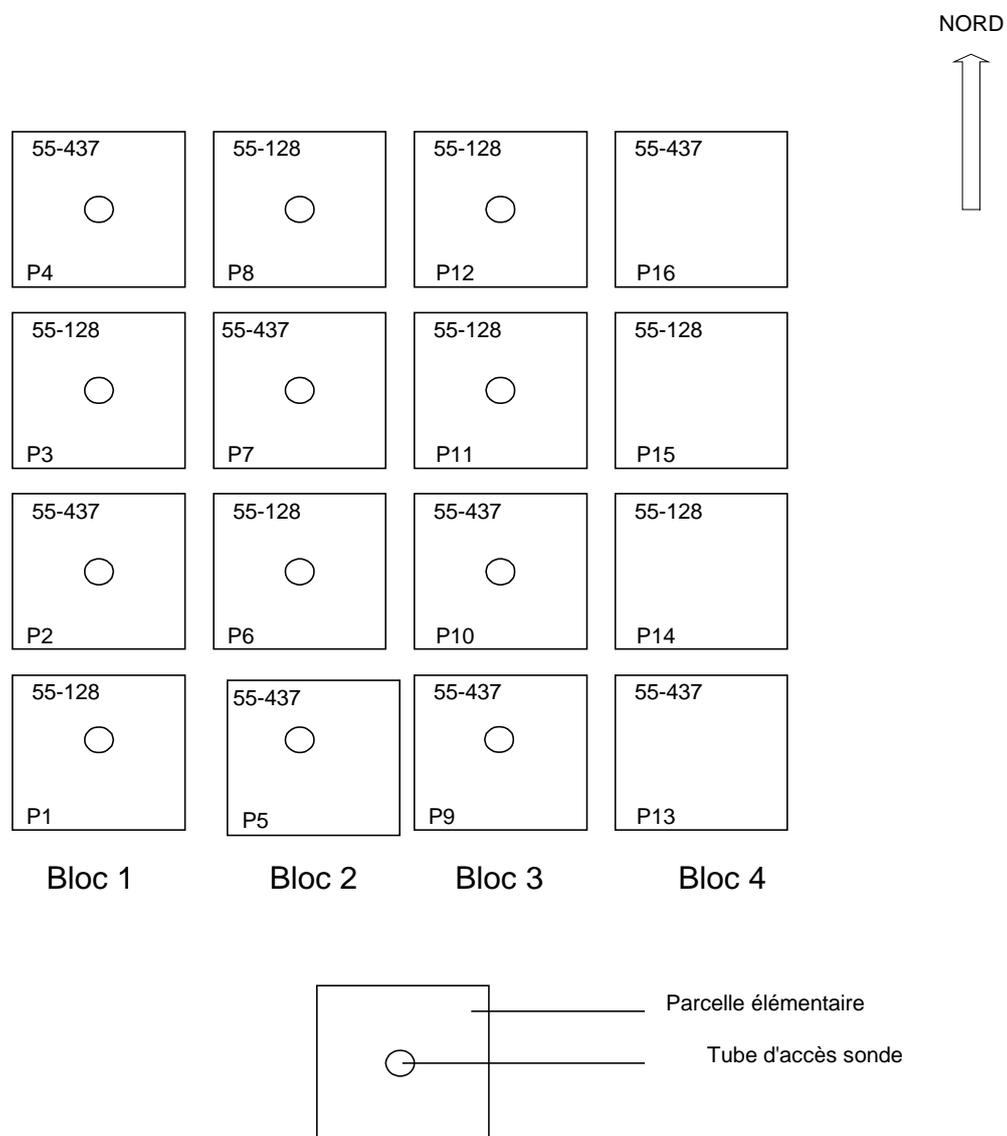


Figure 11 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai « Calage SARRAH-arachide 2005 »

2.4.3. Conduite de la culture

L'essai a été conduit sur un précédent cultural mil en contre saison 2003 suivi d'une jachère 2004. La culture a été mise en place pendant l'hivernage 2005 en semis retardé, afin de pouvoir contrôler l'application d'un déficit hydrique en fin de cycle. Un labour superficiel à sec a été effectué suivi d'un piquetage pour délimiter les parcelles élémentaires et les carrés de rendement. Le semis en humide a été effectué le 02 août 2005 le lendemain d'une pluie de 48.5 mm avec des semences traitées au granox en raison de 2 graines par poquet et des écartements de 50 cm x 15 cm. La levée a été effective au bout de 5 jours après semis.

Le démariage à un pied par poquet a été fait le 16 août 2005 au 14^{ème} jour après semis (JAS) suivi d'un épandage d'engrais ternaire NPK (6-20-10) à la dose de 150 Kg/ha le 18 août 2005.

Les levées n'ont pas été très bonnes (voir paragraphe phénologie dans le chapitre suivant) et malheureusement, faute de semences, il n'a pas été possible de ressemer. Il y a eu ensuite des attaques de maladies et autres (voir ci-dessous). Au final les densités de peuplement ont été faibles et différentes entre les deux traitements. Des sarclo-binages et traitements phytosanitaires ont été assurés à la demande de façon à minimiser l'incidence des adventices, des agents pathogènes et des ravageurs sur la culture.

Au cours de l'expérimentation, un suivi phytosanitaire de la culture a été réalisé de manière à contrôler les attaques des ravageurs et des agents infectieux. Toutefois, en plus des attaques des fourmis, termites et iules, une maladie fongique (pourriture sèche des plants) due à *Macrophomina phaseoli* et un nanisme ou rabougrissement des plants (clump) ont été observés sur l'ensemble des parcelles. Ceci à partir du 44^{ème} JAS (début fructification) jusqu'à la récolte, malgré les traitements préventifs au Décis et au Manèbe à la dose de 2ml.l⁻¹ d'eau. En outre, des enherbements critiques essentiellement par *Cyperus rotundus* ont été observés entre le 30^{ème} et le 72^{ème} JAS malgré les sarclo-binages (tardifs) effectués. En fin de cycle (72 JAS), des attaques de fousseurs-rongeurs (écureuils, rats) ont été observées sur l'ensemble des parcelles où les plantes ont été déterrées et les gousses rongées.

2.5. MESURES DES PARAMETRES DE : DEVELOPPEMENT, CROISSANCE ET PRODUCTION

2.5.1. Suivi de la phénologie

Un suivi régulier des différents stades de développement a été réalisé sur les parcelles élémentaires. Les densités de levée à 16 jours après semis ont été déterminées précisément sur chaque parcelle, à la fois pour le carré de rendement et pour le reste des parcelles (hors carré). La floraison a été suivie pour déterminer la date de 50% floraison (en agronomie la levée et la floraison sont considérées atteintes lorsqu'elles ont été observées sur 50% des poquets). Les dates de formation et de maturité des gousses ont été estimées par l'étude régulière de 5 pieds par parcelle prélevés chaque semaine pour les suivis de biomasses produites.

Les densités à la récolte ont été déterminées sur les carrés de rendement (à partir des nombres de plants présents). Sachant qu'aucun prélèvement n'a été effectué sur les carrés durant le cycle de développement (les prélèvements pour les suivis de développement des biomasses ont été faits en dehors des carrés), les différences de densités entre la levée et la récolte sur les carrés de rendement sont donc à attribuer uniquement aux problèmes phytosanitaires. Ces données nous ont permis de calculer, pour chaque parcelle, le taux de mortalité globale par maladie et autres, ainsi que, par un modèle linéaire simple fonction du temps, les évolutions des densités sur les parcelles de la levée à la récolte.

Les évolutions des densités des zones hors carré de rendement ont également été déterminées : en procédant de la même façon et en tenant compte en plus des prélèvements (5 pieds par semaine) effectués chaque semaine pour les mesures de biomasses.

2.5.2. Croissance et production de biomasse

La production de biomasse sèche aérienne totale et sa répartition entre les différents organes (feuilles, tiges, gousses et graines) ont été suivies chaque semaine à partir du 16^{ème} JAS jusqu'à la récolte soit 12 dates de prélèvements. Pour cela cinq (5) pieds ont été prélevés de façon aléatoire sur chaque parcelle (hors carré de rendement) chaque semaine. Après séchage au soleil en serre (4 jours) puis à l'étuve à 85°C pendant 48 h, les mesures des poids secs des feuilles, tiges, gousses et graines ont été réalisées. Ces mesures ont permis de suivre l'évolution de la biomasse produite tout au long du cycle de développement des cultures.

2.5.3. Développement de l'indice foliaire

Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer l'évolution de l'indice de surface foliaire (LAI) du couvert végétal, qui est la surface des feuilles par unité de surface de sol: une méthode indirecte, par utilisation d'un appareil appelé LAI-2000 (©LICOR) qui permet des mesures rapides, nombreuses, et donc de faire facilement le suivi du développement foliaire d'un couvert et une méthode directe, par prélèvement de plantes, puis détermination de la surface réelle des feuilles par un planimètre optique au laboratoire.

Les mesures au LAI-2000 sont les plus couramment pratiquées, mais la mesure directe est ce qui doit faire référence : il convient donc d'avoir quelques mesures directes pour corriger les valeurs de LAI-2000, à moins de travailler au LAI-2000 en respectant une méthodologie extrêmement rigoureuse et standardisée dont on connaît déjà la précision en relation aux mesures directes. Au préalable de l'étude, seules étaient envisagées des mesures au LAI-2000 car il y avait des problèmes de planimètre optique. Nous avons pu cependant en réaliser aux 44, 58, 72 et 86^{ème} jours après semis et malheureusement on n'a donc pas de mesures directes pour le début du cycle.

➤ Mesures indirectes au LAI-2000 :

Le LAI-2000 (Model *LAI-2000, Li-cor, Inc., Lincoln, Nebraska 68504, USA*) permet la mesure du LAI et de la fraction de rayonnement transmise au sol (DIFN). Ces variables ont été mesurées une fois par semaine du 16^{ème} au 86^{ème} JAS entre 7H et 9H du matin (comme cela est recommandé). L'appareil calcule automatiquement le LAI et le DIFN à partir de la mesure du rayonnement par un détecteur optique (148° de champ visuel).

Son principe repose sur la différence entre le flux quantique mesuré au-dessus de la canopée et celui mesuré en différents points sous la canopée. Ainsi, la pénétration du rayonnement solaire à travers le couvert, fournit une estimation fiable de la structure des canopées.

Dans la pratique, au niveau de chaque parcelle, trois séries de mesures sont effectuées, et chacune est composée de :

- ❖ une mesure de la radiation incidente, effectuée au-dessus du couvert ;
- ❖ 4 mesures de la radiation transmise (arrivant au sol), effectuées en dessous du couvert le long des diagonales formées par 4 poquets.

Au total l'appareil considère 12 couples de mesures (radiation incidente, radiation transmise) à partir desquels il calcule le LAI moyen et le pourcentage moyen de radiation transmise au sol à travers le couvert végétal (DIFN).

➤ **Mesures directes par prélèvements et planimètre :**

Les mesures directes ont été réalisées aux 44, 58, 72 et 86^{ème} jours après semis, dans le but d'obtenir des valeurs « vraies » de LAI que l'on puisse comparer aux valeurs de LAI-2000. Les mesures directes étant relativement fastidieuses et nécessitant d'aller très vite afin de mesurer les surfaces des feuilles (folioles pour l'arachide) avant qu'elles ne commencent à s'enrouler par dessèchement, on a mis au point un processus de mesure portant sur une partie simplement des feuilles. Pour chaque parcelle on a procédé ainsi :

- ❖ prélèvement de 5 pieds au hasard, qui sont amenés au laboratoire pour l'ensemble des mesures de biomasses. On détache l'ensemble des folioles (on ne prend strictement que les folioles),
- ❖ on pèse l'ensemble des folioles (PF TotF), puis on en sélectionne au hasard une partie en constituant un échantillon aliquote représentatif (environ 1/4 à 1/3 de l'ensemble), que l'on pèse immédiatement (PF AliqF) : les deux pesées sont donc faites alors que les folioles sont dans le même état,
- ❖ on mesure au planimètre optique la superficie totale des folioles de l'aliquote (SF AliqF),
- ❖ on remet les folioles de l'aliquote avec l'ensemble, de façon à reconstituer la biomasse foliaire totale des 5 pieds, pour continuer le traitement des biomasses.

La mesure de la surface totale de l'aliquote (SF AliqF) et les deux pesées (PF TotF et PF AliqF) permettent de calculer la surface foliaire totale des 5 pieds (SF TotF) :

$$\mathbf{SF\ TotF = SF\ AliqF \times PF\ TotF / PF\ AliqF} \quad \mathbf{(35)}$$

PF TotF : poids frais total des folioles détachées des 5 pieds prélevés sur la parcelle

PF AliqF : poids frais de l'aliquote et SF AliqF : superficie des folioles de l'aliquote

SF TotF : surface foliaire totale des 5 pieds.

Le planimètre utilisé est le *Delta-T MK2 (de type AMS, Devices, Ltd, Cambridge, England)*. L'appareil de mesure est muni d'un tapis roulant (système de convoyeur avec deux courroies transparentes) où sont déposées les folioles et d'une caméra qui restitue l'image sur un écran et la surface balayée est calculée automatiquement et affichée sur l'écran. Avant chaque mesure, l'appareil est préalablement étalonné à l'aide de disques de surface connue (10 cm² et 50 cm²).

La connaissance de la surface foliaire permettra de calculer la surface foliaire spécifique ou surface massique des feuilles (**SLA**) en divisant la surface totale des feuilles par leur poids sec. Pour quantifier l'offre réelle pour la croissance des graines, seules les feuilles vertes doivent être prises en compte dans le calcul de la **SLA**.

2.5.4. Rayonnements interceptés par le couvert et transmis au sol

Dans les modèles de simulation du fonctionnement des cultures, l'interception du rayonnement est une variable cruciale pour la prévision de la productivité en biomasse (Deneroy et *al.*, 2002). Deux méthodes sont souvent utilisées pour estimer l'interception du rayonnement par le couvert : par le LAI-2000 donnant le DIFN (rayonnement diffus) et par le ceptomètre donnant les PAR incident (PARi), PAR transmis (PART) et, par différence PAR intercepté et absorbé (PARa).

L'interception du rayonnement a été estimée à partir des mesures au ceptomètre réalisées entre 13 h et 16 h. Le ceptomètre utilisé (*Décagon devices, Inc., Pulman WA*) est un appareil portable permettant d'effectuer des mesures instantanées du flux quantique au-dessus et en dessous des cultures. Il comprend :

- Une sonde photosensible, règle à face de mesure blanche, longue de 80 cm et constituée de 80 capteurs (photodiodes). Moyennant une sélection préalable de l'option adéquate, la mesure du flux quantique qui traverse le couvert végétal, peut être effectuée sur toute la longueur de la sonde ou seulement à partir de la pointe de celle-ci.
- Un boîtier muni de trois commandes (la commande de gauche permet de choisir les fonctions, celle du milieu permet d'enregistrer les données et celle de droite sert à effectuer les moyennes) et d'un écran digital affichant les valeurs mesurées.

Son principe consiste en une mesure de la fraction du rayonnement solaire qui pénètre dans la canopée à travers les éclaircis du feuillage, permettant une estimation fiable de l'architecture

des couverts végétaux. Elle est exprimée en rayonnement photosynthétiquement actif (**PAR** en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) et portion de la sonde photosensible exposée aux rayons solaires (pourcentage de tâches solaires). Dans la pratique, au niveau de chaque parcelle, on procède de la même manière que pour le LAI-2000 pour la réalisation des mesures.

2.5.5. Rendement et ses composantes

A la récolte, le nombre de plants présents sur le carré de rendement a été compté pour la détermination de la densité à la récolte. Après deux semaines de séchage des bottes au soleil, les différentes parties des plantes (fanés, gousses et graines) ont été pesées séparément. Les rendements en fanés, gousses et graines ont été calculés puis ramenés à l'hectare. Les composantes du rendement tels que le nombre de plants.ha⁻¹, le taux de gousses endommagées, le taux de décorticage « tout venant (TV) », le taux de décorticage « semences », le nombre de gousses et de graines semences et le poids de 100 graines ont été déterminés pour les deux variétés étudiées.

2.6. SUIVI DE L'ETAT HYDRIQUE DU SOL ET CONSOMMATION EN EAU DES PLANTES

2.6.1. Principe de suivi du bilan hydrique

Le suivi de l'état hydrique du sol permet d'établir le bilan hydrique de la culture et, par la suite, de caractériser la cinétique de la consommation en eau des plantes. L'équation du bilan hydrique de la culture entre deux dates est la suivante :

$$\mathbf{ETR} = \mathbf{P} + \mathbf{I} - \mathbf{R} - \mathbf{D} + \mathbf{RC} - \Delta\mathbf{stock} \quad (36)$$

ETR : la consommation en eau des plantes ou évapotranspiration réelle, sur la période ;

Δstock = **Stock_t** - **Stock_{t-1}** : la variation de stock d'eau du sol entre deux dates de mesures ;

P et **I** : apports en eau par les pluies et les irrigations ;

R : le ruissellement et **D** : le drainage en dessous de la zone de sol contrôlée ;

RC : les remontées capillaires.

Les parcelles ont été entourées de buttes dès la levée de façon à éliminer les ruissellements. Par ailleurs l'hivernage ayant été important il est certain qu'il n'y a pas eu de remontée capillaire. Au contraire nous verrons que nous avons eu des drainages.

L'équation (45) se simplifie donc ainsi :

$$\mathbf{ETR = P - D - \Delta stock} \quad (37)$$

Dans le bilan hydrique, l'offre est constituée par la fraction d'eau disponible pour la plante dans le réservoir racinaire (FTSW) et la fraction d'eau disponible dans le réservoir de surface (FESW). La FTSW est calculée à partir des équations 3 et 6 (chapitre précédent).

$$\mathbf{FTSW = StockRUR (mm) / StockRUR Max (mm)}$$

$$\mathbf{FTSW = (StockPER - Stock pF4.2) / (Stock pF3.0 - Stock pF4.2)}$$

2.6.2. Réalisation des mesures

Les mesures hebdomadaires de la teneur en eau du sol ont été effectuées tous les 10 cm jusqu'à 3,60 m de profondeur et ceci du semis à la récolte sur 12 parcelles (3 blocs) à l'aide d'un humidimètre ou sonde à neutrons (*CPN Corporation Model 503, 2830 Howe Road Martinez, CA.USA :94553*). Pour cela, un tube d'accès (PVC) de 3.60 m de profondeur a été installé avant semis au milieu de chaque parcelle afin de suivre l'évolution de l'humidité du sol. Le principe de mesure est basé sur le fait que les neutrons sont réfléchis par la présence dans le milieu de noyaux d'hydrogène (Henin, 1977). Les neutrons réfléchis sont détectés en retour par un détecteur-compteur. Plus le comptage est élevé, plus les neutrons ont été réfléchis, et donc plus le sol contient de molécules d'eau. Mais il faut posséder une relation d'étalonnage qui permet de passer précisément des comptages neutroniques aux humidités volumétriques dont les valeurs qui font référence doivent être déterminées par la méthode gravimétrique. Pour les horizons inférieurs à 20 cm de profondeur, la gravimétrie a été effectuée pour estimer l'état hydrique du sol compte tenu des valeurs erronées fournies par la sonde sur les horizons superficiels (0-10 cm et 10-20 cm) et des risques d'irradiation de l'opérateur.

A chaque expérimentation, un étalonnage des tubes de sonde doit être réalisé : il s'agit d'établir la relation liant les comptages neutroniques (CN) aux humidités volumiques (Hv) :

$$\mathbf{Hv = a * CNC + b} \quad (38)$$

$$\mathbf{CNC = CN/Cétui * 1000} \quad (39)$$

CNC : Comptage neutrons corrigés ;

Cétui : comptage « étui » : comptage réalisé dans l'appareil, hors tube.

Le ratio CNC (« comptage corrigé ») est utilisé de préférence au comptage (CN) de façon à tenir compte des petites variations possibles du fonctionnement de l'appareil.

Les humidités volumiques (**Hv**) pour la calibration ont été obtenues à partir des humidités pondérales (**Hp**) mesurées par gravimétrie jusqu'à 3,60 m de profondeur : d'une part en sol sec (avant premières pluies pour avoir des « points secs »), d'autre part en sol humide (48 h après une pluie ou irrigation importante pour avoir des « points humides ») :

$$\mathbf{H_p} = [(\mathbf{PF} - \mathbf{PS})/(\mathbf{PS} - \mathbf{PV})] * 100 \quad (40)$$

$$\mathbf{H_v} = \mathbf{H_p} * \mathbf{d_a} \quad (41)$$

PF : poids frais d'échantillon de sol ; **PS** : poids sec du même échantillon ; **PV** : poids vide de la tare et **da** : densité apparente du sol. On a utilisé des valeurs de densité apparente (**da**) établies localement lors d'études précédentes (Siéné, 2003) : **1.45** pour l'horizon 0-10 cm ; **1.50** pour 10-20 cm ; et **1.57** pour 20-360 cm.

Le résultat de l'étalonnage est présenté en figure 12 : deux droites d'étalonnage ont été établies : pour l'horizon 10-20 cm et pour les autres horizons (20-360 cm).

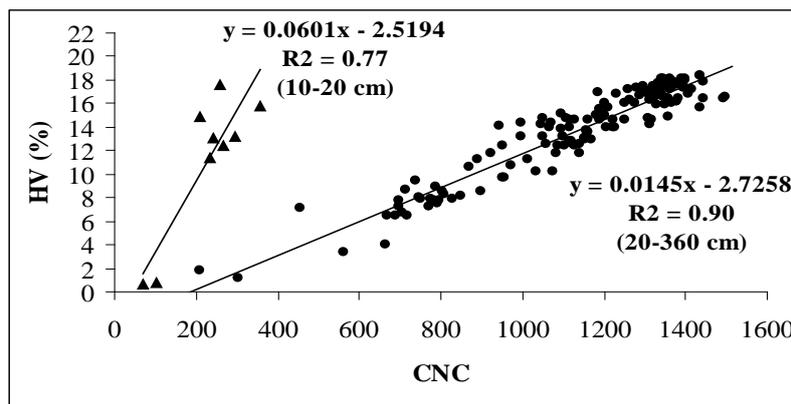


Figure 12: Droites d'étalonnages de l'humidimètre neutronique (*CPN Model 503*) au niveau du site expérimental (juillet à octobre 2005, CNRA de Bambey).

2.7. ANALYSES STATISTIQUES

Les données brutes ont été traitées sur le logiciel Microsoft office Excel 2003 qui a servi également à construire les graphiques. Les analyses statistiques des variables mesurées et calculées ont été effectuées à l'aide du logiciel SAS/STAT (*Statistical Analysis System, version 6.11 USA*). Les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur : la variété. Le test de classement des moyennes de Student Newman Keul's au seuil de 5% a été utilisé afin de déceler des différences significatives entre les deux traitements.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. RESULTATS

3.1.1. Développement et production

3.1.1.1. Phénologie et temps thermiques

Le tableau 1 présente les phases de développement des deux variétés d'arachide utilisées au cours de l'expérimentation. Il n'y a pas de différence significative dans le déroulement des phases entre les variétés 55-128 et 55-437. En effet, les débuts de levée et de floraison et les 50% de floraison ont été enregistrés respectivement aux 4^{ème}, 21^{ème} et 27^{ème} JAS. Les deux variétés se sont distinguées au cours de la phase fructification-maturation où 55-128 a été un peu plus précoce que 55-437. En outre, on a enregistré un allongement de 10 jours de la durée de culture au cours de l'expérimentation pour avoir une bonne maturité des gousses.

Tableau 1: Déroulement des phases phénologiques au cours de l'expérimentation.

Stades phénologiques	Début levée (JAS)	Début floraison (JAS)	Dates de 50% floraison (JAS)	Début formation Gousses (JAS)	Maturation physiologique (JAS)
55-128	4	21	27	52	80
55-437	4	21	28	55	90

Les sommes des températures (durées en temps thermique) des trois principales phases de développement de la culture ont été calculées à partir de l'équation 1 et correspondent respectivement à $TabSeuilTempBVP$, $TabSeuilTempRPR$, $TabSeuilTempMatu$. Pour le calcul du temps thermique nécessaire pour chaque phase de développement de la plante, la température de base ($KtempPhase$) retenue est 13°C (Combres, 2001).

Tableau 2: Durée moyenne en temps thermique des 3 principales phases de développement de la variété 55-437.

Phases phénologiques	Somme de températures (°C.j ⁻¹)
Phase végétative (<i>BVP</i>)	$(TabSeuilTempBVP) = 466$
Phase de reproduction (<i>RPR</i>)	$(TabSeuilTempRPR) = 871$
Phase de maturation (<i>Matu</i>)	$(TabSeuilTempMatu) = 1082$

3.1.1.2. Evolution des densités de peuplement végétal

Semées toutes selon une densité potentielle de 133333 pieds à l'hectare (densité de semis après démariage à 1 pied par poquet), les parcelles ont montré de grandes différences de densités dès la levée. La variété 55-128 a été plus affectée que la 55-437 : 40% et 15% respectivement de pertes à la levée en moyenne. Et malheureusement il n'a pas été possible de ressemer par faute de semences disponibles. Ces différences de densités se sont donc répercutées sur tout le cycle de développement des cultures. Les deux variétés ont ensuite montré des différences de sensibilité aux maladies et dégâts divers endurés pendant la période de culture : de la levée à la récolte les taux de perte ont été respectivement de 33% pour la 55-128 et 24% pour la 55-437. Ainsi, au total, on a enregistré du semis à la récolte respectivement 59 et 35% de perte de pieds pour les variétés 55-128 et 55-437 (figure 13a).

Ces pertes sont très importantes et il est donc vraiment nécessaire de tenir compte des densités réelles lors de l'analyse des biomasses. La figure 13b montre à quel point les résultats peuvent être différents selon que l'on tienne compte de la densité théorique (de semis), de la densité initiale (à la levée) ou de la densité réelle qui diminue fortement au cours du cycle. Cette chute de la densité se traduit par une diminution de même ordre de la quantité de la matière sèche produite (au 86^{ème} JAS, la variété 55-437 a produit 4434 Kg/ha de fanes sèches à la densité de semis contre 2941 Kg/ha à la densité réelle, soit une perte de 35% du semis à la récolte).

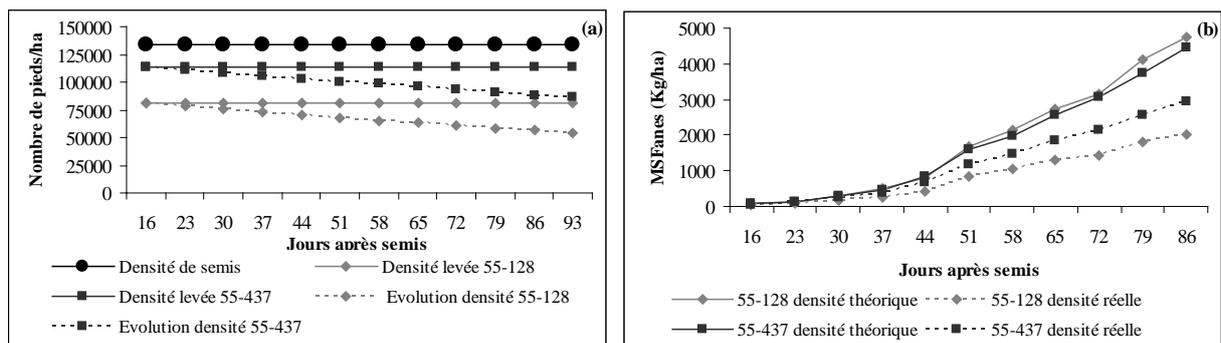


Figure 13: (a) : Evolution des densités du semis à la récolte.

(b) : Evolution de la matière sèche des fanes (MSFanes) en fonction des densités.

3.1.1.3. Développement des biomasses

3.1.1.3.1 Evolutions des matières sèches feuilles et tiges

On présentera à chaque fois les évolutions des valeurs de matière sèche produite par plante (mesurées chaque semaine à partir de 5 plantes) et les valeurs ramenées à l'hectare en tenant compte des densités réelles. Cela concerne les feuilles, les tiges, et les fanes (Feuilles+tiges).

Toutes les figures relatives aux valeurs par plante (figures 14a, 15a et 16a) indiquent que l'évolution des biomasses (feuilles, tiges, fanes) s'est effectuée de façon classique en deux phases : une phase de croissance lente de la levée à la floraison (37 JAS) et une phase de croissance rapide de la floraison à la fin du cycle de culture. On ne note pas de phase de décroissance du fait de la croissance indéterminée de l'arachide, ni de période de stress apparente (courbes bien régulières).

L'analyse statistique des valeurs par plante n'a fait cas d'aucun effet variétal significatif quant à l'évolution de la biomasse sèche des feuilles, tiges et fanes au cours du cycle. Les deux variétés ont produit les mêmes quantités de matière sèche aérienne par plante avec un rendement moyen de 34g de fanes sèches par plante en fin de cycle (86 JAS).

Par contre, en tenant compte des densités réelles qui diminuent fortement (mais différemment entre les deux variétés) au cours du cycle, il apparaît une différence significative entre les deux variétés en terme de rendement en matière sèche aérienne à l'hectare (figures 14b, 15b et 16b). En effet, au 86^{ème} JAS, avec une densité moyenne de 86447 pieds.ha⁻¹, la variété 55-437 a été plus productive avec un rendement moyen en fanes de 2941 Kg.ha⁻¹ comparativement à la variété 55-128 qui, avec une densité plus faible de 54200 pieds.ha⁻¹, a eu un rendement moyen en fanes de 2003 Kg.ha⁻¹. Il ressort de cette analyse que la densité de peuplement est une composante essentielle dont il faut tenir compte pour les analyses de croissance.

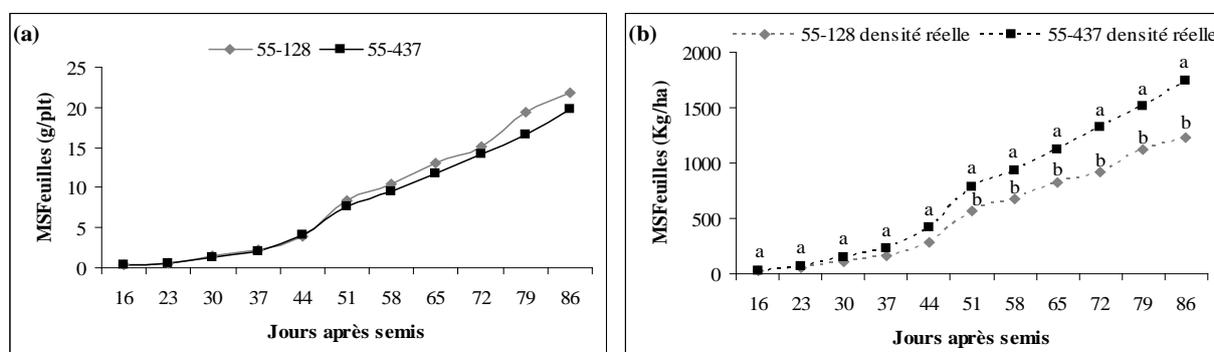


Figure 14 : Evolution de la matière sèche foliaire produite par plante (a) et à l'hectare (b) en fonction des densités au cours du cycle.

(Pour une date donnée, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%, test de Student Newman Keul's).

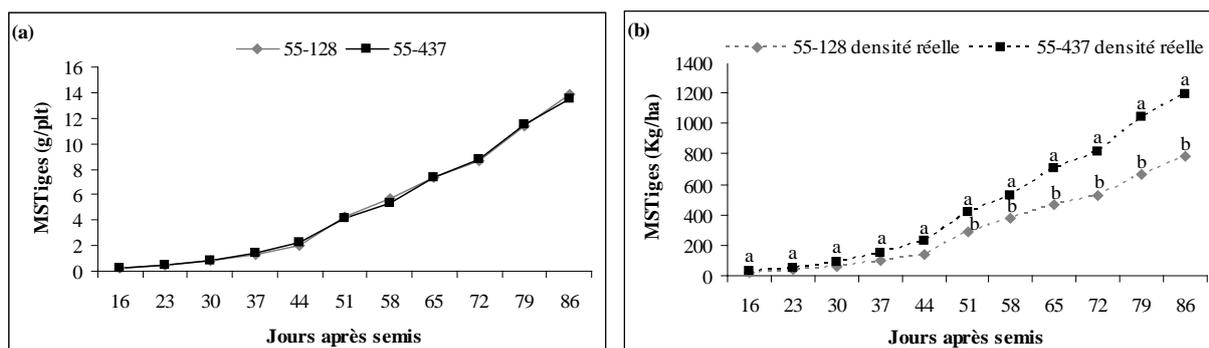


Figure 15: Evolution de la matière sèche de tiges produite par plante (a) et à l'hectare (b) en fonction des densités au cours du cycle.

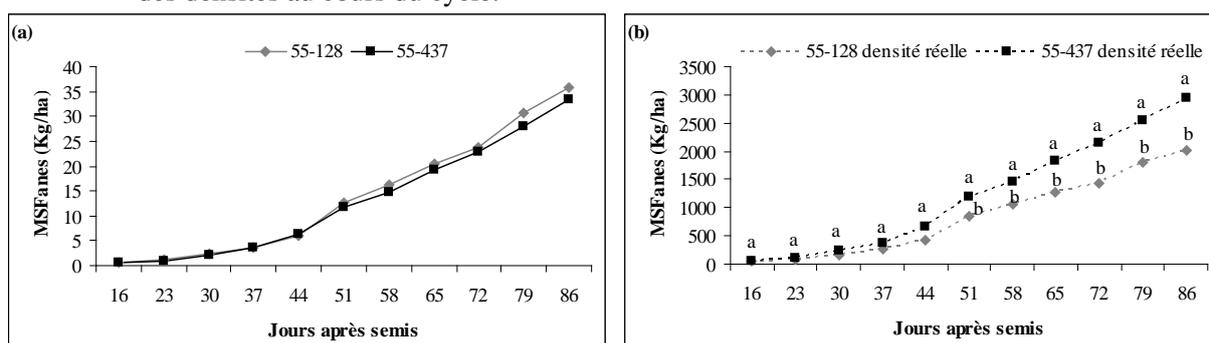


Figure 16: Evolution de la matière sèche de fanes produite par plante (a) et à l'hectare (b) en fonction des densités au cours du cycle.

3.1.1.3.2 Evolution de la matière sèche des gousses

La croissance des gousses s'effectue également en deux phases (figure 17) : une phase de croissance lente correspondant à la formation et au développement des gynophores (65 JAS) et une phase de croissance rapide correspondant à la maturation des gousses (remplissage et dessiccation des gousses). L'évolution du poids sec des gousses est similaire pour les deux variétés, mais on note une différence variétale significative au 79^{ème} JAS dont la raison nous échappe vu la similitude comportementale des deux variétés avant et après cette date. Cela pourrait être dû à un artefact de mesure survenu lors des pesées de biomasse.

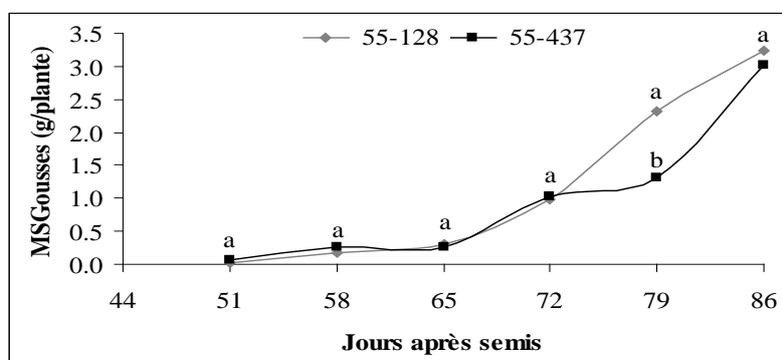


Figure 17: Evolution de la matière sèche des gousses au cours du cycle.

(Pour une date donnée, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%, test de Student Newman Keul's).

3.1.1.4. Rendements

3.1.1.4.1. Rendement en fanes, gousses et graines

Les rendements en fanes, gousses et graines des deux variétés sont statistiquement différents. La variété 55-437 a présenté des rendements significativement supérieurs à ceux de la variété 55-128 (figure 18). 55-437 a présenté respectivement des rendements moyens en fanes, gousses et graines de 3038 Kg.ha⁻¹, 368 Kg.ha⁻¹ et 209 Kg.ha⁻¹ tandis que pour les mêmes paramètres 55-128 a présenté des rendements moyens de 2197 Kg.ha⁻¹, 265 Kg.ha⁻¹ et 128 Kg.ha⁻¹. Ces valeurs sont très faibles en comparaison aux potentiels des variétés (tableau 3).

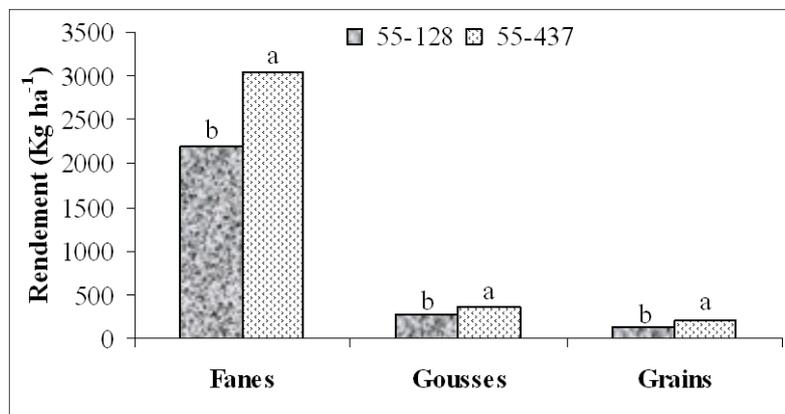


Figure 18: Rendements finaux en fanes, gousses et graines des deux variétés d'arachide.

(Pour une variable et un effet donné, les moyennes affectées de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%, test de Student Newman Keul's.)

3.1.1.4.2. Composantes de rendement

Le tableau 3 présente les composantes des rendements finaux des deux variétés d'arachide. On note une différence variétale significative en ce qui concerne le nombre de gousses par m² (NGs.m⁻²), le nombre de graines semences par m² (NGrS.m⁻²), les taux de décorticage « tout venant » (TDTV) et des « graines semences » (TDGrS), le poids de gousses par plante (PGs/plt), le rendement en gousses à l'hectare (RdtGs (Kg.⁻¹ha)) et le nombre de plants à l'hectare (Nplant.ha⁻¹). D'une manière générale, 55-437 a présenté des composantes de rendement élevées par rapport à celles de 55-128 sauf pour le poids de 100 graines et le taux de gousses endommagées qui sont équivalents pour les deux variétés.

Comme déjà indiqué, les rendements sont faibles comparativement aux rendements potentiels. D'après cette comparaison, ces rendements faibles s'expliquent d'une part par les mauvaises densités à la récolte et d'autre part par la faible productivité des plants (2.7 g de gousses/plante en moyenne contre 6.25 g de gousses/plante en potentiel). Ceci témoigne d'un

mauvais développement et/ou d'un mauvais état phytosanitaire des plantes. On note que, seules les différences de densités expliquent les différences de rendements entre les 2 variétés car elles ont les mêmes productions par pieds (faibles par rapport aux potentiels comme déjà dit). Par ailleurs, on note des taux de décortilage (poids graines / poids gousses) faibles : 48% et 56% respectivement pour les variétés 55-128 et 55-437 contre un potentiel de 75%. Ils témoignent d'un mauvais remplissage des graines. Cela peut être lié au déficit hydrique faible enregistré dans le dernier mois de culture, ou également à d'autres problèmes. On sait en effet qu'il y a une sensibilité du remplissage des graines et par conséquent du poids moyen d'une graine aux conditions d'alimentation hydrique (Diouf, 2000).

Ainsi, les mauvais résultats peuvent être dus au semis tardif, aux maladies et ravageurs, à la densité, à la compétition marquée et non contrôlée des adventices et au problème hydrique.

Tableau 3: Composantes des rendements et analyses ANOVA.

	P100G (g)	NGs/m²	NGrS/m²	TGsE (%)	TDTV (%)	TDGrS (%)	PGs (g/plt)	RdtGs (Kg/ha)	Nbplt/ha
Potentiel	35-38	-	-	-	75	-	6.25	700	160000
55-437	24.06 ^a	12.97 ^a	10.71 ^a	4.28 ^a	56.42 ^a	39.22 ^a	2.76 ^a	368 ^a	111000 ^a
55-128	24.65 ^a	10.43 ^b	5.25 ^b	6.32 ^a	47.9 ^b	27.27 ^b	2.67 ^a	265 ^b	82500 ^b
Pr > F	0.5567	0.0070	0.0013	0.2776	0.0001	0.0001	0.5731	0.0070	0.0001

(Pour une variable et un effet donné, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%, test de Student Newman Keul's ; P100G = poids de 100 graines ; NGs m⁻² = nombre de gousses par m⁻² ; NGrS m⁻² = nombre de graines semences par m⁻² ; TGsE = taux de gousses endommagées ; TDTV = taux de décortilage tout venant ; TDGrS = taux de décortilage des graines semences ; PGs/plt = poids de gousses par plante ; RdtGs (Kg/ha) = rendement en gousses à l'hectare; Nplant ha⁻¹ = nombre de plants à l'hectare.)

3.1.1.5. Développement des surfaces foliaires

3.1.1.5.1. Indice de surface foliaire mesuré au LAI-2000

Les deux variétés ont présenté le même niveau de développement foliaire tout au long du cycle de culture. Cependant, l'analyse statistique a mis en évidence une différence significative au 44^{ème} JAS entre les variétés 55-128 et 55-437 qui ont présenté respectivement des LAI moyens de 1.6 et de 1.3 à cette date : nous pensons qu'elle est probablement due à un artefact de mesure au LAI-2000. D'une manière générale, l'indice de surface foliaire des plantes a augmenté régulièrement pour atteindre au 79^{ème} JAS, une valeur maximale de 3.18 :

on note cependant une chute de 2.29 à 1.46 au 58^{ème} JAS du fait probablement de la poche de sécheresse enregistrée durant cette période. Il est à rappeler et à noter que nous n'avons cependant pas observé la même chute en ce qui concerne les biomasses foliaires et des tiges. On constate ensuite que le LAI a repris sa croissance à partir du 72^{ème} JAS puis a diminué en fin de cycle à une valeur moyenne de 2.11 du fait de la sénescence des feuilles (figure 19).

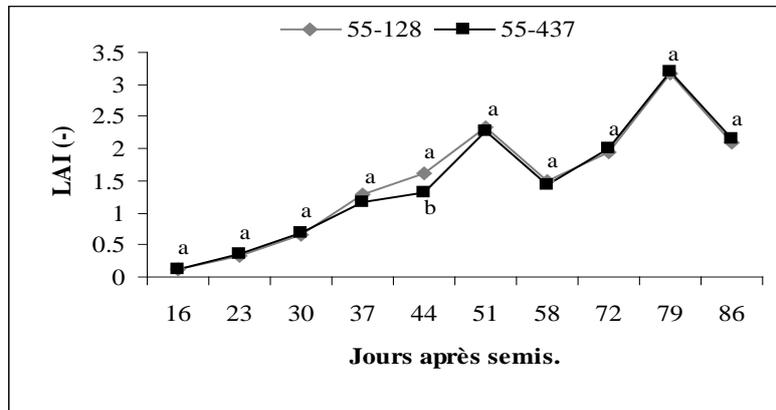


Figure 19: Evolution de l'indice de surface foliaire (LAI-2000) au cours du cycle.

(Pour une date donnée, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%, test de Student Newman Keul's).

3.1.1.5.2. Surfaces foliaires mesurées au planimètre et SLA

Les valeurs de surface foliaire par plante (figure 20a) ne montrent pas une grande différence de développement entre les variétés. Les surfaces foliaires ont augmenté du 44^{ème} au 86^{ème} JAS où elles ont atteint leur maximum de 2219 cm² par plante en moyenne.

La SLA (« Specific Leaf Area ») est le rapport entre la surface foliaire (Leaf area) présente à chaque instant sur le poids sec des feuilles correspondantes (BiomLeaf). Elle a augmenté du 44^{ème} au 72^{ème} JAS où il a atteint un maximum de 0.0014 ha.Kg⁻¹ puis a diminué en fin de cycle à une valeur moyenne de 0.0012 ha.Kg⁻¹ (figure 20b).

Les valeurs de SLA sont anormalement faibles par rapport à la littérature aux 44^{ème} JAS surtout et également au 58^{ème} JAS et bizarrement ne décroissent pas au début : en effet, la SLA devrait décroître de environ 0,0021 ha.Kg⁻¹ en début de cycle, jusqu'à environ 0,0013 ha/Kg en fin de cycle, cela en fonction de l'âge des feuilles à cause des phénomènes de sénescence et d'épaississement des feuilles. On a ajouté sur la figure 20b les valeurs théoriquement attendues de la SLA (SLA corrigé). Les valeurs de fin de cycle semblent cohérentes avec la littérature (0.0011 ha/Kg en moyenne).

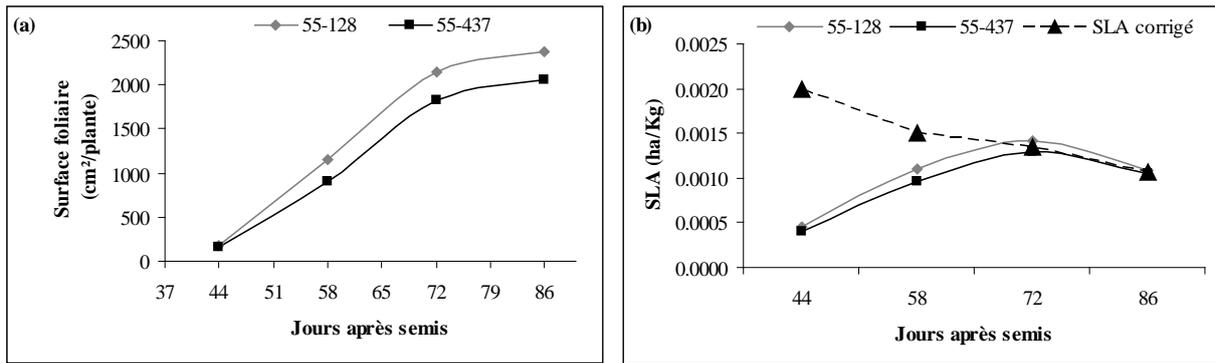


Figure 20: Evolution des surfaces foliaires par plante (a) et de SLA (b) du 44^{ème} JAS à la fin du cycle.

Les valeurs de surfaces foliaires mesurées directement permettent de calculer les indices de surface foliaire (LAI-SF) en tenant compte des densités réelles. Sur la figure 21, on a voulu montrer encore une fois l'importance de tenir compte (et de mesurer) de la densité réelle. Ainsi, on note que les valeurs de LAI sont fortement différentes (presque du simple au double) selon les valeurs de densités considérées : on remarque que si on considère la densité de semis, la variété 55-128 présente des valeurs de LAI-SF légèrement supérieures à celles de la 55-437, alors que si on considère les densités réelles, on constate que les valeurs de LAI-SF deviennent plus faibles chez la variété 55-128 que chez la 55-437.

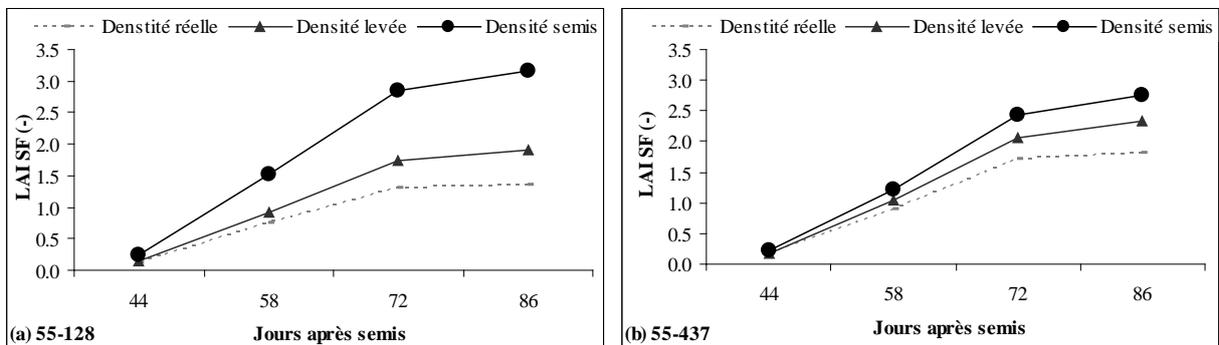


Figure 21: Evolution des LAI-SF des variétés 55-128 (a) et 55-437 (b) en fonction des densités.

3.1.1.5.3. Comparaison des mesures de LAI : LAI-2000 – LAI-SF

Pour des besoins de précision, de fiabilité et de cohérence des valeurs du paramètre capital de développement des cultures (LAI), nous avons jugé nécessaire de confronter les valeurs de LAI-SF et celles de LAI-2000 en vue d'une possible correction de ces dernières.

La figure 22 compare les valeurs de LAI obtenues par le LAI-2000 et par les mesures de surfaces foliaires à la densité réelle (LAI-SF) : on note tout d'abord que les LAI-SF sont très faibles aux 44^{ème} et 58^{ème} JAS et très fortement inférieurs aux valeurs LAI-2000 à ces deux dates ; cela conforte l'idée que des erreurs de mesure affectent les valeurs de surface foliaire à

ces dates, comme nous le laissent déjà penser les valeurs de SLA. On note ensuite que les valeurs sont proches aux 72^{ème} et 86^{ème} JAS, mais les valeurs LAI-SF sont toujours inférieures aux valeurs LAI-2000. Or on a vu que sur cette période (72^{ème} et 86^{ème} JAS) les SLA sont correctes, et donc probablement les mesures sont correctes aussi. Une raison peut être avancée pour expliquer les différences observées : le fait qu'en pratique les mesures de LAI-2000 ont été faites dans des endroits des parcelles où le peuplement était de bonne qualité, donc où la densité locale est proche de la densité de semis ou tout au moins de la densité de levée, alors que les pieds pris pour les déterminations de surface foliaire l'ont été au hasard et que on a déterminé les LAI-SF avec les densités réelles de peuplement.

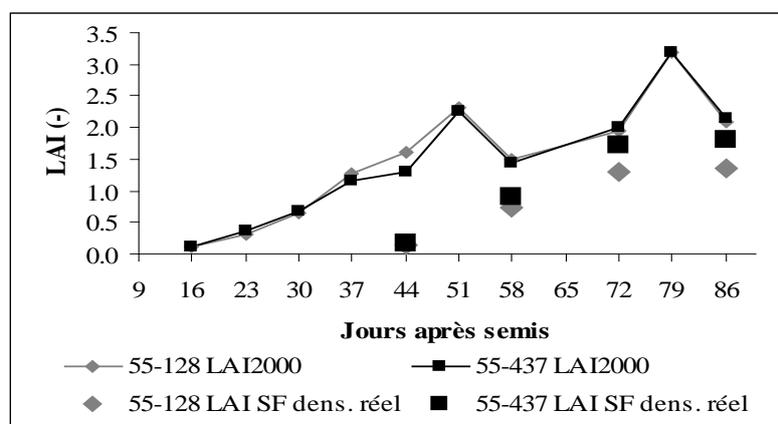


Figure 22: Evolutions comparatives de LAI-2000 et LAI-SF mesuré à densité réelle.

Conclusion : vu les valeurs de SLA et de LAI calculées (LAI-SF), il est clair que des erreurs de mesure ont affecté les valeurs de surface foliaire aux 44^{ème} et 58^{ème} JAS. On ne peut donc se fier à ces mesures pour corriger éventuellement les mesures indirectes de LAI au LAI-2000.

Pour illustrer ce point on présente aux figures 23a et 23b les valeurs de LAI-SF que l'on obtiendrait en considérant les densités au semis ou à la levée : on note que c'est avec les densités de levée qu'on se rapproche le plus des valeurs LAI-2000 aux 72^{ème} et 86^{ème} JAS, tandis que les LAI-SF leur sont supérieurs avec les densités de semis. Dans tous les cas on constate que les valeurs de LAI-SF sont toujours extrêmement et anormalement faibles aux 44^{ème} et 58^{ème} JAS.

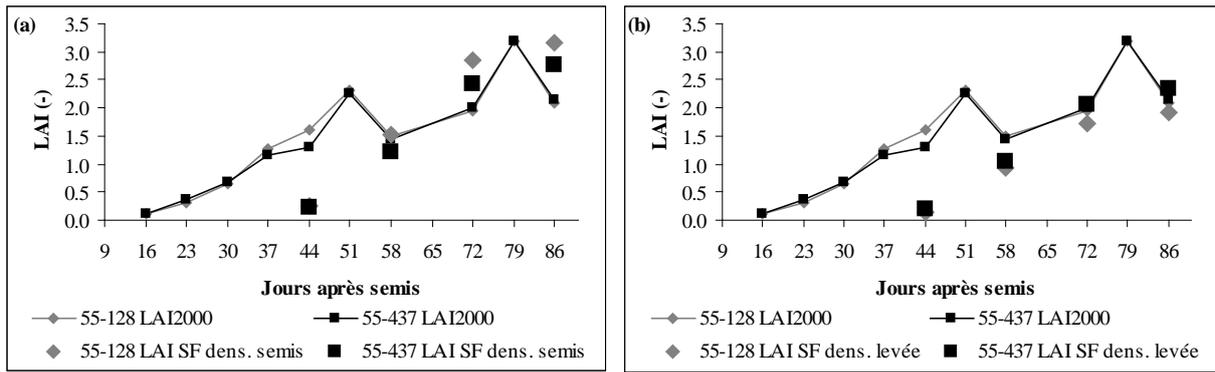


Figure 23: (a) : Evolutions comparatives de LAI-2000 et LAI-SF à densité de semis.

(b) : Evolutions comparatives de LAI-2000 et LAI-SF à densité de levée.

A la figure 24, nous avons re-estimé les valeurs LAI-SF en tenant compte (a) des biomasses foliaires mesurées, (b) des valeurs de SLA correctes telles qu'elles existent dans la littérature et présentées en figure 20b, et (c) des densités à la levée. La comparaison montre une très bonne similitude avec les valeurs de LAI-2000. Cela nous conforte dans l'idée qu'il y a eu vraisemblablement des erreurs de mesures des surfaces foliaires des plantes aux 44^{ème} et 58^{ème} JAS, et que par contre les valeurs de biomasses foliaires étaient bien correctes.

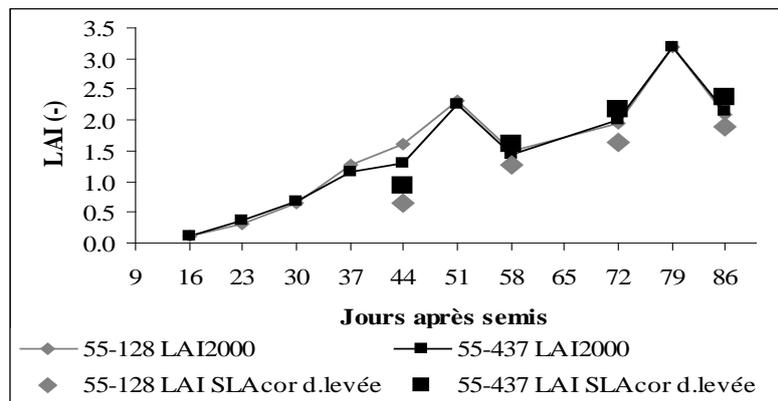


Figure 24: Evolutions comparatives de LAI-2000 et LAI-SF mesuré à densité de levée avec des valeurs corrigées de SLA.

Enfin, tenant compte du fait que les mesures de LAI-2000 ont été réalisées sur des endroits à bon peuplement, pour lesquels on peut penser que la densité est environ celle à la levée, voire même en moyenne supérieure, nous avons voulu re-estimer à partir des valeurs de LAI-2000, les valeurs probables de LAI des parcelles. Pour cela, nous avons appliqué une simple règle de trois en tenant compte des valeurs de LAI-2000, des densités à la levée, et des densités réelles : **LAI-2000corrigé = LAI-2000 x densité réelle / densité levée**

Ces valeurs sont présentées en figure 25.

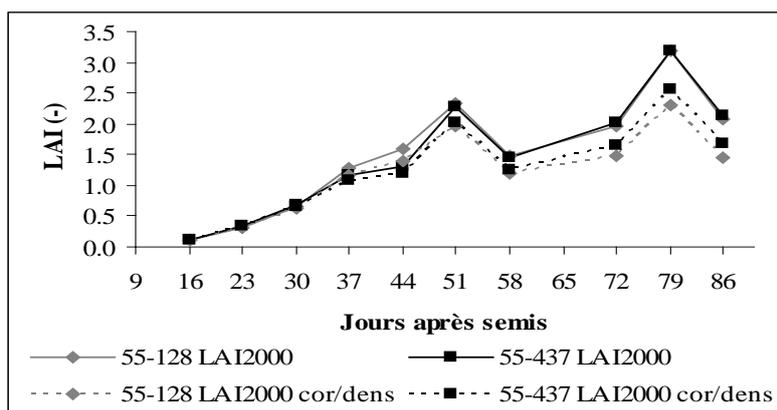


Figure 25: Valeurs re-estimées de LAI à partir des valeurs LAI-2000 et des densités.

Ces valeurs sont probablement les plus proches de la réalité car on a essayé de tenir compte de tous les paramètres et en particulier des problèmes de densité et d'hétérogénéité des parcelles. Cependant nous savons d'après la littérature que le LAI-2000 n'est pas un appareil parfait, et que même en conditions de peuplement idéal il introduit des erreurs systématiques. Dans notre étude nous n'avons aucun moyen de nous rendre compte de ces erreurs car nous n'avons pas assez de points fiables de comparaison avec des valeurs de LAI-SF.

3.1.2. Aspects radiatifs

3.1.2.1. Fractions de lumière transmises au sol

3.1.2.1.1. Valeurs de DIFN mesurées au LAI-2000

Les mesures au LAI-2000 ayant été faites là où les densités de peuplement sont bonnes et donc similaires pour les 2 variétés, on a observé logiquement les mêmes fractions de lumière transmise au sol (DIFN « diffuse non interceptance ») pour les deux variétés qui ont présenté le même niveau de développement foliaire tout le long du cycle de développement.

Le DIFN a diminué au cours du cycle à mesure que la culture se développe. Comme le LAI, le DIFN a connu une évolution régulière au cours du cycle avec des valeurs extrêmes de 0.91 et 0.07 observées respectivement au 16^{ème} et 79^{ème} JAS (figure 26).

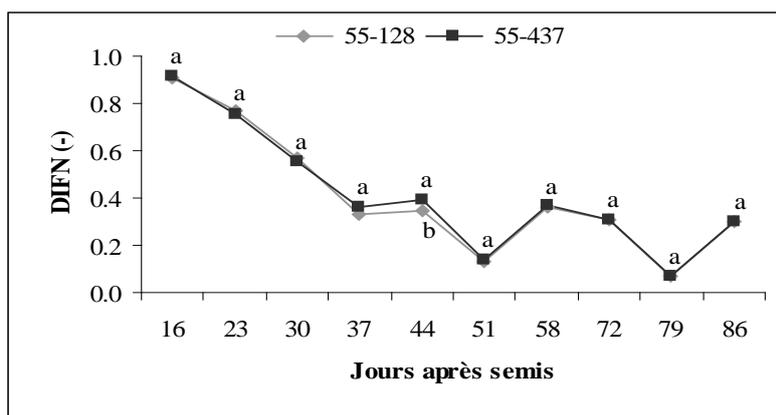


Figure 26: Evolution du DIFN au cours du cycle.

(Pour une date donnée, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%, test de Student Newman Keul's).

3.1.2.1.2. Mesures de PAR transmis au ceptomètre

Les fractions de lumière absorbée par le couvert (PARa) et transmise au sol (PART) ont été calculées à partir des données du ceptomètre. Les deux variétés ayant présenté le même niveau de développement tout le long du cycle, elles ont logiquement présenté les mêmes valeurs de PART. La fraction de lumière transmise au sol a diminué régulièrement au cours du cycle (au fur et à mesure que la culture se développe), partant d'une valeur maximale de 0.91 au 16^{ème} JAS pour se stabiliser à une valeur moyenne de 0.14 en fin de cycle (figure 27).

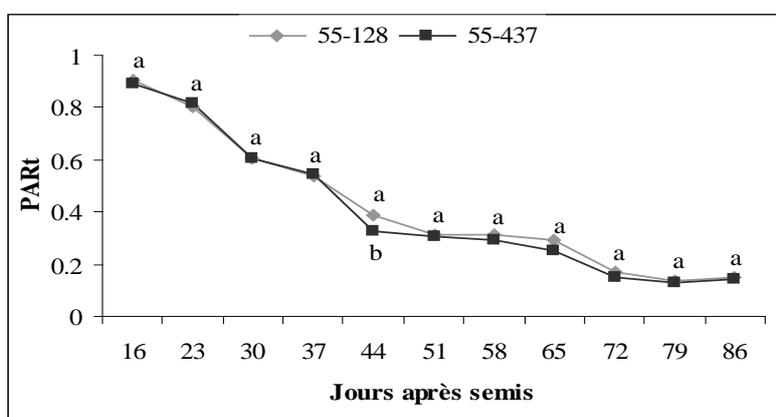


Figure 27: Evolution de la fraction de lumière transmise (PART) au cours du cycle.

(Pour une date donnée, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%, test de Student Newman Keul's).

3.1.2.1.3. Comparaison DIFN – PAR transmis

Les deux variétés étudiées étant très similaires du point de vue développement, nous avons choisi de présenter l'évolution comparative du DIFN et du PARt chez la variété vulgarisée (55-437). La figure 28a montre une similitude d'évolution du DIFN et du PARt, ce qui témoigne de la qualité globale des mesures des fractions de lumière transmise au sol par le LAI-2000 et le ceptomètre. Le coefficient de corrélation de Spearman élevé ($r = 0.90$) obtenu en utilisant toutes les valeurs mesurées chez les deux variétés (figure 28b) permet de mettre en évidence une bonne relation entre le DIFN et le PARt et de confirmer la fiabilité des mesures. Cependant, on note une évolution plus régulière du PARt que du DIFN (courbe en zigzag à partir du 51^{ème} JAS). Cela est certainement d'ordre méthodologique à cause de la grande sensibilité du LAI-2000 au rayonnement solaire direct.

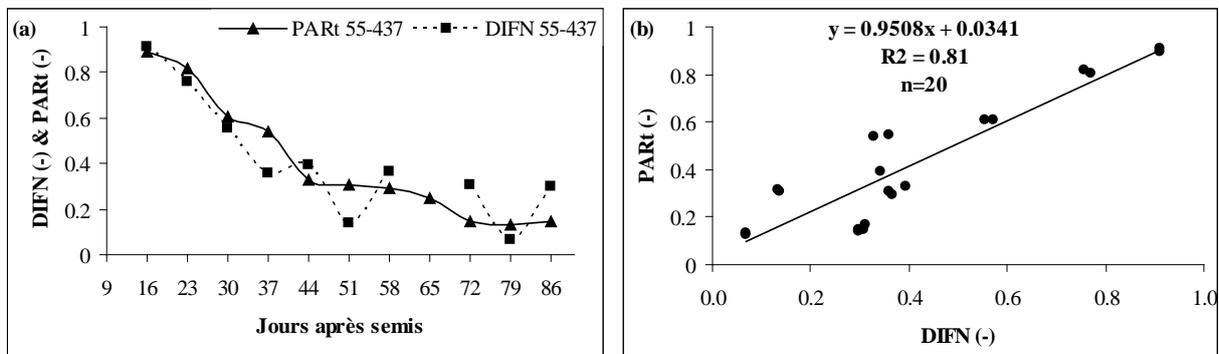


Figure 28: (a) : Evolution comparative du DIFN et du PARt.

(b) : Relation entre DIFN et PARt.

Les valeurs du PARt sont celles qui doivent être utilisées pour le calcul du coefficient d'extinction (Kdf) de la lumière.

3.1.2.2. Valeurs de Kdf

Le Kdf dépend des propriétés géométriques du couvert. Il a été calculé à partir de la loi de Beer-Lambert (équation 19). D'après cette équation on a :

$$\text{Kdf} = - \text{Ln}(\text{PARt}/\text{PAR}) / \text{LAI}$$

Pour les calculs des valeurs de Kdf, nous avons utilisé d'une part les valeurs de PARt qui sont en principe celles qui doivent faire référence, et d'autre part les valeurs de DIFN. Aucune différence significative n'a été observée quant à l'évolution du Kdf pour les deux variétés quelque soit la méthode de calcul utilisée (en fonction du DIFN ou du PARt) (figures 29a&b).

Nous notons cependant que les valeurs du Kdf ont été plus ou moins constantes tout le long du cycle de développement des cultures suivant les 2 méthodes de calcul (figure 29c).

Toutefois, nous obtenons un Kdf moyen un peu plus faible en utilisant dans les calculs les valeurs de PARt (Kdf moyen=0.71) qu'en utilisant les valeurs de DIFN (Kdf moyen=0.76). Cette remarque est confirmée en figure 29d où les ordonnées à l'origine des deux régressions linéaires correspondent au Kdf moyen calculé en fonction du PARt (Kdf moyen=0.6) et du DIFN (Kdf moyen=0.8). Nous rappelons que seules les valeurs de PARt doivent faire référence ; par conséquent nous retenons un Kdf moyen de 0.71.

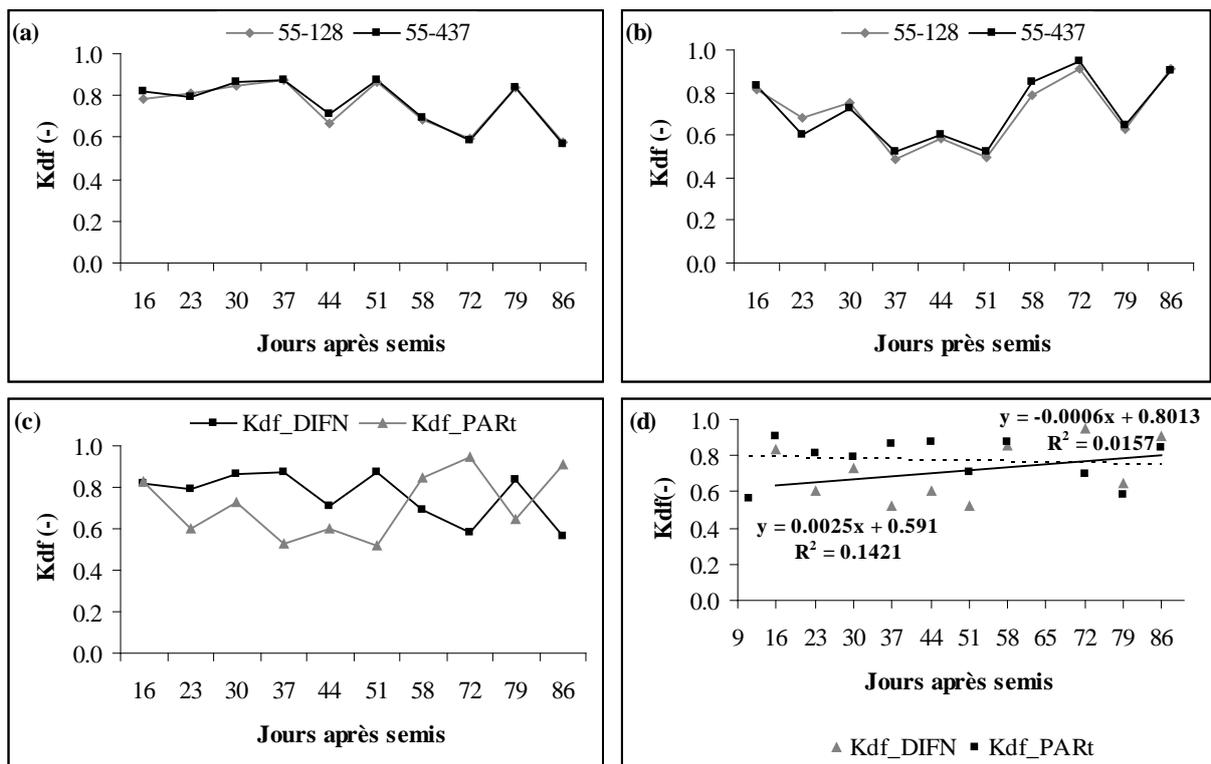


Figure 29: Evolution des valeurs de Kdf calculées en fonction du DIFN (a) et du PARt (b).

3.1.3. Bilan hydrique (état hydrique et consommation en eau)

3.1.3.1. Etat hydrique du sol

On commentera tout d'abord les évolutions des profils d'humidités (profils hydriques) qui caractérisent la dynamique de l'eau dans la tranche de sol de 0-320 cm de profondeur. Deux cas types sont présentés :

- des profils peu affectés par le drainage (cas profil 6) : avec non évolution des humidités en bas de profil, et un front d'humectation se situant à la limite de la profondeur maximale des mesures,
- des profils fortement affectés par le drainage (cas profil 9) : avec une importante évolution des humidités en bas de profil, et un front d'humectation se situant au delà de la profondeur maximale des mesures.

Au-delà de cette différence, les dynamiques d'évolution des profils ont été similaires :

- au départ les profils sont secs sur tous les tubes,
- ensuite on a une humectation des profils,
- puis on a un assèchement progressif des profils en profondeur.

On observe sur la parcelle 6 (profil non affecté par le drainage) un profil sec (du 30 juillet au 18 août) avec des humidités volumiques relativement élevées (11-16% entre 0 et 20 cm) en surface (du fait des fortes pluies enregistrées dans la même période) puis diminuant très vite en profondeur (4% à -160 cm). Ensuite, à partir du 26 août jusqu'en fin de cycle, on note un phénomène de ressuyage se traduisant par des humidités volumiques élevées en profondeur (13-18% à 100 et 210 cm de profondeur). Ces profils s'assèchent à 300 cm de profondeur où se situe le front d'humectation, permettant de boucler le bilan hydrique (figure 30a).

Cependant, on observe sur la parcelle 9 (profil affecté par le drainage) un drainage à partir du 30 septembre jusqu'en fin de cycle se traduisant par humidification du profil en profondeur (21% à 300 cm). Là, le front d'humectation a dépassé la cote maximale de mesure (310 cm) (figure 30b), ce qui ne permet pas d'effectuer le bilan hydrique sans avoir recours à des tensiomètres qui donnent l'état énergétique de l'eau dans le sol et permettent d'estimer le drainage par la loi de Darcy. Nous n'avons pas pu utiliser cette alternative et par conséquent, seuls les profils non affectés par le drainage (du type profil parcelle 6) ont été utilisés pour réaliser le bilan hydrique de la culture.

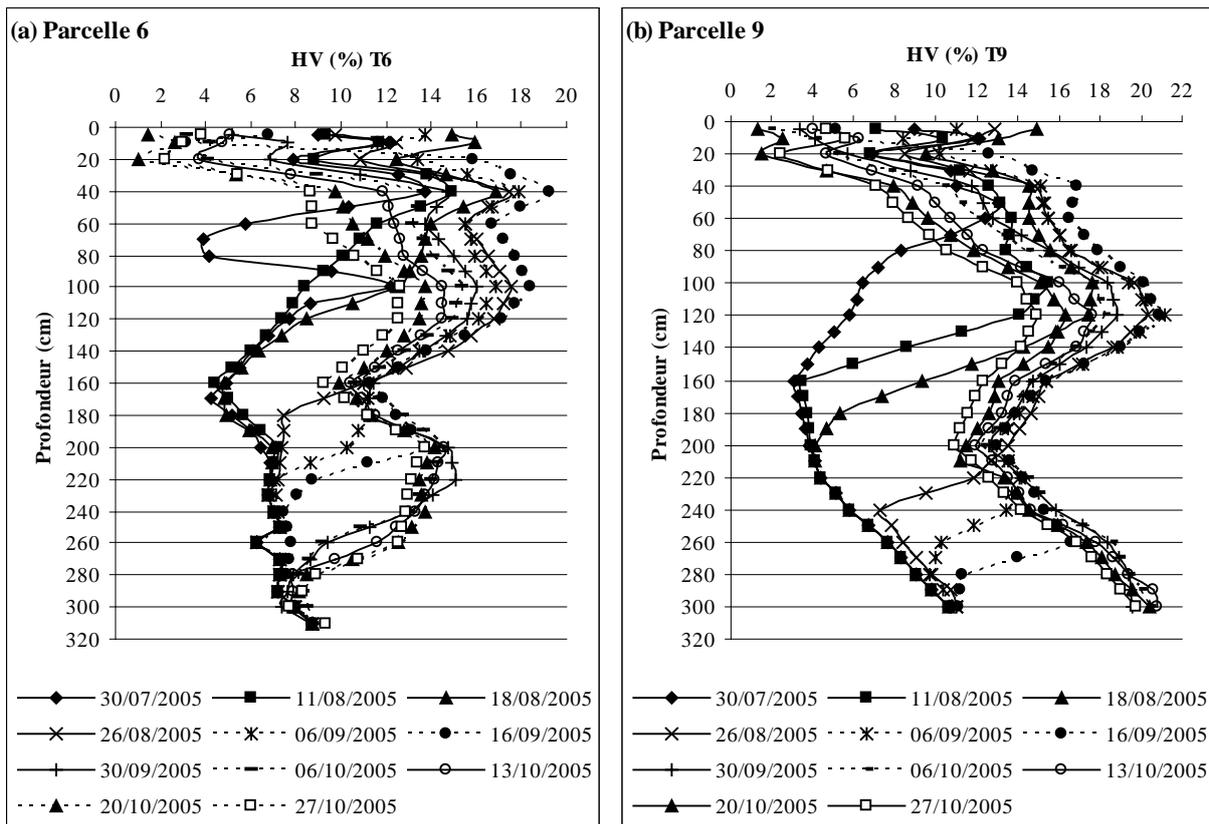


Figure 30: Profils hydriques du sol sur les parcelles 6 (a) et 9 (b) au cours du cycle.

3.1.3.2. Consommation en eau des deux variétés et fraction d'eau transpirable du sol

On a tenté d'estimer les évolutions des évapotranspirations réelles journalières (ETR_j) au cours du cycle par la méthode du bilan hydrique (équation 37). Cela a été fait uniquement sur les tubes pour lesquels on peut supposer que les drainages sont relativement faibles ou nuls (les tubes 3, 6, 8, 11 et 12 pour la variété 55-128 et les tubes 4, 7 et 10 pour la variété 55-437).

Hormis les conditions du milieu, l'évolution de l'ETR_j est fortement liée au degré de couverture du sol par la culture (Dancette, 1983). Les deux variétés ont plus ou moins présenté les mêmes évapotranspirations réelles journalières tout le long de leur cycle de développement. Mais la figure 31a montre que les valeurs ne suivent pas une progression logique, et qu'il y a de plus des valeurs très élevées : 13.8 mm par exemple au 24^{ème} JAS. Ces valeurs ne peuvent témoigner que d'erreurs de mesures ou de la présence de drainage. A partir du 45^{ème} JAS (16 septembre) les valeurs ont l'air cohérentes, bien que faibles, mais cette faiblesse peut être due au faible développement des cultures. A ce moment il n'y a probablement plus de drainage car les pluies sont bien plus rares.

Dans les modèles de bilan hydrique, l'offre est constituée par la fraction d'eau disponible pour la plante dans le réservoir racinaire (FTSW) et la fraction d'eau disponible dans le réservoir de surface (FESW). La figure 31b montre que la FTSW a été maintenue autour de 1 pour les deux variétés de la levée à la phase de début fructification (45JAS) ; ce qui témoigne d'une bonne alimentation hydrique des plantes durant cette période. Ensuite la FTSW a diminué jusqu'en fin de cycle avec des valeurs de 0.48 à 79 JAS et 0.5 à 86 JAS témoignant de la poche de sécheresse, puis de l'arrêt progressif des pluies. Cependant, un déficit hydrique majeur n'est pas noté en fin de cycle ; donc les plantes n'ont pas connu de stress hydrique sévère. D'ailleurs, comme nous l'avons vu, leur développement en biomasse n'a pas été affecté et nous n'avons pu observer qu'un infléchissement des LAI mesurés au LAI-2000.

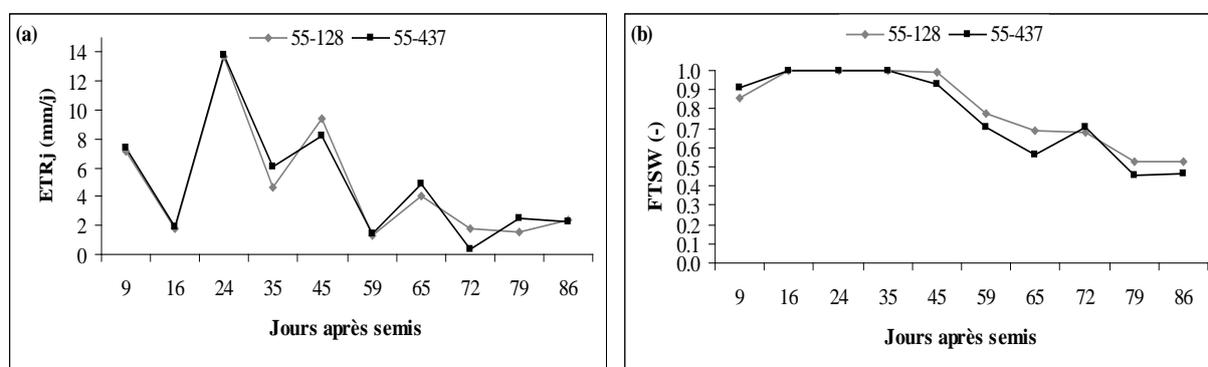


Figure 31 : Evolutions de l'ETRj (a) et de la FTSW (b) en fonction des variétés au cours du cycle.

3.1.4. Bilan carbone

3.1.4.1. Coefficient de conversion du PARa en biomasse sèche : Kε_B

3.1.4.1.1. Variation des coefficients en fonction des phénophases

L'efficacité de conversion du PARa en biomasse sèche ($K\epsilon_B$) a été calculée par rapport à la matière sèche totale : biomasse aérienne + biomasse racinaire. Pour cela, les biomasses racinaires ont été estimées à partir de la bibliographie (Sène, 1995) selon laquelle la biomasse racinaire représente le 1/4 de la biomasse totale chez la variété 77-33 de 110 jours. Afin d'apprécier la variation dans le temps du coefficient de conversion, sa valeur a été calculée pour les différentes phases phénologiques de l'arachide. Pour une phase donnée, l'efficacité de conversion correspond au rapport entre le gain de biomasse sèche totale ($\Delta\text{BiomTot}$) et le PARa durant la phase considérée.

Le tableau 4 présente les valeurs calculées de $K\epsilon_B$ pour les trois principales phases de développement des deux variétés d'arachide. Les coefficients de conversion ($K\epsilon_B$) ont

augmenté de la levée à la phase de fructification-maturation où ils ont atteint leurs valeurs maximales. Au 86^{ème} JAS, les variétés 55-128 et 55-437 ont présenté des coefficients moyens respectifs de 2.39 et de 2.09 g.Mj⁻¹.

Les coefficients de conversion ainsi obtenus sont faibles comparativement à ceux trouvés dans les travaux de Collino et *al.*, (2001) où le $K\epsilon_b$ a varié entre 3.17 et 3.59 g.Mj⁻¹. Syahbuddin (2001) a retenu une valeur moyenne de 3.4 g.Mj⁻¹. Cette faiblesse des valeurs de $K\epsilon_b$ peut s'expliquer par le mauvais développement des plantes durant la période de culture.

Tableau 4: Valeurs calculées de $K\epsilon_b$ pour les trois principales phases phénologiques.

Principales phases Phénologiques	$K\epsilon_b$ (g.Mj ⁻¹)	
	55-128	55-437
Levée-début floraison (4-21 JAS)	0.71	0.43
Floraison-fructification (21-55 JAS)	1.7	1.1
Fructification-maturation (55-86 JAS)	2.39	2.09

3.1.4.1.2. Relation entre biomasse aérienne produite et énergie lumineuse absorbée

Il ressort des tests de corrélation effectués une forte relation linéaire entre les quantités de matière sèche aérienne produite et d'énergie lumineuse absorbée. La figure 32 présente les régressions linéaires obtenues pour les deux variétés qui sont toujours très semblables.

- 55-128 : MS Aéro = 0.7605*PARa – 63.092 ; R² = 0.85, r = 0.92
- 55-437 : MS Aéro = 0.6987.*PARa – 53.088 ; R² = 0.86, r = 0.93

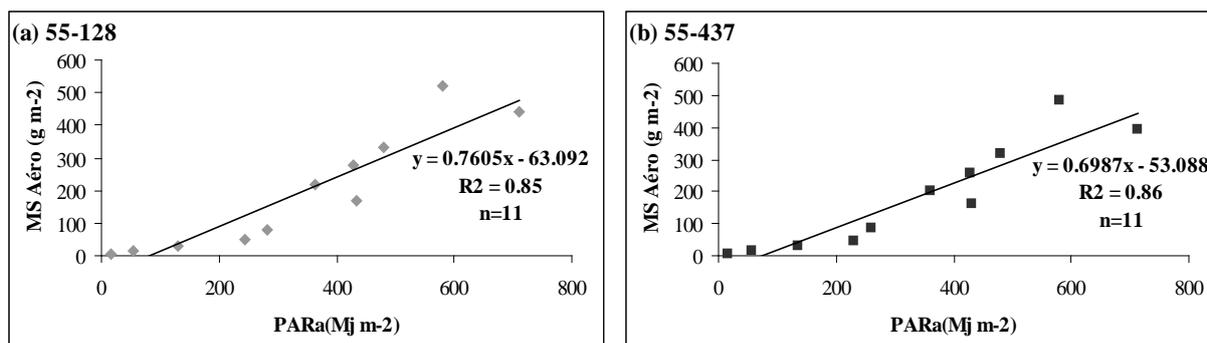


Figure 32: Relation entre la biomasse sèche aérienne totale produite (MS Aéro) et l'énergie lumineuse absorbée (PARa) selon les deux variétés : 55-128 (a) et 55-437 (b).

3.1.4.2. Dynamique de répartition de la biomasse : les relations allométriques

Selon les besoins de croissance, la biomasse totale produite est répartie en biomasse aérienne (feuilles, tiges et gousses) et en biomasse racinaire. Tout au long de notre étude, nous n'avons pas mesuré les biomasses racinaires produites par les plantes et par conséquent nous ne présenterons ici que les partitions relatives aux biomasses aériennes. La biomasse aérienne est répartie entre feuilles et tiges d'une part, et gousses et graines d'autre part. La répartition des assimilats entre les différents organes de la plante suit des règles d'allocation de type allométrique.

3.1.4.2.1. Partition biomasse foliaire - biomasse aérienne

D'après les tests de corrélation effectués, il existe une forte relation linéaire entre les biomasses foliaire et aérienne produites tout le long du cycle : en témoigne le coefficient de corrélation ($r = 0.99$) élevé et significatif au seuil de 1%. La figure 33 montre que ce résultat n'est pas très différent de celui obtenu par Syahbuddin (2001) sur une variété précoce d'arachide (Fleur 11).

- **55-437: Biom Leaf = 0.5564 * Biom Aéro + 5.693**
- **Fleur 11: Biom Leaf = 0.42 * Biom Aéro + 26.198**

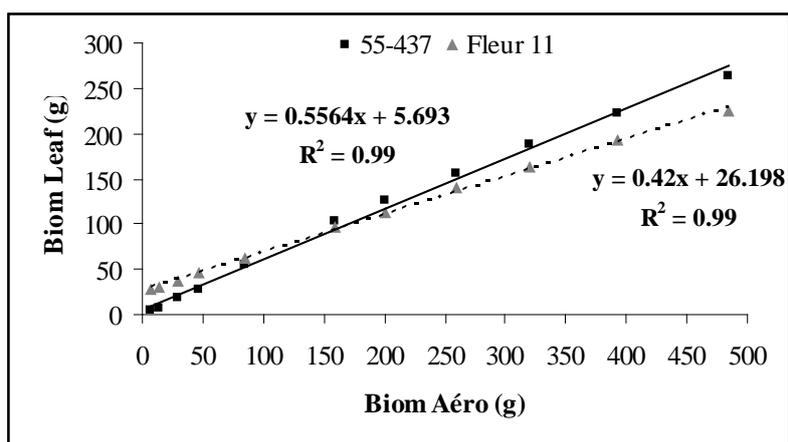


Figure 33: Corrélation entre la biomasse foliaire et la biomasse aérienne selon deux variétés (Fleur 11 et 55-437).

3.1.4.2.2. Partition biomasse gousses - biomasse aérienne

A partir du 51^{ème} JAS jusqu'en fin de cycle, il ressort des tests de corrélation une forte relation entre les biomasses aérienne et des gousses produites. La figure 34 montre que une fois de plus les deux variétés se sont montrées très similaires.

➤ **55-128 : Biom Gousse = 0.1218 * Biom Aéro – 23.829**

➤ **55-437 : Biom Gousse = 0.1146 * Biom Aéro – 21.476**

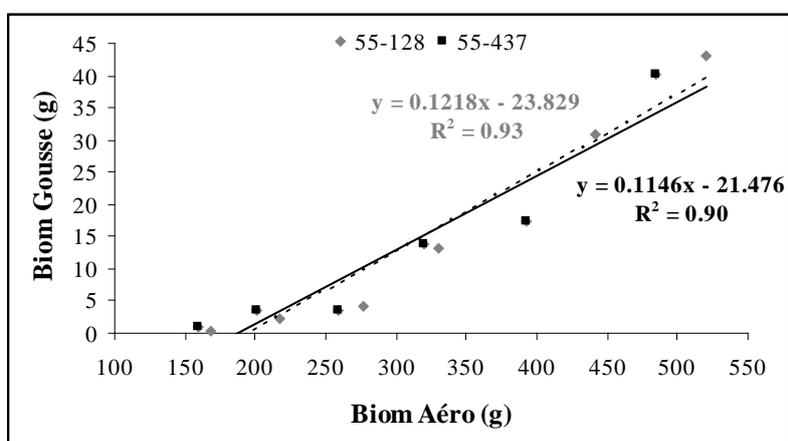


Figure 34: Corrélation entre la biomasse des gousses et la biomasse aérienne à partir du 51^{ème} JAS jusqu'en fin de cycle selon les deux variétés (55-128 et 55-437).

Tableau 5: Récapitulatif des paramètres ajustés du modèle de bilan carbone.

Description des paramètres	Sigles	Unités	Valeurs	Références
Biomasse initiale et Assimilation du carbone				
Densité de semis	-	Pieds/ha	133333	160000
Coefficient d'extinction de la lumière	Kdf	(-)	0.71	0.8
Coefficient de conversion de l'énergie lumineuse	Kε_b	g.Mj ⁻¹	2.24	3.4
Partition de la biomasse aérienne				
Pente de la relation de répartition biomasse foliaire-aérienne	KpenteLeafDev	-	0.5564	0.42
Base de la relation de répartition biomasse foliaire-aérienne	KBaseLeafDev	-	5.693	26.198
Pente de la relation de répartition biomasse gousse-aérienne	KpenteGousDev	-	0.1146	-
Base de la relation de répartition biomasse gousse-aérienne	KBaseGousDev	-	-21.476	-
Surface foliaire				
Surface massique des feuilles phase <i>BVP</i>	TabSlaBVP	ha.kg ⁻¹	0,0004	0.0021
Surface massique des feuilles phase <i>RPR</i>	TabSlaRPR	ha.kg ⁻¹	0,0014	0.0015
Phénologie				
Température de base	KTempPhase	°C	13	13
Somme des températures <i>BVP</i>	TabSeuilTempBVP	°C.j ⁻¹	466	317
Somme des températures <i>RPR</i>	TabSeuilTempRPR	°C.j ⁻¹	871	546
Somme des températures <i>Matu</i>	TabSeuilTempMatu	°C.j ⁻¹	1082	1422

3.2. DISCUSSION GENERALE

Les températures moyennes journalières enregistrées ont varié entre 24 et 36°C et devraient favoriser un bon développement des plantes d'autant plus qu'elles se situent dans la gamme optimale de température (25-35°C) définie par Caron et Granès, (1993). Par ailleurs, le sol de type *Dior-Deck* répond assez bien aux caractéristiques physiques des types de sol qui conviennent le mieux à l'arachide. Cependant, l'eau reste le facteur limitant par excellence de l'agriculture dans cette zone du bassin arachidier. On a enregistré une quantité suffisante de pluie (492 mm) mais mal répartie sur le cycle de la culture (semée tardivement); si bien que des poches de sécheresse se sont manifestées dans la période de sensibilité maximum au déficit hydrique (floraison et formation des gousses). Ce déficit hydrique de fin de cycle couplé à la compétition marquée et non contrôlée des adventices et aux maladies et ravageurs a eu un effet dépressif sur la croissance et la production de l'arachide.

Les observations phénologiques ont montré que les variétés 55-128 (80 jours) et 55-437 (90 jours) ne sont pas significativement différentes dans le déroulement de leurs phases phénologiques. Les dates de début levée, début floraison, 50% de floraison, début formation des gousses et début maturation des gousses ont été plus ou moins observées respectivement aux 4^{ème}, 21^{ème}, 28^{ème}, 52^{ème} et 85^{ème} JAS. Ces résultats sont en concordance avec ceux de Syahbuddin (2001) et Traoré (2005) qui ont suivi dans leurs travaux, la phénologie des variétés 55-437, Fleur 11, 55-128, et JL24 toutes de 90 jours. L'allongement de 10 jours du cycle pour une maturité physiologique effective pourrait s'expliquer par le faible déficit hydrique qui, couplé aux basses températures nocturnes enregistrées dans le dernier mois de culture, aurait entraîné un allongement de la phase de maturation. En effet, Ong et Monteith (1985) ont observé chez le mil, que la durée des phases et la longueur totale du cycle dépendent, entre autres de la somme des températures perçues par la culture.

Le modèle SARRA Habillé utilise le temps thermique pour caler la phénologie sur la base des seuils de somme de température en degré/jours. Pour les phases végétative, de reproduction et de maturation, les seuils de somme de température en degré/jours ont été respectivement de 466, 871 et 1082 degré/jours. Ces résultats sont comparables avec ceux obtenus par Syahbuddin (2001) qui a trouvé respectivement pour les mêmes paramètres les valeurs suivantes : 317, 546 et 1422 degré/jour. Les différences observées entre ces deux résultats expérimentaux seraient dues au fait que les essais ont été installés à des dates différentes (nous avons semé le 2 août 2005 tandis qu'en 2001 leur semis a été effectué le 12 juillet).

Les faibles densités de levée des plantes observées au cours de l'expérimentation seraient dues au semis tardif qui a coïncidé avec les fortes pluies et les températures élevées enregistrées en début du mois d'août. Cette forte humidité associée à la chaleur élevée aurait provoqué le pourrissement des graines en germination. Il ressort des analyses de la croissance et de la production des 2 variétés que la densité est une composante essentielle du rendement.

Les rendements obtenus à la récolte sont très faibles comparativement aux potentiels des deux variétés et cela à cause des mauvaises densités et des mauvais développements, dus aux maladies et ravageurs, à la compétition marquée des adventices, et aussi au faible déficit hydrique de fin de cycle.

Durant tout le cycle de culture, les variétés 55-128 et 55-437 ont présenté pratiquement le même niveau de développement foliaire. L'évolution du LAI a été freinée par le déficit hydrique enregistré entre le 51^{ème} et le 72^{ème} JAS qui a eu des conséquences négatives sur le développement foliaire et par conséquent sur la captation du rayonnement, la photosynthèse globale, les échanges gazeux et finalement la production. Cette dynamique d'évolution du LAI et sa sensibilité aux conditions d'alimentation hydrique à été mise en évidence dans des études antérieures (Tossim, 2003 ; Diop, 2004).

Le modèle SARRAH, de par sa conception est très sensible à tous les paramètres qui influencent la dynamique du PAR intercepté. La surface massique des feuilles (SLA) qui permet de passer de la biomasse foliaire au LAI ($LAI = \text{BiomLeaf} * SLA$) est un élément critique. En effet, la SLA est une donnée d'entrée du modèle que nous avons calculé avec les données expérimentales. Nous avons obtenu aux 44^{ème} et 58^{ème} JAS de très anormalement faibles valeurs, par contre les valeurs de fin de cycle semblent conformes à celles obtenues avec la variété 55-437 en condition irriguée dans les travaux de Syahbuddin (2001). Dans les résultats de ce dernier, le SLA a varié entre 0.0012-0.0018 ha.Kg⁻¹ et 0.0017-0.0024 ha.Kg⁻¹ respectivement au cours des essais 1992 et 1995. Il a été remarqué que l'évolution de la SLA n'est pas stable mais il y a une tendance générale à la diminution au cours du cycle et une SLA moyenne de 0.0017 ha.Kg⁻¹ a été retenue.

Dans le modèle de simulation du fonctionnement des cultures, l'interception du rayonnement est une variable cruciale pour la prévision de la production en biomasse (Denoroy et *al.*, 2002). De ce fait, il convient de faire une bonne estimation des fractions de lumière interceptée et transmise au sol pour une bonne connaissance de la structure et du développement de la canopée. Pour cela, nous avons estimé la fraction de lumière transmise au sol par le LAI-2000 (DIFN) et le ceptomètre (PART), et les résultats ont montré une

similitude d'évolution du DIFN et du PART. Ceci témoigne de la qualité des mesures et de la fiabilité des deux appareils. Ces résultats confirment ceux obtenus sur un blé de 30 cm (*Triticum aestivum* cv. Inia) et le soja (*Glycine max*) dans les travaux de Jovanovic et Annandale (1997).

La loi de Beer-Lambert est communément utilisée pour décrire la relation entre la proportion de lumière pénétrant dans le couvert végétal et l'indice de surface foliaire (Foroutan-pour, Dutilleul & Smith, 2001). Toutefois, la distribution géométrique de la surface foliaire a un effet potentiel sur la propriété de la plante à intercepter la lumière. Dans notre étude, nous retenons un Kdf moyen de 0.71. Cette valeur est comparable à celle obtenue par Sarr et al. (2004) qui, ont retenu un Kdf moyen de 0.8 pour le calage d'un modèle de bilan hydrique utilisé comme outil de pilotage de l'irrigation des variétés d'arachide Fleur 11 et GH 119-20. Bell et al. (1993) ont mis en évidence une différence entre les valeurs de Kdf calculées pour les types Spanish et Virginia cultivés en Australie et ont expliqué leur résultat par la différence de l'angle de distribution des feuilles. En plus de la variabilité due aux types, les auteurs ont observé une petite variation dans les valeurs de Kdf au cours du cycle pour les Spanish (0.48-0.57) et une grande variation pour les types Virginia (0.69-0.83).

L'activité photosynthétique de la culture résulte de la transformation du PARa en biomasse sèche par le biais d'un coefficient de conversion de l'énergie lumineuse (K ϵ_b). Nous avons calculé et obtenu en fin de cycle un K ϵ_b moyen de 2.24 g.Mj⁻¹ qui s'est révélé faible comparativement à celui trouvé dans les travaux de Collino et al. (2001) et Syahbuddin (2001) qui ont retenu une valeur moyenne de 3.4 g.Mj⁻¹. Cette faiblesse du K ϵ_b obtenu pour les deux variétés d'arachide peut s'expliquer par le mauvais développement des plantes durant la période de culture.

La biomasse aérienne est répartie entre feuilles et tiges d'une part, et gousses et graines d'autre part. La répartition des assimilats entre les différents organes de la plante suit des règles d'allocation de type allométrique. Les relations mathématiques se traduisant par des corrélations linéaires obtenues sont semblables à celles présentées dans les résultats de Syahbuddin (2001) et Siéné (2003).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au Sénégal, notamment dans le « bassin arachidier », la productivité de l'arachide est devenue faible et très variable depuis les changements climatiques intervenus dans les années 70. L'équilibre de la balance des ressources alimentaires reste une préoccupation majeure et dans ce contexte, le recours aux techniques de modélisation permettant d'avoir les premiers indicateurs de production agricole avant la fin de la campagne devient une nécessité. Pour contribuer à la mise en place d'un système de diagnostic précoce et rapide de la campagne agricole, une étude expérimentale a été menée sur deux variétés précoces d'arachide (55-128 et 55-437) en vue d'obtenir des référentiels pour le calibrage d'un modèle de bilan carbone (Sarrah©CIRAD-arachide).

Les résultats de l'essai ont permis globalement de déterminer une partie des paramètres du modèle, les autres ayant été tirés de la bibliographie. Le calage de la phénologie a été fait sur la base des seuils de somme de température en degré/jours. L'étude a été pénalisée dans sa partie expérimentale par des problèmes agronomiques et l'hivernage particulièrement pluvieux n'a pas été favorable au plan phytosanitaire. Les problèmes des densités ont perturbé quelques analyses, mais ont apporté un éclairage intéressant au plan agronomique et écophysologique. L'analyse précise des composantes du rendement, de l'échelle plante à celle du peuplement, et la comparaison avec les potentiels des variétés, confirment (i) qu'il n'y a pas de différence à l'échelle plante entre les deux variétés, (ii) que les différences entre elles sont dues aux densités, (iii) que les faibles rendements sont dus aux faibles densités, et (iv) aussi aux mauvais développements individuels des plantes. On recommande de ce fait, de bien contrôler régulièrement les densités réelles pour toutes les études de ce type.

Les hétérogénéités de peuplement ont rendu difficile la comparaison entre les valeurs de LAI déterminées au LAI-2000 et celles déterminées à partir des surfaces foliaires (« LAI-SF »). Une analyse montre qu'il est possible de passer de l'une à l'autre en tenant compte des densités théoriques et réelles et de produire une courbe de valeurs de LAI-2000 corrigées. Puisque nous n'avons pas eu assez de bonnes mesures directes des LAI pour pouvoir corriger la courbe des valeurs de LAI-2000, nous recommandons dans la continuité de cette étude la réalisation de mesures directes de surfaces foliaires au planimètre et ceci du début à la fin du cycle de la culture

Les études des aspects radiatifs et carbonés confirment la bonne qualité globale des mesures. Il a été possible de déterminer des valeurs correctes du Kdf (0.6 à 0.8). Par contre le coefficient de conversion déterminé est forcément faible (K_{cb} de 2.24 g.Mj^{-1}) vu les mauvais développements des cultures. Nous recommandons ici la détermination précise de la biomasse racinaire par des méthodes fiables et rigoureuses dans les études futures afin d'obtenir des coefficients de conversion plus objectifs. Les relations allométriques définissant la dynamique de répartition de la biomasse aérienne sont conformes à la littérature.

Ce travail de paramétrage du modèle de simulation de l'arachide pourrait trouver des perspectives intéressantes dans l'amélioration des systèmes prévisionnels de la production agricole au Sénégal. Mais au préalable, ce modèle devrait être vérifié puis validé avec un jeu de données indépendantes en confrontant les variables simulées avec des variables observées sous des conditions environnementales différentes. Cette validation une fois effectuée, ce modèle pourrait être un outil adéquat pour le suivi de la campagne arachidière au Sénégal. Il pourrait aussi être associé à des systèmes d'information géographique pour le choix des variétés et des calendriers culturaux, et servir en même temps à la cartographie des rendements et la détermination des zones de calamités climatiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ackerson R.C. & Hebert R.R., 1981.** Osmoregulation in cotton in response to water stress. I. Alterations in photosynthesis, leaf conductance, translocation and ultrastructure. *Plant Physiol.*, **67**: 484-488.
- Affholder F., 1997.** Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semi arid regions. *Field Crop Research*; **52**: 79-93.
- Agossou A.B., 2004.** Paramétrage, calage et test de validité d'un modèle de croissance et de productivité du sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Mémoire de DEA, UCAD. Dakar; Sénégal. 40p.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. & Smith M., 1998.** Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and drainage. Paper **56**, 300p.
- Ameziane T.E., 1994.** Croissance et développement. In: *Agronomie moderne - Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale*. Hatier-AUPELF-UREF, pp. 119-152.
- Annerose D.J.M. & Mayeux A., 1995.** Synthèse des recherches conduites au Sénégal de 1991 à 1994 dans le cadre du projet « Mise au point des culture de l'arachide irriguée ». Rapport de synthèse. Bambey : ISRA, CIRAD, 1995, 19p.
- Annerose D.J.M., 1990.** Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) cultivée au Sénégal. Thèse, Université de Paris VII; 282p.
- Asch F., Sow A. & Dingkhun M., 1999.** Reserve mobilization, dry matter partitioning and specific leaf area in seedling of African rice cultivars differing in early vigour. *Field Crops Research*, **62**: 191-202.
- Baron C., Reyniers F.N., Clopes A. & Forest F., 1999.** Application du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques. *Agric. Dev.*, **24**: 89-97. Département des cultures annuelles du CIRAD.
- Bartholomé E., 1991.** Télédétection et suivi des productions agricoles en Afrique de l'Ouest. Institut des applications de la télédétection, Centre Commun de Recherches, Commission des Communautés Européennes, ISPRA Italie.
- Bell M.J., Wright G.C. & Harch G., 1993.** Environmental and agronomic effects on growth of four peanut cultivars in subtropical environment. I. Dry matter accumulation and radiation used efficiency. *Exp. Agric.*, **29**: 473-490.

- Bennet J.M., Boote K.J. & Hammond L.C., 1984.** Relationship among water potential components, relative water contents and stomatal resistance of field-grown peanut leaves. *Peanut Sci.*, **11** : 31-35.
- Bonhomme R., 1994.** Les rayonnements solaires et le fonctionnement du couvert végétal. *In: Agronomie moderne - Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale.* Hatier-AUPELF-UREF, pp. 25-48.
- Bonhomme R., 1997.** Modélisation du fonctionnement d'une culture: caractérisation de la contrainte hydrique et prise en compte de ses effets. *In: L'eau dans l'espace rural: production végétale et qualité de l'eau.* INRA, Paris, pp. 85-100.
- Boote K.J., 1982.** Growth stages of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Peanut Sci.*, **9**: 35-40.
- Brisson N. & Delécolle R., 1991.** Développement et modèles de simulation des cultures. *Agronomie*, **12 (3)**: 253-263.
- Bunting A.H., Dennet M.D., Filbee B. & Rodgers G.A., 1982.** Régime hydrique de l'arachide. *In: Symposium international en Afrique sur la production arachidière, le marché mondial des oléagineux et le commerce inter-africain de l'arachide et des produits arachidières*: 177-197.
- Caron H. & Granès D., 1993.** L'arachide. Agriculture spéciale. *In: L'arachide. Agriculture spéciale*, CERDI (Ed.), Paris, pp. 87-108.
- Cavero J., Farre I., Debaeke P. & Faci J.M., 2000.** Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT Models. *Agron. J.*, **92**: 679-690.
- Ceccarelli S. & Grando S., 1996.** Drought as a challenge for the plant breeder. *Plant Growth Regul.*, **2**: 149-155.
- Chopart J.L., 1980.** Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (Arachide, Mil, Sorgho, Riz pluvial). Thèse IPG., Toulouse, 162p.
- CIRAD, 2002.** FormAtelier SarraH v2.3; support de formation sur SARRAH 2.3, CD Rom. Montpellier, 25-29 novembre; France. 23,3 Mo.
- Clark J.M., 1986.** Effect of leaf rolling in leaf water loss in *Triticum spp.* *Can. J. Sci.*; **66**: 885-91.
- Clavel B.D., 2004.** Amélioration variétale de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) pour l'adaptation à la sécheresse. Proposition d'une approche intégrée pour la sélection. Thèse de Doctorat, Université de Paris XII-Val de Marne, 155p.
- Clavel D. & Gautreau J., 2001.** Groundnut. *In: Tropical Plant Breeding*, CIRAD and Science Publishers Inc (Ed.), Plymouth, pp. 246-266.

- Collino D.J., Dardanelli J.L., Sereno R. & Racca R.W., 2001.** Physiological responses of argentine peanut varieties to water stress. Light interception, radiation use efficiency and partitioning of assimilates. *Fields Crop Res.*, **70**: 177-184.
- Combres J.C., 2001.** Proposition de modèle arachide. CIRAD, Montpellier (France) ; 5p.
- Dancette C., 1983.** Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agron. Trop.*, 38 (4) : 281-294.
- Daudet A.F. & Harena T., 1990.** L'échelle phénologique dans CERES-Maize. In : *Physiologie et production du maïs*. INRA, Pau, 13-15 novembre : 419-428.
- De Raissac M., 1984.** Réponse physiologique du Soja à la sécheresse : Etude de la variabilité génétique. Thèse de Docteur ingénieur I.N.P. Toulouse, 114p.
- Denoroy P., Thiebeau P. & Gosse G., 2002.** Une méthode pour estimer l'interception du rayonnement par un couvert bas : application au colza avant montaison, *Fondamental, OCL* vol. 9 (1) : 54-63.
- Diaou M., 2003.** Evaluation de la croissance et de la productivité du maïs (*Zea mays* L.) : paramétrage d'un modèle de bilan carbone pour la prévision agricole au Sénégal. Mémoire de DEA, UCAD. Dakar ; Sénégal. 56p.
- Dingkhun M. & Asch F., 1999.** Phenological responses of *Oryza sativa*, *O. glaberrima* and inter-specific rice cultivars on a toposequence in West Africa. *Euphytica*; **110**: 109-126.
- Dingkhun M., Johnson D.E., Sow A. & Audebert A.Y., 1999.** Relationship between upland rice canopy characteristics and weed competitiveness. *Field Crop Res.* 1999; **61**: 79-95.
- Dingkhun M., Baron C. & Bonnal V., 2003.** Decision-support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In: Struif-Bontkes T.E., Wopereis M.C.S, eds. *A practical guide to decision-support tools for agricultural productivity and soil fertility enhancement in sub-saharian Africa*. Muscle Shoals (Alabama, USA): International Fertilizer Development Center (IFDC); Center of agricultural & Rural Cooperation (CTA), 2003: 127-139.
- Diop M.S., 2004.** Tolérance à l'infestation par *Aspergillus flavus* et à la contamination par l'aflatoxine en conditions de pré-récolte chez l'arachide : implication des caractères agro-physiologiques. Mémoire de fin d'études, ENSA de Thiès, 44p.
- Diouf O., 2000.** Réponses agrophysiologiques du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) à la sécheresse : influence de la nutrition azotée. Thèse de Doctorat, Université libre de Bruxelles, 160p.
- Doorenbos J. & Jassam A.H., 1979.** Yield response to water. FAO. Irrigation and drainage. Paper **33**, FAO, Rome, 193p.

- DSDIA/DAPS/MAE, 2003.** Résultats définitifs des récoltes de la campagne agricole 2002-2003. Récapitulatifs des cultures industrielles. 3ème version du 24/03/2003.
- FAO, 2003.** http://www.museum_agropolis.fr/pages/savoirs/arachide.
- Flénet F., Kiniry J.R., Board J.E., Westgate M.E. & Reicosky D.C., 1996.** Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean and sunflower. *Agron. J.*, **88**: 180-190.
- FNRAA, 2004.** Modélisation de la croissance et de la productivité des cultures céréalières, mise au point d'un SIG pour l'amélioration des systèmes de prévisions agricoles au Sénégal. Rapport technique final N° 17, 65p.
- Forest F. & Clopes A., 1994.** Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique améliorée. In: Reynniers F.N. & Netoyo L., eds. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*. Paris: Jonh Libbey Eurotext: 3-15.
- Foroutan-pour K., Dutilleul P. & Smith D.L., 2001.** Inclusion of the fractal dimension of leafless plant structure in the Beer-Lambert law. *Agron. J.*, **93** : 333-338.
- Gillier P. et Sylvestre P., 1969.** L'arachide. Collection : *Techniques agricoles et tropicales*. (Ed.). Maisonneuve & Larose-CTA. Paris, 292p.
- Gosse G., Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M., Allirand J-M. & Lemaire G., 1986.** Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire interceptée par un couvert végétal. *Agronomie*, 6 (1): 47-56.
- Gregory W.C., Krapovickas A. & Gregory M.P., 1980.** Structure, variation, evolution and classification in *Arachis*. In: *Advances in Legume Sciences*, Summerfield R.J. & Bunting A.H. (Ed.). Royal Botanical Gardens, Kew. pp. 469-481.
- Hanks J & Richie J., T., 1991.** Modelling plant and soil system. *Coll. Agronomy* (31) ASA éd. 545p.
- Henin S., 1977.** Cours de physique du sol. ORSTOM-EDITEST, II (29), 221p.
- Johnson R.C., Nguyen H.T. & Croy L.I., 1984.** Osmotic adjustment and solute accumulation in two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, **24**: 957-961.
- Jones C.A. & kiniry J.R., 1986.** CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development. Rexa A & M University Press, College Station, Texas, Etats-Unis, 194p.
- Jones M.M., Osmond B. & Turner N.C., 1980.** Accumulation of solutes in leaves of sorghum and sunflower in response to water deficits. *Aust. J. Plant Physiology*, **7**: 193-205.

- Jovanovic N.Z. & Annandale J.G., 1997.** Measurement of radiant interception of crop canopies with the LAI-2000 plant canopy analyser. *S. Afr. J. Plant Soil* 1998, 15 (1), 4p.
- Ketring D.L., Brown R.H., Sulvian G.A. & Johnson B.B., 1982.** Growth physiology. *In: Peanut science and Technology.* (Pattee E.H. and Young C.). American Peanut Research and Education Society, Inc. Yoakum, Texas 77 995: 411-457.
- Khalfaoui J.L.B., 1988.** Approche de l'amélioration génétique de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées en zones semi-arides. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) destinée à la région sèche du Sénégal. Thèse, Université d'Orsay; 297p.
- Kiniry J., R. & Bonhomme R., 1991.** Predicting maize phenology. *In: T. Hodges (ed.) Predicting phenology of crops.* CRC Press, New York, chap. 11: 115-131.
- Lacape M.J., Wery J. & Annerose D.J.M., 1998.** Relationship between plant and soil water status in five field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L) cultivars. *Field Crops Res.* 1998; 57: 29-43.
- Ledent J.F., 2000.** Modélisation de la croissance des végétaux. *Cours CESS adaptation des plantes à la sécheresse.* CERAAS, Thiès (Sénégal), 23p.
- Levitt J., 1980.** Responses of plant to environmental stresses. *Water, radiation, salt and other stresses.* Academic Press, New York, pp. 25-186.
- Mathieu C.P.L., 1990.** Contribution à la modélisation de la croissance de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) au Sénégal : Mémoire de fin d'études. Ecole nationale d'ingénieurs des travaux, Dijon-Quétigny, 47p.
- Mc Cree K.J., 1970.** An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions. *In: Prediction and measurement of photosynthetic productivity.* Proceedings of the IBP/PP technical meeting, Trebon. Center for Agricultural Publishing and Documentation (PUDOC), Wageningen. pp. 221-229.
- Morel P., 1991.** Sécheresse et rendements des cultures. *In: Influence du climat sur la production des cultures tropicales.* Compte rendu Séminaire Régional FIS et CTA, Ouagadougou, Burkina Faso. pp. 209-218.
- N'Diaye A., 1997.** Effet de la température et de la photopériode sur le développement du maïs en zone sahélienne: modélisation de la durée semis-floraison. *In: Strategy for sustainable maize production in west and central Africa:* Proceedings of a regional maize workshop. IITA, Cotonou, 21-25 avril: 182-193.
- Ong C.K. & Monteith J.L., 1985.** Response of pearl millet to light and temperature. *Field Crops Res.*, 11: 141-160.

- Ouattara M., Vaksman M., Reyniers F.N., Kouressy M. & Niangado O., 1998.** Variabilité phénologique des sorgho du Mali: adaptation à la diversité des agrosystèmes. *In: Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique semi-aride*, L. Bacci; F.N. Reyniers eds. CIRAD et Ce.S.I.A, Florence, Italia. pp. 123-137.
- Penning De Vries F.W.T., Jansen D.M., Ten Berge H.F.M. & Bakema A., 1989.** Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. PUDOC Wageningen, the Netherlands and International Rice Research Institute (IRRI) Philippines, 271p.
- Pieri C., 1989.** Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement au sud du Sahara. Min. Coopération et CIRAD-IRAT.
- Pommel B., 1990.** Caractérisation de la plantule du maïs par ses paramètres au départ et selon son environnement. *In: Physiologie et production du maïs*. INRA, Pau, 13-15 novembre: 75-82.
- Ruget F., 1983.** Quantification de la respiration des plantes entières: notions de respiration, de croissance et d'entretien. *In: Physiologie du maïs*. INRA, Royan, 15-17 mars: 233-240.
- Ruget F., 1990.** Origine des assimilats pour le remplissage des grains : importances des remobilisations. *In : Physiologie et production du maïs*. INRA, Pau, 13-15 mars: 233-238.
- Ruget F., Bonhomme R. & Varlet-Grancher C., 1990.** Analyse de la fonction de photosynthèse dans CERES–Maize. *In: Physiologie et Production du maïs*. INRA, Pau, 13-15 novembre: 445-453.
- Samba A., Sarr B., Baron C., Goze E., Maraux F., Clerget B. & Dingkhun M., 2001.** La prévision agricole à l'échelle du Sahel. *In: Modélisation des agrosystèmes et aide à la décision*. Malezieux E., Trebreil G., & Jaeger M. (Ed.). CIRAD-INRA. pp. 243-261.
- Samui R.P. & Kar S., 1981.** Soil and plant resistance effects on transpiration and leaf water response by groundnut to soil water potential. *Aust. J. Soil Res.*, **19**: 51-60.
- Sarr B., 2000.** Modélisation des cultures: exploitation, utilisation et adaptation à la culture du mil au Sahel. Rapport de stage, CIRAD-AMIS; 37p.
- Sarr B., Ndiendole S., Diouf O., Diouf M. & Roy-Macauley H., 1999.** Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert du maïs (*Zea mays* L.) au Sénégal. *Sécheresse* 1999; 10 (2): 129-135.

- Sarr B., Lecoeur J. & Clouvel P., 2004.** Irrigation scheduling of confectionery groundnut (*Arachis hypogaea* L.) in Senegal using a simple water balance model. *Agricultural Water Management* 2004, **67** : 201-220.
- Sène M., 1995.** Influence de l'état hydrique et du comportement mécanique du sol sur l'implantation et la fructification de l'arachide. Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier, Institution nationale de la recherche agronomique de Laon, 127p.
- Schilling R., 1996.** L'arachide. Collection: *Le Technicien d'Agriculture Tropicale*. (Ed.). Maisonneuve & Larose-CTA. Paris, 171p.
- Schilling R., 2001.** Données agronomiques de base sur la culture arachidière. *Oléagineux Corps Gras Lipides* 8 (3): 230-236.
- Schilling R., 2002.** Le marché de l'arachide: perspectives générales. Projet Germplam Arachide. Bulletin d'information, 24p.
- Siéné L.A.C., 2003.** Dynamique racinaire, répartition de la biomasse et efficacité de conversion du rayonnement absorbé du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br). Mémoire de DEA, UCAD. Dakar ; Sénégal. 47p.
- Sultan B., Baron C., Dingkuhn M., Sarr B. & Janicot S., 2005.** La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière. II : application à la sensibilité des rendements agricoles au Sahel. *Sécheresse*, 16 (1) : 23-33.
- Syahbuddin H., 2001.** Effet du changement climatique sur le rendement de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) dans le cas du Sénégal. Etude réalisée avec les modèles ARPEGE Climat version 3.0 et SARRA Habillé. Rapport de stage de recherche en formation du Master spécialisé Météorologie tropicale, Ecole nationale de la météorologie ; Toulouse-France ; 113p.
- Tossim H.A., 2003.** Etude en conditions de contamination par l'aflatoxine des mécanismes physiologiques impliqués dans la résistance chez deux variétés d'arachide en conditions de déficit hydrique de pré-récolte. Mémoire de fin d'études, diplôme d'ingénieur des travaux option Agriculture, ENCR de Bambey ; 58p.
- Traoré S.A., 2005.** Relations entre variétés, conditions environnementales et résistance à l'aflatoxine chez l'arachide (*Arachis hypogaea* L.). Mémoire de DEA, UCAD. Dakar ; Sénégal. 60p.
- Turner N.C., 1986.** Adaptation to water deficits. A changing perspective. *Aust. J. Plant physiol.*, **13** : 175-190.

- Vaksmann M., Traoré S.B. & Niangado O., 1996.** Le photopériodisme des sorghos africains. *Agri. Dev.*, 1996 ; **9** : 13-18.
- Vaksmann M., Traoré S.B. & Doffangui K., 1992.** Le calcul de l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Penman, Manuel d'utilisation de Sanji, version 5.2, Projet Sol Eau Plante, note technique. 14p.
- Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M. & Artis P. 1982.** Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta. Oecol. Plant.*, 17 (**1**): 3-26.
- Watson R.T., Zinyowera M.C., Moss R.H. & Dokken D.J., 1998.** The regional impacts of climatic change: an assessment of vulnerability. A special report of Ippc working group. Cambridge. Royaume-Uni, *Cambridge University Press*, 518p.
- Whisler F.D., 1986.** Crop simulation models in agronomic systems. I. Need for simulation models and types of models. *Advances in agronomy*, vol., **40**: 141-149.
- Willmott C.J., 1982.** Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*: 1309-1313.