

# **Relation entre production de matière sèche et quantité de rayonnement intercepté par une culture de sorgho fourrager au Sénégal**

C. Leblanc<sup>1</sup>, G. Lemaire<sup>2</sup>, G. Mandret<sup>3</sup>

**E**n Afrique, la grande majorité des ruminants se nourrit de pâturages naturels et de sous-produits de récoltes. Depuis la sécheresse qui s'est installée dans les années 1970, on observe une diminution des ressources fourragères naturelles. Pour répondre à ce manque de disponibilité, on peut rechercher des espèces fourragères plus adaptées à la sécheresse. Des recherches entreprises au Sénégal dans les années 1970 ont mis en évidence l'**adaptation aux conditions pédoclimatiques locales du sorgho fourrager ; d'où la nécessité de déterminer son potentiel de production.**

Le modèle décrit par GOSSE et al. (1984), basé sur la transformation du rayonnement solaire en biomasse végétale, peut servir de base à la détermination de ce potentiel. Ce modèle permet d'estimer la production de matière sèche aérienne en

---

## **MOTS CLÉS**

Croissance, facteur climat, facteur limitant, lumière solaire, modélisation, potentialité pédo-climatique, production fourragère, Sénégal, sorgho fourrager, structure de la végétation, zone tempérée, zone tropicale.

## **KEY-WORDS**

Climatic factor, forage production, forage sorghum, herbage growth, light, limiting factor, pedoclimatic potential, setting-up of models, Senegal, sward structure, temperate region, tropical region.

## **AUTEURS**

- 1 : ISRA, LNERV, BP 2057, Dakar, Sénégal.
- 2 : INRA Station d'Ecophysiologie, F-86600 Lusignan.
- 3 : IEMVT, 10 rue Pierre Curie, F-94704 Maisons-Alfort.

fonction de la quantité de rayonnement intercepté par la culture. Pour servir d'outil d'analyse, ce modèle doit être testé dans une gamme étendue de conditions climatiques. **Un dispositif expérimental a été implanté suivant un gradient climatique nord-sud** : en France (Grignon et Lusignan), en Espagne (Madrid), au Maroc (Rabat) et au Sénégal (Dakar). L'étude présentée dans cet article concerne les résultats obtenus au Sénégal. Elle a pour objectifs de **vérifier en zone tropicale la validité du modèle** d'analyse de croissance préalablement mis au point en zone tempérée et de l'utiliser pour expliciter les effets d'une déficience en eau et en azote sur la croissance du sorgho.

## **Matériels et méthodes**

### **1. Le site expérimental**

Une expérimentation a été mise en place sur le domaine de l'I.S.R.A. à Sangalcam près de Dakar au mois d'août 1990. L'essai a été implanté sur un sol argilo-sableux (20% d'argile) de pH 5,5. Ce sol était bien pourvu en P (200 ppm) et K (250 ppm) grâce à des apports de fumure antérieurs.

### **2. La culture**

Une culture de sorgho fourrager de la variété Oasis a été semée manuellement le 6 août avec un écartement entre rangs de 25 cm à une densité moyenne de 25 kg/ha. Un démariage manuel des plantes a été effectué immédiatement après la levée pour régulariser la densité de plantes. L'entretien de la culture a été réalisé par deux binages pour éliminer les mauvaises herbes.

### **3. Le dispositif expérimental**

Deux cycles de croissance ont été étudiés : la croissance initiale après le semis et la repousse après une première coupe.

Deux niveaux d'alimentation hydrique ont été réalisés, l'un avec des apports d'eau correspondant à 100% de l'évapotranspiration maximum (ETM), l'autre avec des apports d'eau correspondant à 50% de l'ETM. Ces traitements ont été effectués avec un dispositif d'aspersion par «sprinkler» sur deux parcelles différentes mais adjacentes. Seuls les résultats obtenus en conditions hydriques non limitantes seront présentés dans le cadre de cet article.

Trois niveaux de nutrition azotée ont été réalisés à l'intérieur de chacune des deux parcelles correspondant aux deux régimes hydriques, soit 0, 100 et 150 kg N/ha pour chacune des deux périodes de croissance étudiées. Pour le premier cycle, les apports de 100 et de 150 kg N ont été fractionnés en deux épandages égaux à 8 jours d'intervalle après le démariage des plantes à la levée ; pour la repousse ils ont été réalisés en un seul épandage 2 jours après la coupe.

Pour chaque régime hydrique, le dispositif expérimental comprenait 3 blocs aléatoires complets. Les parcelles élémentaires étaient de 20 m de long et de 8 m de large et elles étaient subdivisées en deux, chaque demi-parcelle permettant l'étude de la dynamique de croissance d'un cycle déterminé.

#### 4. Mesures effectuées

Pour chacune des périodes étudiées, des prélèvements bi-hebdomadaires de plantes étaient réalisés pour **déterminer la cinétique de croissance** des différents traitements. Dans chaque parcelle élémentaire et pour chaque prélèvement, 2 lignes contiguës de 8 m étaient prélevées et pesées en vert séparément. Puis 12 plantes étaient prélevées au hasard sur les lignes adjacentes et réparties en deux lots de 6 plantes. Le 1<sup>er</sup> lot était pesé en vert puis passé à l'étuve pour la détermination de la teneur en matière sèche. Le 2<sup>e</sup> lot de plantes était rapporté au laboratoire où étaient séparées les feuilles («Limbes») et les tiges («Gainés + Tiges») pour la détermination du rapport Feuilles/Tiges. Sur une partie aliquote des feuilles, dont la surface était déterminée avec l'aide d'un planimètre optique, on déterminait la masse surfacique. Ainsi, il était possible de **calculer l'Indice Foliaire de la culture**. A la fin du 1<sup>er</sup> cycle, l'ensemble des parcelles était coupé et, lors de la repousse suivante, les prélèvements étaient effectués sur la 2<sup>e</sup> moitié de la parcelle.

#### 5. Modèle d'analyse de la croissance

Le modèle utilisé est celui qui a été développé sur la luzerne par GOSSE et al. (1984). Il est basé sur la relation linéaire existant entre la quantité de matière sèche aérienne accumulée par la culture ( $MS_a$ ) et la quantité de rayonnement intercepté ( $PAR_i$ ) :

$$MS_a = a \cdot PAR_i, \quad (1)$$

a représentant l'efficacité d'utilisation de l'énergie interceptée. Ce modèle suppose donc que cette **efficacité soit constante** au cours de la période considérée, ce qui ne peut être réalisé que dans des conditions optimales et constantes d'alimentation hydrique et de nutrition azotée. C'est la raison pour laquelle ce modèle ne peut pas être utilisé tel quel en conditions sèches lorsque l'intensité du déficit hydrique est variable au cours d'une repousse.

L'estimation du  $PAR_i$  peut être faite à partir d'une détermination de l'efficacité d'interception de la culture ( $E_i$ ) qui représente la part du rayonnement visible incident qui est intercepté. Ainsi, si  $PAR_0$  est le rayonnement visible incident :

$$PAR_i = E_i \cdot PAR_0 \quad (2)$$

La détermination de  $PAR_0$  peut être faite à partir des mesures journalières du rayonnement global (G) en station météorologique selon la formule de VARLET-GRANCHER (1982) :

$$PAR_0 = 0,48 \cdot G \quad (3)$$

La détermination de l'efficiencia d'interception  $E_i$  peut se faire selon la formule suivante :

$$E_i = 0,95 (1 - e^{-K \cdot IF}), \quad (4)$$

avec IF, l'indice foliaire de la culture, et  $K = 0,66$  pour le sorgho selon VARLET-GRANCHER et al. (1989).

L'indice foliaire était mesuré lors de chaque date de prélèvement selon le protocole décrit au paragraphe précédent. Au moyen d'une interpolation linéaire entre deux dates de mesure successives, il a été possible d'estimer l'indice foliaire journalier de la culture :  $IF_j$ ; et les équations (4), (3) et (2), ont permis de calculer la quantité journalière de rayonnement visible intercepté ( $PAR_{ij}$ ). Puis, après cumul des valeurs de  $PAR_{ij}$ , la régression linéaire a pu être établie avec les valeurs de la biomasse aérienne correspondant aux différentes dates de prélèvement et pour chacun des cycles.

## Résultats

### 1. Dynamique de croissance

La figure 1 présente la cinétique de croissance du sorgho pour le traitement irrigué à 100% de l'ETM pour les 2 cycles.

**Lors du 1<sup>er</sup> cycle, les traitements azotés n'ont pas eu d'effet sur la croissance.** A partir du 25<sup>e</sup> jour après le semis, la quantité de matière sèche augmente de façon linéaire avec le temps. Pour l'ensemble des traitements, la vitesse de croissance moyenne entre le 25<sup>e</sup> et le 47<sup>e</sup> jour est de 195 kg/ha/jour ( $r^2=0,99$ ). Le stade «floraison» a été atteint au jour 43. Au delà du jour 47 on observe une forte sénescence des feuilles.

**Lors de la repousse, l'apport d'azote a eu un effet significatif sur la croissance.** Cependant, il n'existe pas de différence significative entre les 2 niveaux d'apports de 100 et 150 kg/ha. Du 10<sup>e</sup> au 34<sup>e</sup> jour de repousse, la croissance moyenne de ces deux traitements est de 192 kg/ha/jour ( $r^2=0,94$ ) ; dans le même temps, la croissance du traitement ne recevant pas d'azote est 2 fois plus faible. Au delà du 34<sup>e</sup> jour de repousse, la floraison est atteinte et la croissance stoppée, puis la sénescence des feuilles apparaît en fin de cycle.

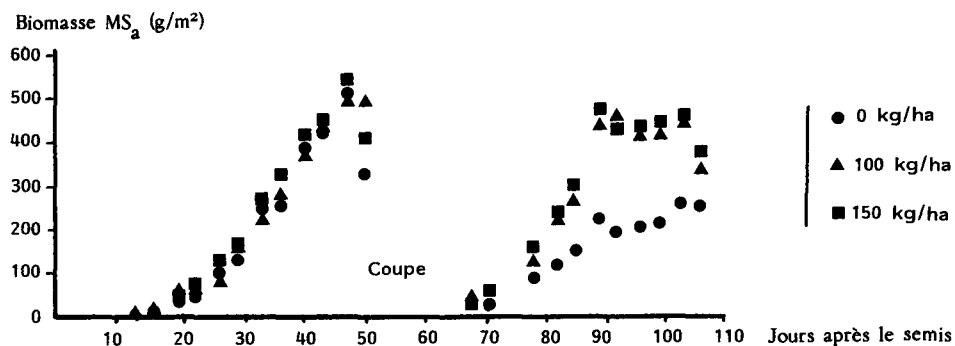


FIGURE 1 : Croissance du sorgho cv. Oasis en conditions d'alimentation hydrique optimale pour 3 niveaux de fertilisation azotée.

FIGURE 1 : Growth of sorghum cv. Oasis under optimum water supply and three levels of N fertilization.

## 2. Evolution du rapport Feuille/Tige

L'évolution du rapport F/T au cours de chaque cycle a été exprimée en fonction de la croissance en matière sèche, conformément au modèle qui a été développé par LEMAIRE et al. (1989) sur luzerne. La figure 2 présente cette évolution en conditions irriguées à l'optimum. Il n'y a pas d'effet notable de l'azote, même pour le traitement N0 lors du 2<sup>e</sup> cycle, alors qu'une diminution importante de croissance était observée. Ceci indique donc que la réduction de croissance due au déficit de nutrition azotée a affecté de la même façon les feuilles et les tiges. Pour une même croissance en matière sèche, il n'y a pas plus de différence de rapport F/T entre les 2 cycles. Il a paru possible de représenter l'évolution du rapport F/T en fonction de la croissance en matière sèche par une relation unique :

$$F/T = 1,05 (MS_a)^{-0,65} \quad r^2 = 0,90 \quad (5)$$

Cette relation permet de prédire l'évolution du rapport F/T en fonction de l'évolution de la biomasse du peuplement, et donc de relier la valeur alimentaire du fourrage à la quantité de matière sèche produite.

## 3. Relation entre la production potentielle et la quantité de rayonnement intercepté

Le modèle utilisé représente en fait la dynamique de croissance du couvert végétal ; il ne prend pas en compte les phénomènes de sénescence qui se manifestent en fin de cycle. Seules les données correspondant à une phase d'augmentation de la

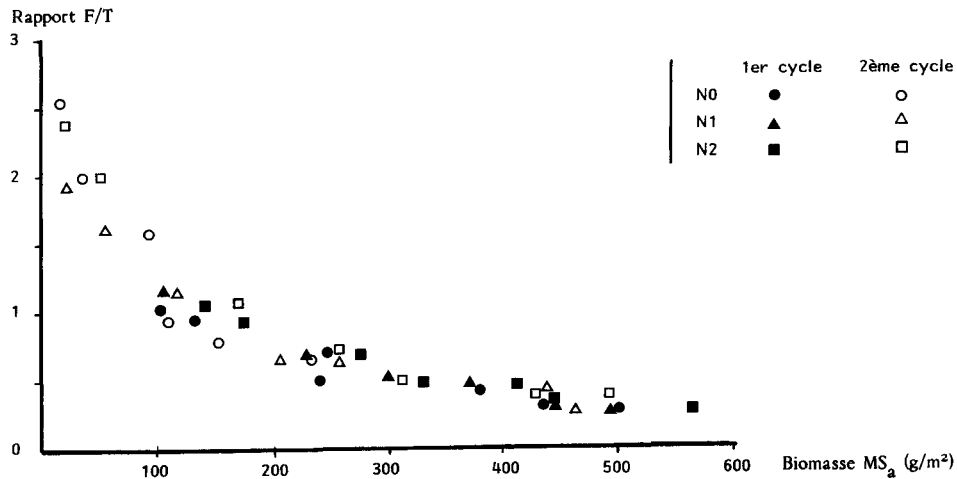


FIGURE 2 : Relation entre le rapport feuille/tige (F/T) et la biomasse aérienne du sorgho en conditions hydriques non limitantes.

FIGURE 2 : Relationship between leaf/stem ratio (F/T) and above-ground biomass of sorghum under non-limiting water supply.

biomasse ont donc été utilisées, c'est à dire jusqu'au jour 47 pour le 1<sup>er</sup> cycle, et jusqu'au jour 89 pour le 2<sup>e</sup> cycle.

La figure 3a représente les relations obtenues entre  $MS_a$  et  $PAR_i$  pour les 3 niveaux d'azote en conditions d'alimentation hydrique optimale pour le 1<sup>er</sup> cycle.

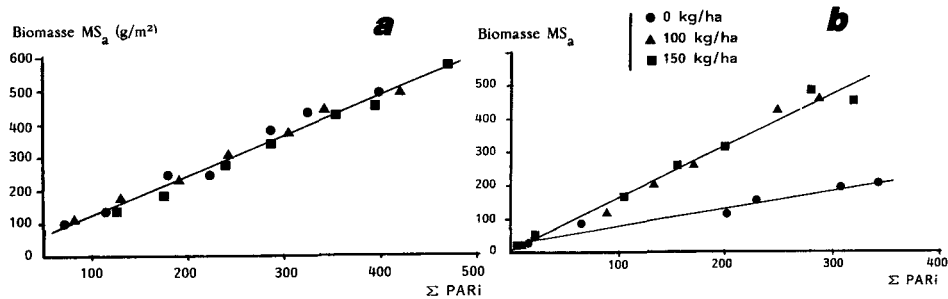


FIGURE 3 : Relation entre l'accumulation de biomasse aérienne du sorgho ( $MS_a$ ) et la quantité de rayonnement intercepté ( $PAR_i$ ) pour 3 niveaux de fertilisation azotée, lors du premier (a) et du second (b) cycle.

FIGURE 3 : Relationship between accumulation of above-ground biomass by sorghum ( $MS_a$ ) and amount of intercepted radiation ( $PAR_i$ ) for 3 levels of N fertilization, in the first (a) and the second (b) growth cycle.

Le tableau 1 donne les valeurs des pentes des différentes régressions obtenues. Les valeurs des ordonnées à l'origine ne sont pas significativement différentes de 0. D'autre part, il n'existe pas de différence significative entre les pentes correspondant aux 3 niveaux de nutrition azotée. Ainsi, il est possible de calculer **une valeur unique pour l'efficacité d'utilisation du rayonnement** :  $a = 2,42 \text{ g MS/MJ}$

La figure 3b représente la même relation pour la **repousse** (2<sup>e</sup> cycle). Le tableau 1 montre qu'il n'y a pas de différence significative de pente entre les deux traitements avec 100 et 150 kg N/ha pour lesquels on a calculé une valeur moyenne de l'efficacité d'utilisation du rayonnement de 3,06 g MS/MJ. En revanche, **pour le traitement sans apport d'azote, nous constatons une efficacité nettement plus faible**, de 1,02 g MS/MJ.

## Discussion

L'absence de différence de croissance entre les 3 niveaux d'apport d'azote au 1<sup>er</sup> cycle et entre les deux niveaux avec 100 et 150 kg/ha au 2<sup>e</sup> cycle dans les conditions optimales d'irrigation nous permet de penser que la croissance observée dans ces conditions s'est effectuée en situation non limitante de nutrition azotée. Les valeurs d'efficacité d'utilisation de l'énergie interceptée correspondent donc à des valeurs potentielles et peuvent être directement comparées entre les 2 cycles, l'efficacité du 2<sup>e</sup> cycle étant supérieure de 25% à celle du 1<sup>er</sup>.

La comparaison de ces 2 valeurs avec celles obtenues en conditions tempérées en France par VARLET-GRANCHER et al. (1989) et en conditions tropicales humides en Guadeloupe est présentée tableau 2. Les valeurs obtenues au Sénégal se situent dans la fourchette des valeurs déjà obtenues sur des variétés voisines. Elles sont également proches des valeurs estimées sur le sorgho grain par RACHIDI et al.

	Pente (g/MJ)	Ordonnée à l'origine (g/m <sup>2</sup> )	r <sup>2</sup>
<b>Premier cycle</b>			
N = 0	2,60 (±0,18)	- 5,74 NS	0,974
N = 100	2,38 (±0,10)	13,31 NS	0,991
N = 150	2,55 (±0,10)	-39,21 NS	0,993
<b>Deuxième cycle</b>			
N = 0	1,10 (±0,07)	24,75 NS	0,965
N = 100	3,24 (±0,18)	- 1,37 NS	0,984
N = 150	2,92 (±0,26)	18,39 NS	0,961

TABLEAU 1 : Valeur des paramètres de la régression entre la biomasse aérienne (MS<sub>a</sub>) et la quantité de rayonnement intercepté par la culture de sorgho (PAR<sub>i</sub>).

TABLE 1 : Values of parameters of regression between above-ground biomass (MS<sub>a</sub>) and amount of intercepted radiation (PAR<sub>i</sub>) in a sorghum crop.

(1993), MUCHOW (1989) et KINIRY et al. (1989). Les différences d'efficience d'utilisation du rayonnement peuvent être liées à **des différences de température**. Ceci permettrait d'expliquer les écarts systématiques entre les conditions tropicales et tempérées. Cependant, la différence entre les 2 périodes de croissance étudiées dans cette expérimentation ne peut pas être reliée à des différences de régime thermique. La variation d'efficience entre les 2 cycles reste encore inexpliquée dans le cadre de cette expérimentation. Malgré tout, on ne peut pas exclure que, compte tenu de la forte évapotranspiration lors du 1<sup>er</sup> cycle, un léger déficit hydrique ait pu apparaître lors de cette période, malgré l'irrigation, comparativement au 2<sup>nd</sup> cycle qui s'est déroulé dans une période d'évaporation moins intense (octobre-novembre).

La croissance potentielle du sorgho au Sénégal est donc essentiellement déterminée par la quantité de rayonnement intercepté par la culture. La rapidité de développement de l'Indice Foliaire de la culture s'avère être le paramètre déterminant. La croissance foliaire est directement dépendante de la température. La période durant laquelle les expérimentations ont été effectuées correspond à des températures optimales et stables (32°C maximum, 20°C minimum) permettant une croissance foliaire maximum. Dans ces conditions, la production du sorgho est directement dépendante des niveaux de rayonnement incident. En saison sèche (février-avril), des températures minimales voisines de 15°C seraient susceptibles de ralentir la mise en place des surfaces foliaires, et donc de diminuer les quantités de rayonnement intercepté par la culture de sorgho. Pour établir un calendrier complet des potentialités de croissance de cette espèce, il sera nécessaire d'établir **une relation entre la vitesse d'établissement de l'indice foliaire et les températures moyennes journalières**.

La relation établie entre le rapport F/T et la biomasse aérienne de la culture permet de relier directement la qualité à la quantité de fourrage produit. En effet,

Année	Lieu	Variété	Cycle	Efficience (g/MJ)
1985	Guadeloupe	Sweet Sioux	1	3,20
			2	3,06
1985	Guadeloupe	Piper	1	2,84
			2	2,84
1985	Lusignan	Oasis	1	2,43
			2	2,56
			3	2,62
1989	Grignon	Oasis	1	2,67
			2	2,35
1990	Lusignan	Oasis	1	2,48

TABLEAU 2 : Valeurs de l'efficience d'utilisation du rayonnement intercepté par le sorgho dans différentes conditions (d'après VARLET-GRANCHER, 1991).

TABLE 2 : Values of radiation use efficiency of sorghum under different conditions (after VARLET-GRANCHER, 1991).



le rapport F/T est un déterminant essentiel de la digestibilité du fourrage (DEMARQUILLY, 1966). Ainsi, cette relation montre que toute augmentation de croissance qui se traduit par un accroissement de la quantité produite correspond en fait à une diminution de la qualité du fourrage récolté. **Ce type de relation doit permettre de mieux raisonner les rythmes de coupe afin d'optimiser le rapport quantité/qualité du fourrage récolté.**

## Conclusion

Les résultats de cette étude ont permis de montrer que le modèle de prédiction de la croissance du sorgho basé sur une efficacité d'utilisation constante du rayonnement intercepté restait bien adapté aux conditions du Sénégal, du moins pendant la saison des pluies. Ce modèle devra être complété afin de prendre en compte l'effet direct de la température sur la vitesse de croissance des feuilles en début de repousse. Ainsi, il semble possible d'estimer les potentialités de croissance de cette espèce à partir de la seule connaissance des températures moyennes journalières et des niveaux de rayonnement incident. La liaison stable entre le rapport Feuilles/Tiges et la biomasse du couvert végétal laisse supposer que l'on pourra également déduire de ce modèle des estimations de la qualité du fourrage récolté. Nous pensons que cette démarche pourrait être généralisée à d'autres espèces fourragères en milieu tropical et que ce modèle devrait fournir un outil efficace de développement.

Accepté pour publication, le 30 avril 1994.

## Remerciements

Ce travail a été financé par la Commission des Communautés Européennes DG XII dans le cadre d'un projet STD2 n° TS<sub>2</sub> CT 88-0157 intitulé: «Productivité des espèces fourragères en climat tropical et possibilités de valorisation par les animaux».

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GOSSE G., CHARTIER M., LEMAIRE G. (1984) : «Mise au point d'un modèle de prévision pour une culture de luzerne», *C. R. Acad. Sci. Paris*, 298, 18, 541-544.
- DEMARQUILLY C. (1966) : «Valeur alimentaire de la luzerne», *Fourrages*, 2, 2-33.
- KINIRY J.R., JONES C.A., O'TOOLE J.C., BLANCHET R., CABELGUENE M., SPANEL D.A. (1989) : «Radiation use efficiency in biomass accumulation prior to grain filling for five graincrop species», *Field Crop Res.*, 20, 51-64.
- LEMAIRE G., DURAND J.L., LILA M. (1989) : «Effet de la sécheresse sur la digestibilité in vitro, la teneur en ADF et la teneur en azote de la luzerne», *Agronomie*, 9, 841-848.

- MUCHOW R.C., (1989) : «Comparative productivity of Maize, Sorghum and Pearl Millet in a semi-arid tropical environment», *Field Crop Res.*, 20, 191-205.
- RACHIDI F., KIRKHAM M.B., STONE L.R., KAMENASU E.T. (1993) : «Use of photosynthetically active radiation by sunflower and sorghum», *Eur. J. Agron.*, 2, 131-139.
- VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., CHARTIER M., ARTIS P. (1982) : «Efficience de conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal», *Oecol. Plant.*, 3, 3-26.
- VARLET-GRANCHER C., LEMAIRE G., CRUZ P., BONHOMME R., GASTAL F., GOSSE G. (1989) : «Maximum aerial dry matter production by forage sorghum», *Proc. 5th Int. Conf. on Biomass for Energy and Industry*, Lisbon, 214-222.

### RÉSUMÉ

Dans le cadre d'un réseau expérimental en milieu tropical et en milieu tempéré, une étude de la dynamique de croissance du sorgho fourrage a été entreprise au Sénégal, pendant la saison des pluies, avec 3 niveaux de nutrition azotée et en conditions irriguées. La production potentielle du sorgho (croissance en conditions optimales d'alimentation hydrique et de nutrition azotée) a pu être exprimée en fonction de la quantité de rayonnement intercepté par la culture. L'efficience d'utilisation du rayonnement par le sorgho ainsi déterminée (2,5 à 3,0 g/MJ) est assez voisine des valeurs obtenues par ailleurs en milieu tropical et en milieu tempéré. Il est donc possible de caractériser le potentiel de production de cette espèce à partir de données météorologiques simples (températures moyennes journalières et rayonnement solaire). L'efficience d'utilisation du rayonnement par la culture s'est trouvée très diminuée lorsque le niveau de nutrition azotée était limitant.

La qualité du fourrage récolté a pu être estimée en première approximation par le rapport Feuilles/Tiges. Ce rapport diminue de façon monotone en fonction de l'accumulation de biomasse dans le couvert végétal, et ceci indépendamment du cycle de croissance et de la fumure azotée. Ainsi, à partir d'un même modèle, on peut estimer l'évolution conjointe de la quantité de fourrage produite et de sa qualité, ce qui devrait permettre une meilleure optimisation des rythmes d'exploitation.

### SUMMARY

#### ***Relationship between dry matter produced and amount of radiation intercepted by a forage sorghum crop in Senegal***

An experiment on the productivity of forage sorghum was carried out in Senegal as part of an experimental network in both tropical and temperate situations. Three levels of nitrogen fertilization were compared, during the rainy season and under irrigation. The potential (i.e. unlimited by water or nitrogen) productivity of the crop was studied in terms of radiation use efficiency (RUE). The range of RUE values obtained in Senegal (2.5 to 3.0 g/MJ) is similar to the values obtained either in tropical or in temperate conditions. N shortage leads to a severe diminution of the crop's RUE.

The evolution of the quality of the forage was studied through the evolution of the leaf/stem ratio. As a stable relationship is observed between leaf/stem ratio and crop biomass, it is possible to describe the dynamics of the decrease of forage quality during growth. It appears thus possible to relate directly forage yield and forage quality by a very simple model, and this should lead to an optimisation of crop management.