

UTILISATION DE MODELES SIMPLES DE BILAIN HYDRIQUE ET DE PRODUCTION DE BIOMASSE POUR DETERMINER LES POTENTIALITES DE PRODUCTION DE PARCOURS EN ZONE SAHELIENNE SENEGALAISE.

CORNET, A.F., Phyto Ecologiste ORSTOM, Adresse Instituto de Ecología, Centro Regional Norte Arido, Apdo. Postal 263, Sucursal B, 35070 Gómez Palacio, Durango, México.

Résumé:

Dans le présent travail, nous présentons l'utilisation de deux modèles associés pour la simulation du bilan hydrique du sol et de la production de biomasse épigée de la végétation naturelle. Le modèle BIJOU utilise les caractéristiques hydrodynamiques classiques des sols et les données climatiques afin de prédire l'état hydrique du sol et l'ETR. Le modèle BIOPE permet de simuler à partir de données de bilan hydrique et des caractéristiques pertinentes de la végétation, la production de biomasse avec l'hypothèse que l'eau est le facteur limitant. Localisé dans la zone sahélienne du Sénégal, le site étudié est constitué d'une formation herbeuse annuelle sur sol sableux. Les valeurs mesurées d'humidité du sol, d'ETR et de biomasse durant les quatre années d'étude (1975 à 1978) ont été utilisées pour la calibration et la vérification des deux modèles. Ceux-ci ont été utilisés pour générer à partir de longues séries d'observations météorologiques, un échantillon de valeurs de production susceptible d'une analyse fréquentielle. Pour le groupement I_B de DAHRA la médiane de production annuelle sur 23 ans est de 1700 kg ha⁻¹ avec un coefficient de variation de 27.8%.

Summary:

This paper concerns the utilisation of two associated simulation mathematical models to predict soil water-balance and plant production. The BIJOU model describes uses only existing meteorological data and the classical hydric characteristics of the soils, to predict soil water and actual evapotranspiration. The BIOPE model uses simplified characteristics of vegetation and water-balance data to simulate above-ground plant production under the assumption that water is the limiting factor. Located in the sahelian zone of Senegal, the investigated site consists on grassland on sandy soil dominated by annuals. The calibration and verification were done with data of soil water content, actual evapotranspiration and biomass production determined during the four years of measurement (1975-1978). This models are used to predict a serial of annual production from the existing meteorological data. The frequency analysis of this values of simulated production is given. For the DAHRA community I_B the annual production media for 23 years simulated is 1700 kg ha⁻¹ with a variation coefficient of 27.8%.

32

Texte en Francais 18 p dactylo + 6 figures.

O. R. S. T. O. M. Fonds Documentaire

N° : 15728

Cote : B

UTILISATION DE MODELES SIMPLES DE BILAN HYDRIQUE ET DE
PRODUCTION DE BIOMASSE POUR DETERMINER LES POTENTIALITES
DE PRODUCTION DE PARCOURS EN ZONE SAHELIENNE SENEGALAISE.

A. CORNET

Phytoécologiste ORSTOM*

INTRODUCTION

Les mesures de production végétale en zone aride montrent l'existence de fortes variations interannuelles, correspondant aux variations climatiques, notamment pluviométriques. L'aménagement et l'utilisation rationnelle par l'élevage des phytocénoses, sahéliennes entre autres, suppose une connaissance de leurs potentialités de production, cette connaissance devant prendre en compte la variabilité interannuelle. C'est pourquoi de nombreux auteurs ont cherché à déterminer les corrélations existant entre les éléments climatiques et la production végétale. L'un des premiers éléments considérés est la pluviométrie annuelle. Le tableau I donne quelques valeurs de production en fonction de la pluie incidente suivant différents auteurs.

* Adresse Actuelle: Instituto de Ecología, A. C.

CRNA - Apartado Postal 263, Suc. B

35070 Gómez Palacio, Durango, México

Tableau I. Quelques valeurs de production globale de biomasse végétale pour un mm de pluie incidente pour la Zone Sahélienne.

BREMAN et al. (1975)	2,6 kg.ha ⁻¹ . mm ⁻¹
LE HOUEROU et HOSTE (1977 b)	2,58 kg.ha ⁻¹ . mm ⁻¹
BILLE (1975 et 1977 b)	3,0 kg.ha ⁻¹ . mm ⁻¹
GROUZIS et SICOT (1981)	2,16 kg.ha ⁻¹ . mm ⁻¹
CORNET (1981a)	3,3 kg.ha ⁻¹ . mm ⁻¹

Les travaux effectués notamment au Sénégal (CORNET, 1981a) et en Haute-VOLTA (GROUZIS, 1979) montrent que les productions par mm de pluie incidente varient fortement suivant les groupements. Leur composition spécifique et leur position topographique déterminent pour chacun une utilisation différente de l'eau. Cependant, si l'on considère une unité de surface suffisante, intégrant divers groupements et l'ensemble des éléments du paysage on obtient des valeurs globales assez proches comme le montre le tableau I.

D'autres éléments climatiques tels que la durée de la saison des pluies (BILLE, 1977 a), la pluie efficace, la pluie infiltrée (GROUZIS et SICOT, 1981), l'évapotranspiration relative (ETR) (FLORET et PONTANIER, 1978) ou leurs combinaisons (SIMS et SINGH, 1978) ont été utilisés pour déterminer des corrélations entre climat et production.

4

On peut en fait varier la nature des relations mathématiques empiriques traduisant les corrélations entre éléments climatiques et la production de biomasse. Certains auteurs tels que LEITH (1976) ont fait de nombreuses tentatives. On ne doit cependant pas oublier que cette méthode possède des limitations propres à l'échelle d'utilisation, à la représentativité des éléments pris en compte et à la faible précision des résultats.

Au niveau des éléments considérés, depuis les travaux de DE WIT (1958) la plupart des auteurs considèrent que l'élément le plus pertinent, pour relier alimentation en eau et production, est le rapport ETR cumulée/ETP moyenne. L'ETR étant difficilement mesurable, elle peut être remplacée par des éléments variant dans le même sens, tels la pluie incidente ou la pluie infiltrée. Mais ces éléments ne sont proportionnels à l'ETR que dans des conditions particulières qu'il convient de vérifier. Par ailleurs, les liaisons entre les éléments climatiques et la production dépendent de la correspondance dans le temps des phases climatiques et des phases du cycle de production.

Ainsi les corrélations entre pluie incidente et production ne sont relativement étroites que dans le cadre de la production moyenne d'une zone assez vaste, intégrant plusieurs groupements et l'ensemble des positions topographiques, dans des conditions climatiques voisines.

En effet, c'est seulement à cette échelle que P et ETR peuvent être considérées comme peu différentes. Cela élimine les applications à des climats très différents (échelle mondiale) ou à des groupements particuliers dont l'alimentation en eau dépend essentiellement des conditions stationnelles.

Actuellement, les progrès réalisées dans l'étude du bilan hydrique et de sa modélisation (FRANQUIN et FOREST, 1977; HANSON, 1976; RAMBAL, 1980; VAN KEULEN, 1975...) permettent à partir des éléments climatiques et de quelques paramètres du sol et de la végétation de déterminer les valeurs de ETR. De nombreux auteurs ont orientés leurs travaux vers l'utilisation de modèles pour la recherche des potentialités de production (PENNING DE VRIES et DJITEYE, 1982; WIGHT and HANKS, 1981).

Les mesures de production des pâturages naturels, réalisées sur des périodes nécessairement courtes, ne sont que quelques situations possibles, dont la représentativité est incertaine. Par contre, en général, il existe d'assez longues séries d'observations météorologiques, d'où la recherche d'un modèle simple de bilan hydrique et de production végétale qui permettrait, après réglage sur les années observées, la simulation du bilan hydrique et de la production, à partir des éléments climatiques et de quelques caractéristiques du sol et de la végétation. On obtiendrait donc autant d'estimations, que d'années d'observation des données météorologiques, avec la possibilité d'effectuer

sur ces résultats, une analyse fréquentielle.

DESCRIPTION DE LA STATION et METHODES DE RECOLTE DE DONNEES.

La station d'étude se situe dans le Centre de Recherches Zootechniques de DAHRA, dépendant de l'Institut Sénégalais de Recherches Agronomiques (I.S.R.A.). Ce centre situé en zone sahélienne, à la limite sud du FERLO-sableux, couvre une superficie de 6 800 ha. Le climat est typiquement sahélien, chaud et sec. Les précipitations sont faibles, la moyenne sur 38 années est de 492 mm avec une grande variabilité inter annuelle (coefficient de variation 29,7%). Elles sont concentrées en une brève période humide de 3 mois. Aout est le mois le plus arrosé avec 35,7% des pluies annuelles, septembre 27,2% et juillet 21,2%. L'évapotranspiration potentielle ETP est voisine de 2000 mm par an.

Deux parcelles d'étude de 5 ha chacune ont été retenues: Dahra-nord et Dahra-sud, installées sur les deux types de sol et de végétation les plus représentatifs de la station. La parcelle de Dahra-nord présente un modelé dunaire de faible amplitude. Le sol y est très sableux de type brun rouge subaride. La parcelle de Dahra-sud sans relief apparent, a un sol sablo-argileux de type ferrugineux tropical à drainage moyen à médiocre. L'étude écologique de ces parcelles nous a conduit à déterminer à l'aide de relevés floristiques, des unités de végétation homogène

appelées groupements et basées sur la présence et la permanence de groupes d'espèces caractéristiques (CORNET & POUPON, 1977). Les mesures de production nette aérienne de la strate herbacée ont été réalisées hors du couvert ligneux sur les trois groupements les plus étendus.

- A Dahra-nord:

Un groupement à *Tephrosia purpurea*, *Phyllanthus pentandrus*, *Aristida stipoides*, *Crotalaria podocarpa*, *Merremia tridentata*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Indigofera aspera*. Ce groupement occupe les hauts de dunes et les pentes, soit environ 40% de la surface de la parcelle. Il est désigné ici par groupement I_b.

Un groupement de bas de pentes et pentes moyennes, caractérisé par: *Tephrosia platycarpa*, *Schoenefeldia gracilllis*, *Brachiaria xantholeuca*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Zornia glochidiata*, *Crotalaria perottetii* et *Eragrostis tremula*. Ce groupement à *Schoenefeldia* et *Brachiaria* dominants, occupe environ 30% de la surface de la parcelle, il est désigné par groupement II_b.

- A Dahra-sud:

Dans cette parcelle, où la végétation a atteint un équilibre dégradé stable, 80% de la surface sont occupés par un groupement très appauvri à: *Zornia glochidiata* dominant et *Eragrostis tremula*, avec de petites quantités de *Schoenefeldia gracilis*, *Brachiaria xantholeuca* et *Digitaria horizontalis*. Il est désigné par groupement I_c.

Ces parcelles sont mises en défens durant la saison des pluies et pâturées en saison sèche. Il est à noter que la strate herbacée est constituée quasi exclusivement d'espèces annuelles, et que le recouvrement est faible: 22 à 65% suivant les groupements et suivant les années.

L'humidité des sols a été étudiée par l'établissement périodique de profils hydriques. Les prélèvements étaient effectués à la tarière jusqu'à trois mètres. L'humidité des échantillons était déterminée par la méthode pondérale, avec séchage à l'étuve à 105°C. Sur chaque site des toposéquences, trois points de prélèvement étaient choisis au hasard, chaque point devant être à plus de 2,50 m d'un point de prélèvement antérieur. Pour chaque point, on prélève 9 échantillons répartis entre 0 et 300 cm de profondeur. L'humidité pour chaque niveau est déterminée en faisant la moyenne entre les trois échantillons obtenus. La fréquence des prélèvements était définie en fonction des possibilités matérielles et variable selon la saison: 1 prélèvement tous les 10 jours en saison de pluies, un prélèvement par mois en saison sèche.

L'évolution de la biomasse végétale épigée est suivie. Les mesures ont été effectuées sur 20 séries de parcelles appariées, selon la méthode décrite par CORNET (1981 b) et dérivée de la méthode de WIEGERT et EVANS,(1964). Les parcelles, d'une surface de 0,25 m², sont réparties au

9

hasard dans une zone représentant de façon homogène le groupement végétal. Les mesures commencent en début de saison des pluies et se poursuivent avec un pas de temps de 7 à 14 jours jusqu'en octobre, fin de la période de production. Les échantillons sont séchés à 85°C puis pesés. La biomasse épigée est connue avec un intervalle de confiance au seuil 0,05, de 19%.

DESCRIPTION DE MODELES UTILISES

L'objectif envisagé était de construire un modèle simple, permettant en utilisant les données climatiques disponibles et un nombre minimum de caractéristiques de la végétation et du sol, de reproduire le plus exactement possible les phénomènes observés.

Ce modèle ne cherche pas à simuler les phénomènes physiques réels des relations sol-plante-atmosphère, mais à reproduire le bilan global des échanges hydriques et de la production végétale.

Pour des raisons de simplification nous utilisons deux modèles: un modèle de bilan hydrique journalier permettant de simuler le bilan hydrique (modèle BIJOU) un modèle de production de biomasse (modèle BIOPE) qui utilise les résultats obtenus avec le précédent modèle (CORNET, 1981 a).

1. Description du modèle de bilan hydrique.

Ce modèle est basé sur la relation de récurrence,

traduisant la conservation de l'eau dans une couche de sol.

$$\Delta S = P - D - ETR$$

ΔS est la variation de stock, au cours de la période considérée

P = Précipitations durant la même période

D = Pertes par drainage

ETR = Evapotranspiration réelle durant la période

Par cette relation et grâce au calcul de l'ETR, on détermine l'évolution du bilan à partir des conditions initiales avec un pas de temps journalier.

Calcul de ETR

Le calcul de ETR est effectué dans le modèle à partir de la relation empirique d'EAGLEMAN (1971). Cet auteur détermine, par ajustement, sur des données expérimentales une relation permettant de calculer ETR en fonction de l'ETP et du rapport d'humidité ou "humidité relative du sol" HR.

Cette relation empirique est assez rigide on peut cependant lui conférer une certaine souplesse d'adaptation grâce à des coefficients de réglage.

Coefficients ou paramètres de réglage

L'évapotranspiration réelle dépend de la quantité d'eau disponible et de l'ETP, éléments que prend en compte

la relation de EAGLEMAN pour le calcul de ETR. Elle peut d'autre part être limitée par l'importance de la surface foliaire, notamment en début de végétation, lors de la mise en place du couvert herbacé annuel. HANSON (1976) qui établit une relation voisine de celle de EAGLEMAN, fait intervenir l'importance du couvert végétal par l'intermédiaire de l'indice foliaire (LAI). Dans le modèle nous introduisons un facteur K de modulation de l'ETP. Ce facteur croît avec le développement de la couverture végétale. On utilise alors un terme appelé "Evapotranspiration maximale" $ETM = K.ETP$ comme limite supérieure d'ETR. La valeur de K est estimée ($K < 1$).

L'humidité relative du sol ne tient compte que de la fraction d'eau disponible et non de l'énergie de liaison de cette eau avec le sol. L'autre coefficient de réglage, le coefficient A, afin de rendre compte des effets des caractéristiques du sol, notamment de la texture sur cette rétention, intervient sur les valeurs prises par HR.

Le sol est découpé en deux strates, d'épaisseur e_1 et e_2 représentant deux réservoirs caractérisés par leur épaisseur et par leur réserve utile maximale $RU1 \text{ max.}$ et $RU2 \text{ max.}$ La vitesse de circulation de l'eau entre les réservoirs dépend des constantes de temps de redistribution $T1$ et $T2$ exprimées en jour. Elles sont prises égales à l'inverse de la perméabilité MUNTZ. Pour DAHRA-Nord, la

perméabilité moyenne mesurée est de $2,4 \text{ cm h}^{-1}$. La constante de temps est de $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ j. cm}^{-1}$, pour un horizon de 100 cm cela représente $T_1 = 1,7 \text{ j.}$ L'ETR est d'abord extraite dans le premier compartiment, puis après assèchement, dans le second compartiment.

Le modèle ne possédant pas de fonction de ruissellement propre, il n'est utilisé que dans le cas où le ruissellement est nul ou négligeable.

Le tableau n°II, récapitule les entrées et les sorties du modèle.

Le choix d'un pas de temps variable, permet d'obtenir des sorties en valeurs journalières, pentadaires, hebdomadaires, et par décades naturelles ou calendaires. Les sorties se font sous forme de tableau imprimé. On peut à la demande obtenir la sortie sur cartes perforées de 1 à 12 variables ou grandeurs intermédiaires calculées. Ces cartes sont utilisées directement par le programme du modèle de production de biomasse.

Tableau II. Entrées et Sorties du Modèle BIJOU

<u>ENTREES</u>	<u>SORTIES</u>
<u>Variables climatiques</u>	<u>Variables principales</u>
pluies journalières P, mm. j ⁻¹	évapotranspiration réelle ETR mm.j ⁻¹
évapotranspiration potentielle décadaire ETP, mm	réserves en eau des 2 comparti- ments mm
<u>Caractéristiques du sol</u>	drainage D mm
réserves utiles maximales des strates 1 et 2, RU ₁ max., RU ₂ max., mm	<u>Variables intermédiaires</u>
constantes de temps T ₁ , T ₂ , j.	eau disponible en début de période mm
<u>Paramètres de réglage</u>	évapotranspiration maximale mm.j ⁻¹
K décadaire	rapport ETR/ETP
A	réserves utiles calculées mm
	déficit hydrique du sol

2. Description du Modèle de Production de Biomasse.

Différents auteurs, notamment BAIER (1977), ANGUS et al. (1980), ont montré que l'on pouvait exprimer la production de biomasse durant un intervalle de temps par une suite de produits de fonctions des variables extérieures.

$$Y = k \cdot W \cdot V1 \cdot V2 \cdot V3 \dots$$

Dans cette relation:

- Y représente la production de biomasse durant une période, par unité de surface

- k est un coefficient de production pour la végétation considérée
- W est une fonction de la biomasse présente
- V1, V2, V3... sont des fonctions des variables de l'environnement.

La production de biomasse d'un groupement végétal, croît proportionnellement l'accroissement de la biomasse présente. Mais les espèces annuelles constituant les groupements ont un cycle court. Leur croissance n'est pas illimitée et la production décroît en fin de cycle. DE WIT (1958) montre qu'il existe, dans le cas des cultures annuelles, une production maximum. Cette valeur dépend de l'espèce végétale et de facteurs externes autres que le facteur eau, dont le plus important paraît être l'alimentation minérale. Cet auteur souligne qu'il est nécessaire de déterminer expérimentalement cette caractéristique pour pouvoir simuler la production d'une culture à partir du bilan hydrique. PENNING DE VRIES et VAN HEEMST (1975) ont montré que pour les Graminées dominantes des parcours sahéliens, les potentialités de production maximum sont très peu différentes d'une espèce à l'autre. D'autre part, les études des cycles d'éléments minéraux (BERNHARD-REVERSAT, 1982; PENNING DE VRIES et al., 1978) ont montré que, dans les conditions naturelles, les quantités d'éléments nutritifs sont très faibles, mais relativement stables d'une

année à l'autre. Ces éléments permettent de considérer qu'il existe une valeur BM de production maximale caractéristique de chaque groupement, qui correspond à la production maximum de ce groupement lorsque l'alimentation hydrique n'est pas limitante. Cette valeur dépend de l'équilibre de l'ensemble des autres facteurs supposés constants dans les conditions naturelles. La proportionnalité entre production et transpiration décroît, au fur et à mesure que l'on se rapproche de la biomasse maximale. On peut écrire que la biomasse produite durant une période est fonction de la biomasse présente B_i en début de période et de la biomasse maximale caractéristique du groupement (BM).

$$W = f (B_i, BM)$$

Nous avons déterminé empiriquement la relation

$$f (B_i, BM) = k_1 \sqrt{B_i (BM - B_i)} \text{ et } k_1 = \frac{2}{BM}$$

L'alimentation hydrique, du fait de la faiblesse des précipitations et des grandes variations de sa répartition constitue un des facteurs essentiels de variation de la production. Le rôle de ce facteur a fait l'objet de très nombreux travaux. DE WIT (1958) et ROBELIN (1962), entre autres, ont montré que lorsque l'alimentation en eau est limitante, la production de biomasse est proportionnelle à la transpiration.

DE WIT (1958) donne la relation:

$$P = m \cdot TR \cdot E_0^{-1}$$

où P est la production de biomasse

TR la transpiration cumulée

E_0 l'évaporation moyenne d'un bac d'eau libre

m étant un coefficient de proportionnalité

variant avec la culture ou la végétation

considérée et avec le niveau de la fumure.

En raisonnant sur la relation de DE WIT, différents auteurs parmi lesquels HANKS et al. (1969) et FRANQUIN (1981) ont montré qu'elle pouvait s'exprimer sous la forme:

$$Y = m \cdot \frac{1}{\overline{ETP}} \cdot \sum ETR$$

où la transpiration TR est remplacée par la somme des évapotranspirations réelles, et E_0 par l'évapotranspiration potentielle moyenne (\overline{ETP}) durant la période.

Cette relation traduit le fait que la production est proportionnelle à la somme des ETR, et que cette proportionnalité varie notamment en fonction de la demande climatique moyenne (\overline{ETP}). L'introduction de \overline{ETP} dans la relation revient à corriger le rapport de proportionnalité en fonction de l'aridité plus ou moins forte de la période. On peut donc envisager de remplacer \overline{ETP} par le rapport $\overline{ETR}/\overline{ETP}$. Ainsi, durant une période de donnée la relation entre l'alimentation

en eau et la production pourra être traduite par la relation:

$$Y = k \cdot g \left(\frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} \right) \cdot \Sigma ETR$$

k est le coefficient de proportionnalité, $g(\overline{ETR}/\overline{ETP})$ ou $g(X)$, si l'on pose $\overline{ETR}/\overline{ETP} = x$, est une fonction modulante.

La fonction $g(X)$ utilisée ici est de la forme:

$$g(X) = a(X)^2 + b(X) + c$$

Si l'on choisit que la valeur maximum de $g(X)$ soit égale à 1 pour $X = 1$ et si l'on connaît expérimentalement la valeur limite X_0 pour laquelle la production cesse, les coefficients a , b , c sont parfaitement définis.

L'expression de la production en fonction de l'alimentation en eau peut être décrite par la relation:

$$Y = k \cdot \left[a \left(\frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} \right)^2 + b \left(\frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} \right) + c \right] \cdot \Sigma ETR$$

Les mesures de production de biomasse et d'ETR montrent que durant la phase linéaire de croissance rapide, au cours de laquelle l'alimentation en eau est bonne, la quantité de matière sèche produite par mm d'eau transpirée est relativement constante et caractéristique de chaque groupement. Ainsi nous avons pour les groupements:

DAHRA-nord I _b	k moyen = 0,95
DAHRA-nord II _b	" = 1,37
DAHRA-sud I _c	" = 1,15

La production d'un groupement herbacé durant une période déterminée pourra être traduite par la relation:

$$Y_i = k \cdot f(B_{i-1}, BM) \cdot g(\overline{ETR}_i / \overline{ETP}_i) \cdot \Sigma ETR_i$$

Dans laquelle: Y_i est la production de biomasse durant la période i en $g \cdot m^{-2}$;

k est l'efficience moyenne de l'eau durant la phase rapide de croissance; $k = \frac{Y}{\Sigma ETR}$ en $g \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$

B_{i-1} est la biomasse en début de période en $g \cdot m^{-2}$;

BM la production maximale de biomasse lorsque l'eau n'est pas limitante en $g \cdot m^{-2}$;

$\overline{ETR}_i / \overline{ETP}_i$ = L'évapotranspiration relative durant la période;

ΣETR_i = l'évapotranspiration réelle cumulée durant la période (en mm)

k et BM sont des caractéristiques du groupement déterminables expérimentalement, ETR et ETP sont des éléments du bilan hydrique mesurés ou obtenus par stimulation à l'aide du modèle BIJOU.

Cette relation permet de simuler l'accroissement de biomasse au cours d'une période déterminée. Si au cours d'une période, cette production de biomasse est nulle (à cause de la sécheresse par exemple, ETR/ETP très faible), la quantité de biomasse présente va décroître du fait de la sénescence et de la mort d'une partie des organes. Peu de chose sont

connues dans ce domaine et nous en sommes réduits à quelques observations: la quantité de biomasse décroît en fonction du temps et de la biomasse présente. Nous introduisons cette relation dans le modèle afin de tenir compte de l'effet des périodes sèches intercalaires.

Les sorties du modèle sont:

- La biomasse présente en fin de chaque période (BP)
- La production de biomasse pour chaque période (PB)
- La biomasse maximale obtenue au cours de l'année (B max).

Les sorties se font sous forme de tableau imprimé, mais l'on peut également obtenir la sortie des cartes perforées. Ces cartes sont alors utilisées directement par le modèle d'analyse fréquentielle AFREQ. Ici les calculs ont été faits avec un pas de temps décadaire, mais il est possible de modifier ce pas de temps pour l'adapter au pas de temps de mesure ou de simulation du bilan hydrique.

La figure 1 donne un schéma d'utilisation des différents modèles.

CALIBRATION ET VALIDATION

Les modèles, dont les programmes sont écrits en FORTRAN IV, ont été mis en oeuvre sur l'ordinateur IBM 3033 du Centre de Calcul de Montpellier (C.N.U.S.C.) pour la simulation du bilan hydrique et de la production de biomasse

à DAHRA sur 4 années, 1975 à 1978. Les données de 1975 et 1976 pour DAHRA-nord, ont été utilisées pour la calibration du modèle de bilan hydrique; celles de 1977 pour les 3 groupements I_b, II_b et I_c ont été utilisées pour la calibration du modèle de production. Les données des autres années ont servi pour la vérification.

Les figures 2 et 3 montrent les comparaisons entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées de réserve utile pour les horizons 0-100 cm et 100-300 centimètres à Dahra-nord pour les 4 années.

On note une très bonne concordance entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées pour l'horizon 0-100 cm, et ceci pour les quatre années observées. Les valeurs les moins satisfaisantes correspondent aux premières grosses averses et à la reconstitution des réserves. Pour l'horizon 100-300 cm, la concordance est moins satisfaisante. Le modèle simule cependant assez correctement l'allure de l'évolution des réserves utilisables dans cette couche. Pour obtenir une concordance acceptable, nous avons considéré comme compartiment supérieur l'horizon 0-100 cm qui contient la quasi totalité des racines.

La calibration du modèle a été effectuée en comparant les valeurs simulées et mesurées de la réserve utile restante dans les deux compartiments de sol. Mais on peut, par ailleurs, comparer les valeurs obtenues d'ETR, avec celles

calculées par la méthode du bilan, en fonction de l'évolution des réserves totales mesurées.

Le Tableau III donne la comparaison de ces valeurs au cours des quatre périodes étudiées. Vingt cinq valeurs sur trente deux montrent une bonne concordance entre valeurs simulées et valeurs calculées compte tenu de la précision sur le calcul de ETR. Sept valeurs présentent un écart significatif; elles correspondent soit à des périodes de recharge des réserves après des pluies abondantes, soit à une simulation défectueuse de l'épuisement de la réserve de la strate 2. De façon générale, le modèle reproduit bien le comportement global de l'eau dans le sol.

Sur les figures 4 et 5 ont été portés, d'une part les courbes de biomasse cumulée obtenues par simulation pour le groupement I_b de DAHRA-nord, d'autre part les points correspondants aux valeurs mesurées avec leur intervalle de confiance. La figure 6 montre les mêmes comparaisons pour les groupements II_b et I_c en 1977.

Les comparaisons des valeurs mesurées et des valeurs simulées appellent les commentaires suivants:

- Pour 1976 et 1977, les résultats de la simulation sont très satisfaisants; on retrouve non seulement l'allure des courbes déterminées expérimentalement, mais les valeurs simulées sont très proches des valeurs mesurées.

1975	ETR _B	ETR _M	1976	ETR _B	ETR _M	1977	ETR _B	ETR _M	1978	ETR _B	ETR _M
3/7-18/7	58,1	55,1	16/7-27/7	15,8	23,2	20/7-1/8	18,7	19,9	20/6-3/7	20,2	17,8
18/7-19/7	34,5	35,1	27/7-10/8	33,1	28,2	1/8-8/8	4,1	<u>11,2</u>	3/7-19/7	28,2	28,5
29/7-12/8	63,6	64,3	10/8-25/8	33,0	38,2	8/8-25/8	14,9	<u>42,2</u>	10/7-30/7	49,0	43,0
12/8-26/8	42,4	50,4	25/8-7/9	50,1	48,0	25/8-2/9	21,7	27,6	30/7-9/8	15,7	<u>25,7</u>
26/8-17/9	88,7	89,8	7/9-22/9	66,4	64,8	2/9-9/9	34,2	28,5	9/8-18/8	17,6	20,7
17/9-2/10	72,3	<u>54,1</u>	22/9-12/10	65,8	70,2	9/9-22/9	43,5	41,1	18/8-30/8	14,7	16,2
2/10-6/11	79,8	73,6	12/10-4/11	44,0	<u>63,8</u>	22/9-5/10	42,8	42,6	30/8-10/9	15,3	<u>29,8</u>
						5/10-19/10	29,9	17,2	10/9-21/9	11,1	<u>34,2</u>
									21/9-30/9	40,9	45,0
									30/9-11/10	20,8	29,4

TABLEAU III - COMPARAISON DES VALEURS DE ETR CALCULEE A PARTIR DE L'EVOLUTION
DES RESERVES MESUREES (ETR_B) ET CALCULEES PAR LE MODELE (ETR_M)

22

- Pour 1975, la simulation reste satisfaisante et les valeurs simulées sont assez proches des valeurs mesurées, bien que nous ne connaissions pas l'intervalle de confiance attaché à ces mesures qui ont été réalisées par BILLE. Cependant, la décroissance de la biomasse se produit plus rapidement que ne le simule le modèle.

Bien que l'alimentation hydrique ne soit pas limitante, la biomasse chute rapidement en octobre. Cela paraît être dû soit au déterminisme spécifique de durée du cycle, soit à des conditions d'alimentation minérale déficiente non suffisamment prises en compte par le modèle.

- En 1978, les courbes de biomasse mesurées montrent une allure atypique liée à l'existence de périodes sèches intercalaires importantes. La simulation rend bien compte de l'allure de ces courbes (cf. fig. 5), mais sous-estime nettement la croissance lors de la première phase pour les groupements I_b et II_b . Cette sous-estimation est due au fait que l'efficacité de l'eau évapotranspirée $k = Y/ETR$ est beaucoup plus élevée que la valeur moyenne notée pour les autres années. Cette différence de comportement peut être expliquée par la contribution importante durant cette phase d'une espèce précoce à grand développement: *Aristida stipoides* habituellement peu abondante.

En toute rigueur, le modèle, calibré pour une marge étroite de pluviométrie 300 à 500 mm, ne devrait pas être utilisé pour des valeurs de pluviométrie très différentes.

Cependant en année sèche, les modifications probables de k et de BM restent faibles devant la variation du terme lié au bilan hydrique. Ce qui permet de justifier son utilisation dans ce cas.

RESULTATS DE LA SIMULATION DE LA PRODUCTION SUR UNE LONGUE PERIODE

A partir des données climatiques disponibles, nous avons, à l'aide des modèles de bilan hydrique et de production de biomasse, simulé la production pour les trois principaux groupements de DAHRA. Nous avons utilisé d'une part les données de DAHRA portant sur 23 ans (1956-1978), d'autre part les données de LINGUERE portant sur 45 ans (1933-1977).

Le Tableau IV montre pour le groupement I_b la fréquence des niveaux de production que l'on peut espérer.

DAHRA et LINGUERE sont deux stations très proches à climat comparable. On voit que l'augmentation de la période de simulation diminue l'influence des années très sèches et augmente la fréquence des productions élevées. On peut penser que la prise en compte des années sèches de début du siècle (1913) ramènerait les fréquences vers des valeurs intermédiaires à celles obtenues dans les deux cas, mais nous ne disposons pas localement de ces données.

TABLEAU IV. Périodicité des niveaux de production pour le groupement Ib obtenue par simulation à partir des données climatiques de DAHRA et LINGUERE.

Niveau de Production	DAHRA (23 ans)	LINGUERE (45 ans)
< 600 kg.ha ⁻¹	1 année/20	1 année/20
600 à 1000	1 année/20	1 année/20
1000 à 1500	5 années/20	3 années/20
1500 à 2000	6 années/20	3 années/20
2000 à 2500	5 années/20	8 années/20
>2500 kg.ha ⁻¹	2 années/20	4 années/20

La production médiane pour DAHRA se situe entre 1514 et 1760 kg de MS.ha⁻¹, et pour LINGUERE entre 2180 et 2300 kg de MS.ha⁻¹. La production assurée 8 années sur 10 est de:

Pour DAHRA	1150 kg.ha ⁻¹
Pour LINGUERE	1450 kg.ha ⁻¹

Les valeurs minimums obtenues par simulation pour ce groupement sont 735 kg.ha⁻¹ en 1972 et 789 kg.ha⁻¹ en 1970.

Si l'on applique à ces valeurs le calcul de charge à partir des besoins en matière sèche selon BOUDET (1975) on obtient:

	DAHRA	LINGUERE
Charge médiane	0,25 UBT.ha ⁻¹	0,3 UBT.ha ⁻¹
Charge possible 8 ans/10	0,16 UBT.ha ⁻¹	0,21 UBT.ha ⁻¹

Ces charges sont calculées à partir des seuls besoins d'entretien du bétail. Ainsi 6,25 ha permettront d'assurer l'entretien annuel de 1 UBT 8 années sur 10. Les années excédentaires permettront une production animale (lait ou viande). Deux années sur 10, il serait nécessaire de disposer de ressources complémentaires pour assurer l'entretien du bétail, sous forme de surfaces mises en réserve, par exemple (BOUDET, 1975).

Le calcul du coefficient de variation effectué sur les productions annuelles simulées du groupement I_b à DAHRA donne une valeur de 27,8%. Le coefficient de variation des totaux pluviométriques annuels est très voisin de 29.7%.

Si nous considérons le parcours Da1 défini par VALENZA et DIALLO (1972), qui correspond à la végétation de la parcelle de DAHRA nord, cette unité comprend d'après notre étude (CORNET, 1981a)

- Le groupement I_b à *Tephrosia purpurea*
- Le groupement II_b à *Schoenefeldia gracilis*
- Un facies de dégradation à *Zornia glochidiata* assimilable pour la production au groupement I_c
- Un facies à Convolvulacées dont la production peut être reliée à celle du groupement II_b dont elle est égale à 75%.

- Un groupement de couronnes d'arbres dont la production est en moyenne supérieure de 15% à celle du groupement environnant. La production de l'hectare géographique de parcours Dal peut être calculée par la relation:

$$PDal = (a+0,15.a.e.) PI_b + (b+0,15.b.e.+0,75.d) PII_b + (c+0,15.c.e) PIC$$

dans laquelle PI_b , PII_b , PIC représentent les productions relatives des groupements I_b , II_b , I_c .

-a, b, c, d, e représentent les proportions des divers groupements et faciès.

Pour l'ensemble de la parcelle, on obtient à l'ha:

	Production	Charge
- Valeur médiane	2758 kg	0,4 UBT
- Valeur assurée 8 années/10	1780 kg	0,26 UBT

En tenant compte des variations des proportions relatives des groupements et faciès, nous obtenons, pour les 700 ha environ, occupés au C.R.Z. de DAHRA par le parcours Dal

	Production	Charge
- Valeur médiane	2200 kg.ha ⁻¹	0,32 UBT.ha ⁻¹
- Valeur assurée 8 années/10	1500 kg.ha ⁻¹	0,22 UBT.ha ⁻¹

Le calcul du coefficient de variation pour l'ensemble du parcours Dal est de 25,6%, donc sensiblement inférieur au

coefficient de variation de la pluviométrie.

DISCUSSION

L'étude réalisée montre que l'utilisation des modèles simples basés sur l'hypothèse que l'eau constitue le facteur limitant essentiel de la production en zone sèche, permet une simulation satisfaisante de la production. Il convient cependant d'effectuer quelques remarques. Parmi les paramètres utilisés dans le modèle de production, BM (biomasse maximale lorsque l'eau n'est pas limitante) doit être considéré vis à vis de sa détermination, et de sa stabilité dans le temps. Ici, il a été estimé en prenant le maximum de biomasse mesuré et en le majorant de 20%. Sa détermination peut être réalisée expérimentalement à condition de disposer de possibilités d'arrosage d'une petite parcelle. La stabilité dans le temps de cette valeur dépend des conditions d'équilibre des autres facteurs. Des successions longues d'années sèches, de surpâturage prolongé, ou d'années humides entraînent des modifications dans les restitutions au sol de matière organique et d'azote et peuvent conduire de ce fait à une modification des potentialités de production. Cela montre les limitations du modèle qui ne tient pas compte des facteurs limitants autre que l'eau.

Lors de l'étude de sensibilité du modèle, en faisant varier le paramètre BM, on constate que pour 15 années sur 23

(les années sèches et moyennes) l'influence de ce paramètre est négligeable, inférieure à 10% sur le résultat final (CORNET, 1981a) par contre pour les années humides les valeurs de biomasse obtenues dépendent des valeurs de BM.

En résumé, le modèle donne une simulation de la production de biomasse très satisfaisante pour les années moyennes ou sèches, durant lesquelles le facteur eau est le facteur limitant essentiel. Pour les années humides la valeur des résultats dépend de la bonne détermination du terme BM, et de sa stabilité dans le temps.

Il est cependant intéressant de posséder un modèle permettant de simuler les valeurs moyennes et faibles de la production qui constituent des contraintes importantes pour les programmes de mise en valeur.

On constate l'intérêt que présente ce type d'étude pour fournir des éléments de base aux projets d'aménagement; cependant, deux difficultés apparaissent pour l'utilisation pratique des résultats:

- L'utilisation des résultats sur un plan appliqué demande leur intégration au niveau régional. Cette intégration suppose qu'il existe un inventaire et une cartographie des systèmes écologiques (FLORET et al., 1978). Or, dans le cas présent, cette cartographie n'a pas été effectuée. Les cartes existantes ont permis une stratification de l'échantillonnage et une vérification de la représentativité des stations, mais

son insuffisantes pour permettre l'intégration des résultats au niveau régional.

- Le calcul de charge à partir des productions calculées doit tenir compte des modalités d'exploitation qui influent sur la valeur du pâturage et le taux d'utilisation; cela nécessite la prise en compte des données humaines et économiques.

Le principe de l'utilisation de modèles pour obtenir les valeurs de production et leur fréquence conserve cependant toute sa valeur, mais cette utilisation nécessite de s'inscrire dans le cadre d'une étude intégrée des ressources naturelles.

BIBLIOGRAPHIE

- ANGUS, J.F., KORNER, A. and TORSSEL, B.W.R., 1980 - A systems approach to estimation of swedish ley production. *Progress report 1979/80; Swedish University of Agricultural Sciences UPSALA*, 29 p.
- BAIER, W., 1977 - Crop weather models and their use in Yield assesement. *WMO, Technical Note n° 151 GENEVA*, 48 p.
- BERNHARD-REVERSAT, F., 1982. - Biogeochemical cycle of soil nitrogen in a semi-arid savannah. *OIKOS* 38:321-332
- BILLE, J.C., 1975 - Mesure de la production herbacée en zone sahélienne. *Colloque sur l'inventaire et la cartographie des paturages tropicaux africains*, 3-8 Mars 1975. BAMAHO 4 p. Ronéo.
- BILLE, J.C., 1977a - Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. *Trav. Doc. ORSTOM, Paris*, 65: 82 p.

- BILLE, J.C., 1977b - Végétation et productivité de 5 sites sahéliens au Sénégal. *Document Technique de la Division des Sciences de l'Environnement et de la Production Végétale*, CIPEA-ILCA, Addis-abeba, 25 p. Ronéo.
- BOUDET, G., 1975 - Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. I.E.M.V.T. *Ministère de la Coopération*, Paris, 258 p.
- BREMAN, H., L. DIARA, M.I. CISSE, and M. TOGOLA, 1975 - Les pâturages tropicaux africains. Bamako, 3-8 Mars 1975, Addis Abeba, *Centre International pour l'Elevage en Afrique* (CIPEA-ILCA) p. 195-213 (Version Française).
- CORNET, A., et POUPON, H., 1978 - Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long du gradient climatique en zone sahélienne au Sénégal. *Bull. IFAN*, 39, A, 2: 241-302.
- CORNET, A., 1981a. - Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes au Sénégal. *Thèse Docteur-Ingénieur*, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 353 p.
- CORNET, A., 1981b. - Mesure de biomasse et détermination de la production nette aérienne de la strate herbacée dans trois groupements végétaux de la zone sahélienne au Sénégal. *Acta OEcologica, OEcolog. Plant.*, 2(16), 251-266.
- EAGLEMAN, J.R., 1971 - An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Meteorol.*, 8: 385-394.
- FLORET, Ch., et PONTANIER, R., 1978 - Etude des relations climat-sol-végétation de quelques formations végétales naturelles du Sud Tunisien, (Production-bilan hydrique des sols). *Inst. Rég. Arides. Médenine, Dir. Ress. Eau et Sols Tunis, CEPE/CNRS Montpellier et ORSTOM*, Paris, 96 p. + annexes.
- FLORET, Ch., LE FLOC'H, E., PONTANIER, R. et ROMANE, F., 1978 - Modèle écologique régional en vue de la planification et de l'aménagement agropastoral des régions-arides. Application à la Région de ZOUGRATA. *Document Techn. n° 2, Inst. Rég. arides. Médenine, Dir. Ress. Eau et Sols Tunis, CEPE/CNRS Montpellier et ORSTOM*, Paris, 73 p. + annexes.
- FRANQUIN, P., et FOREST, F., 1977 - Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop.*, 32, 1: 7-11.

- FRANQUIN, P., 1981 - Production de masse, production de nombre et rendement. *Cah. ORSTOM ser. Biol.* 42, 53-59.
- GROUZIS, M., 1979 - Structure, composition floristique et dynamique de la production de matière sèche de formations végétales sahéliennes (Mare d'OURSI-Haute Volta). A.C.C. *Lutte contre l'aridité dans l'OUDALAN*, D.G.R.S.T. - O.R.S.T.O.M., Rapport multigr. 56 p.
- GROUZIS, M. et SICOT, M., 1981 - Pluviométrie et production des pâturages naturels sahéliennes. A.C.C. *Lutte contre l'aridité dans l'OUDALAN*, D.G.R.S.T. - O.R.S.T.O.M., Rapport multigraphié, 33 p.
- HANKS, R.D., GARDNER, H.R. and FLORIAN, R.L., 1969 - Plant growth. Evapotranspiration relations for several crops in the Central Great-Plains. *Agron. Journ.* 61: 30-34.
- HANSON, C.L., 1976 - Model for predicting evapotranspiration from natives rangelands in the Northern Great Plains. *Trans. of the ASAE*, 19, 3: 471-481.
- LE HOUEROU, H.N. and HOSTE, C.H., 1977 - Rangeland production and annual rainfall relations in the mediterranean basin and in the african sahel-soudanian zone. *J. Range Manag.*, 30, 181-198.
- LEITH, H., 1976 - The use of correlation models to predict primary productivity from precipitation or evaporation. In *Water and Plant Life, Ecological Studies* 19, Springer Verlag Berlin: 392-408.
- PENNING DE VRIES, F.W.T. et VAN HEEMST, H.D.J., 1975 - Production primaire potentielle des terres non irriguées au Sahel. *Doc. ronéo*, 9 p. Wageningen.
- PENNING DE VRIES, F.W.T., KRUL, J.M. et Van KEULEN, H., 1978 - Productivity of Sahelian rangelands in relation to the availability of Nitrogen and Phosphorus from the soil. *Contribution to the WORKSHOP Nitrogen Cycling in West African Ecosystems*, I.I.T.A., IBADAN Nigeria, 14 p. Multigraphié.
- PENNING DE VRIES, F.W.T. et DJITEYE, M.A., 1982 - La productivité des pâturages sahéliens. *Centre for Agricultural Publishing and Documentation*, 525 p. Wageningen.
- RAMBAL, S., 1980 - Modélisation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une steppe à *Rhantherium suaveolens* Desf. de la Zone Aride sud Tunisienne. Thèse Docteur-Ingénieur, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 188 p.

- ROBELIN, M., 1962 - Rapport entre augmentation de poids sec et transpiration en conditions de sécheresse. C.R. Acad. Sc. 254, 4: 718-720.
- SIMS, P.L. and SINGH, J.J., 1978 - The structure and function of ten western north american grasslands. II. Intra seasonal dynamics in primary producer compartment. *J. of Ecology*, 66: 547-572.
- VALENZA, J., DIALLO, A.K., 1972 - Etude des paturages du Nord du Sénégal. I.E.M.V.T. *Etude agrostologique*, n° 34, 311 p.
- VAN KEULEN, H., 1975 - Simulation of water use and herbage growth in arid region. PUDOC Wageningen, 176 pp.
- WIEGERT, R.G. et EVANS, F.C., 1964 - Primary production and the disappearance of dead vegetation on an old field in south eastern Michigan. *Ecology* 45, 1:49-63.
- WIGHT, J.R. and HANKS, R.J., 1981 - A water-balance, climate model for range herbage production. *Journ. of Range Manag.* 34, 4: 307-311.
- DE WIT, C.T., 1958 - Transpiration and crop yields. *Versl. Landbouwk Onderz (Agric. Res. Rep.)* 64, 6, Pudoc, Wageningen.

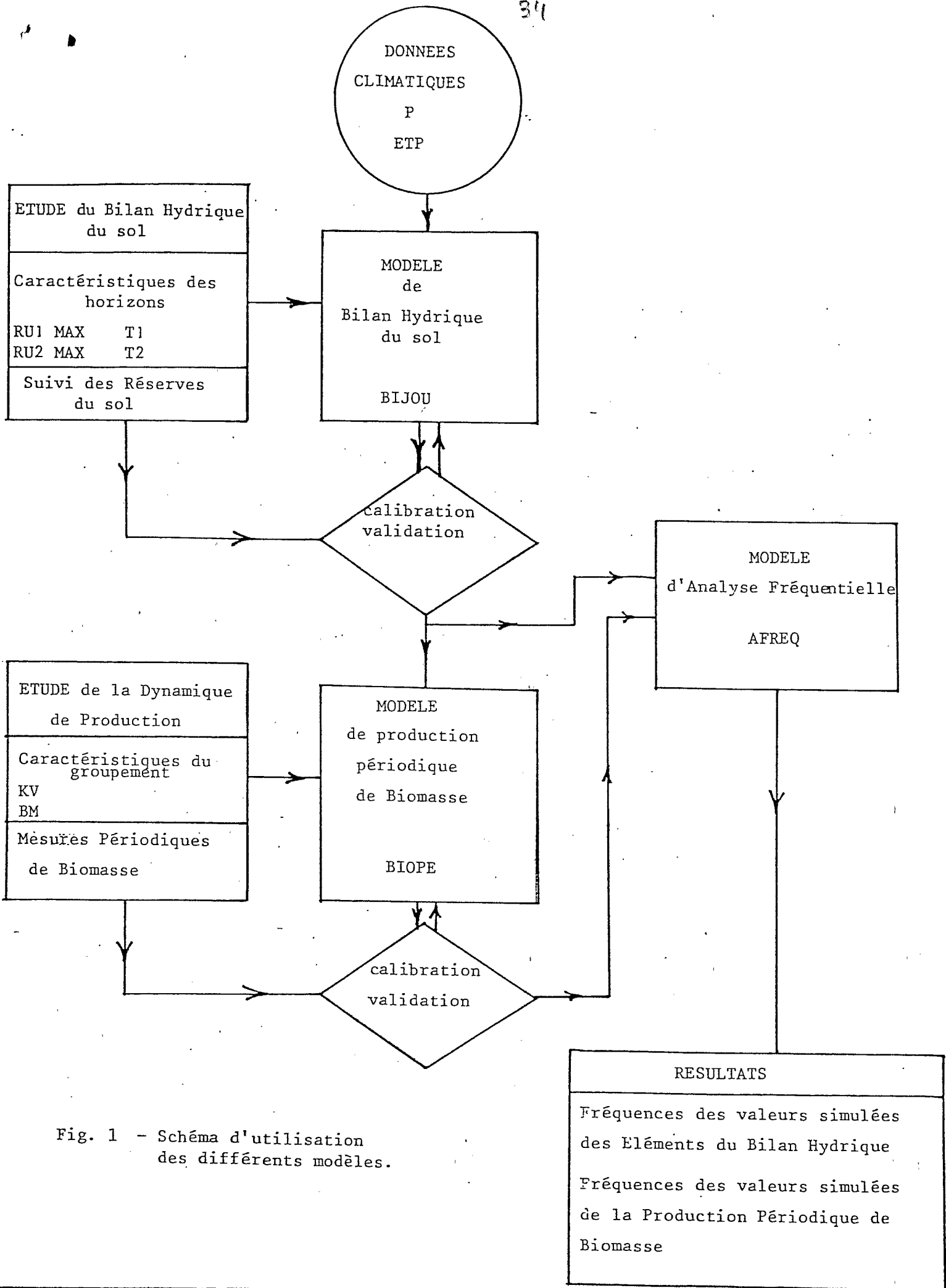


Fig. 1 - Schéma d'utilisation des différents modèles.

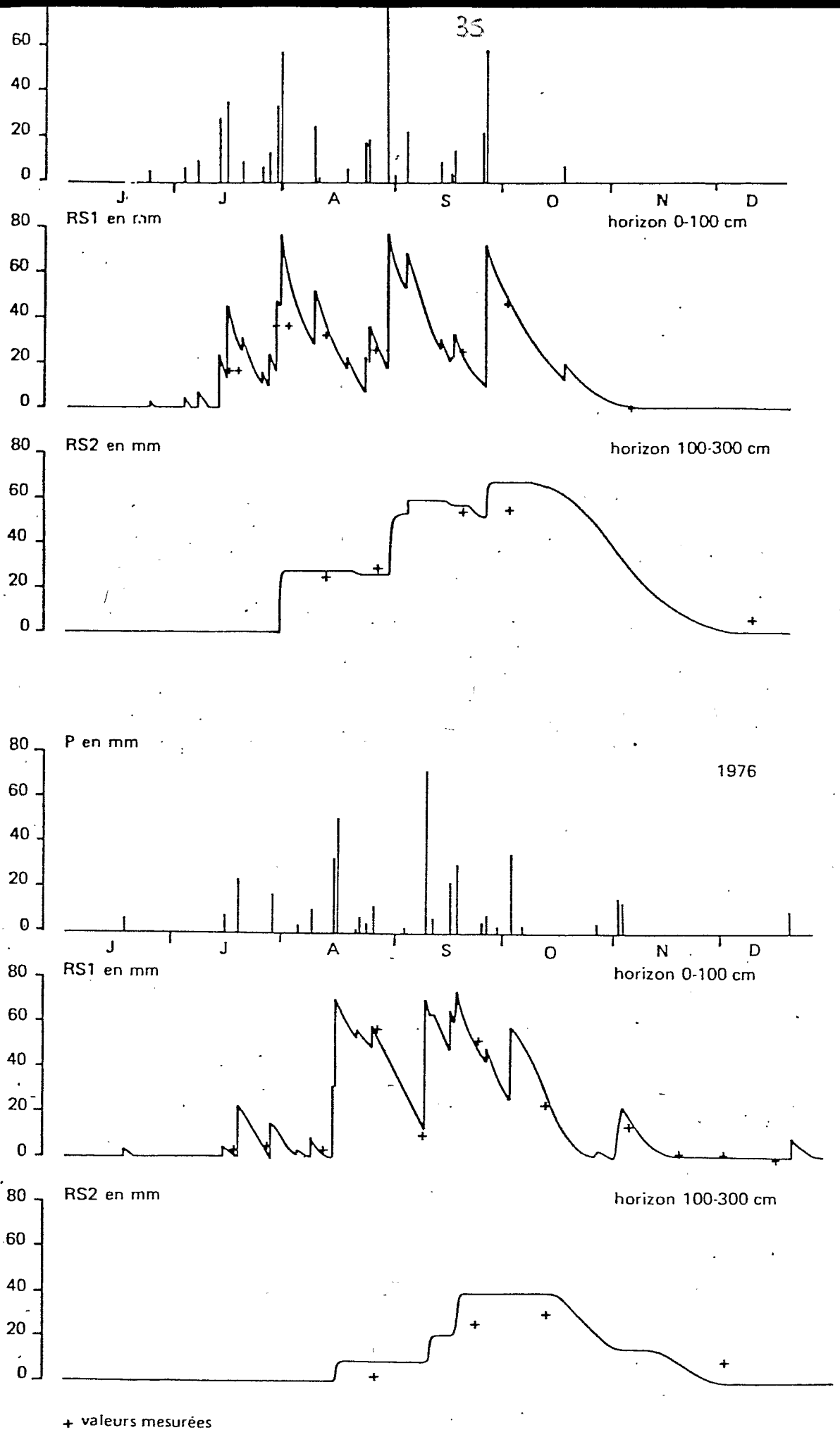


Fig. 2

- Comparaison des valeurs mesurées et simulées de réserve utilisable du sol à DAHRA-nord dune

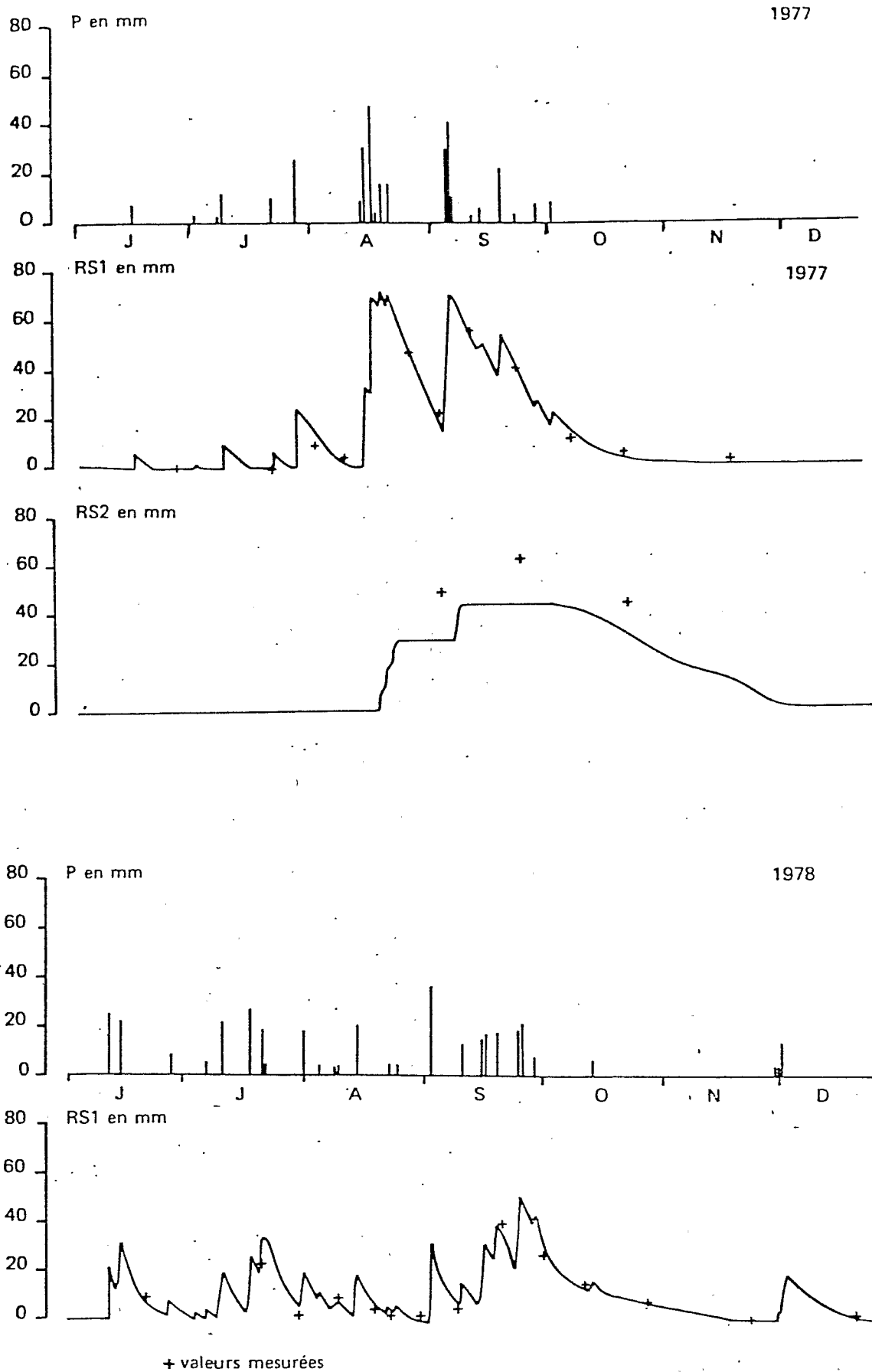


Fig. 3 - Comparaison des valeurs mesurées et simulées de réserve utilisable du sol à DAHRA-nord dune (1977-1978).

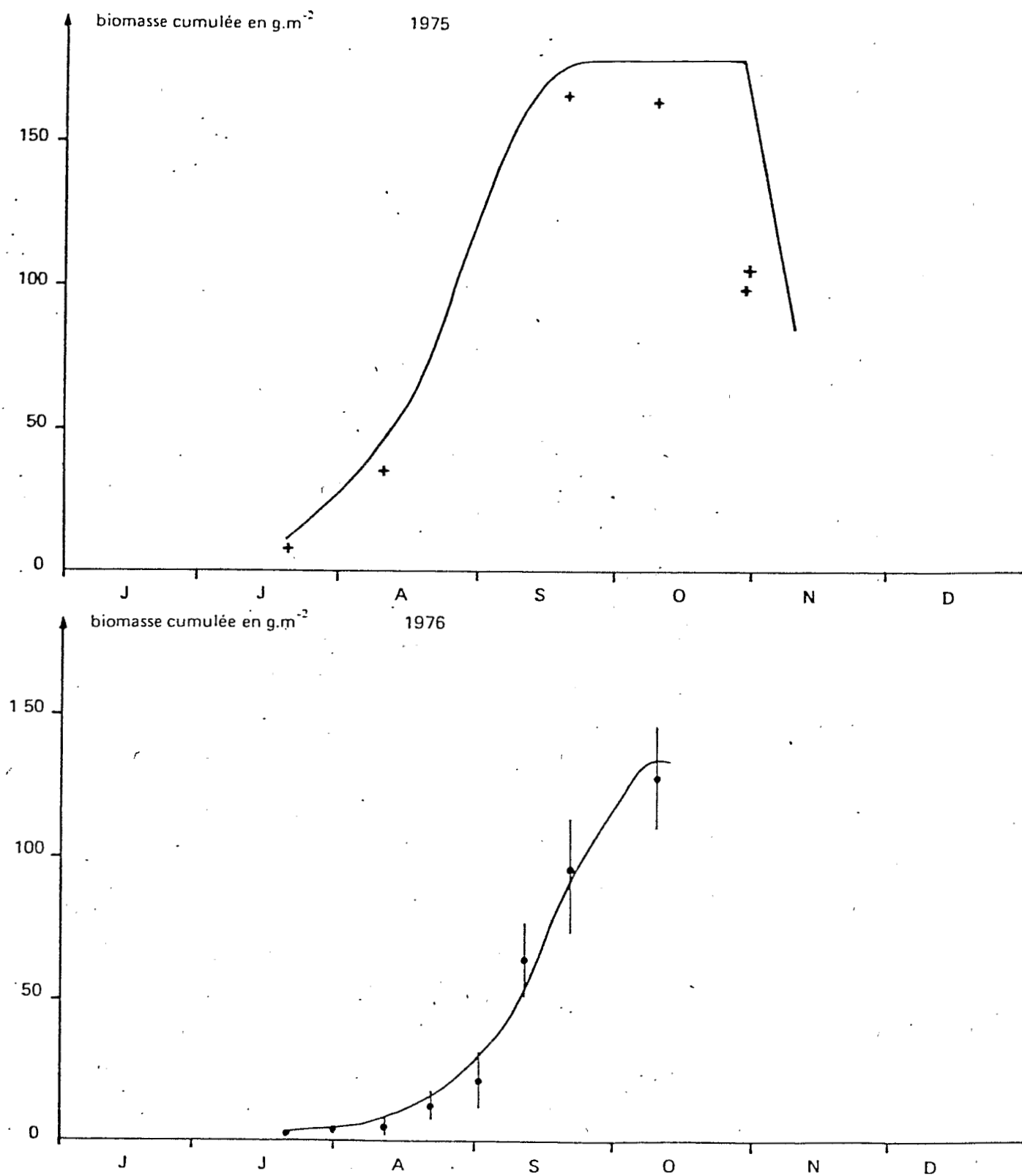


Fig. 4 Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées de biomasse pour le groupement I_B de DAHRA NORD

la ligne continue représente les valeurs $K = 0,95 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ $\text{BM} = 200 \text{ g.m}^{-2}$

+ valeurs mesurées (BILLE 1977_b) intervalle de confiance non connu

• valeurs mesurées | intervalle de confiance

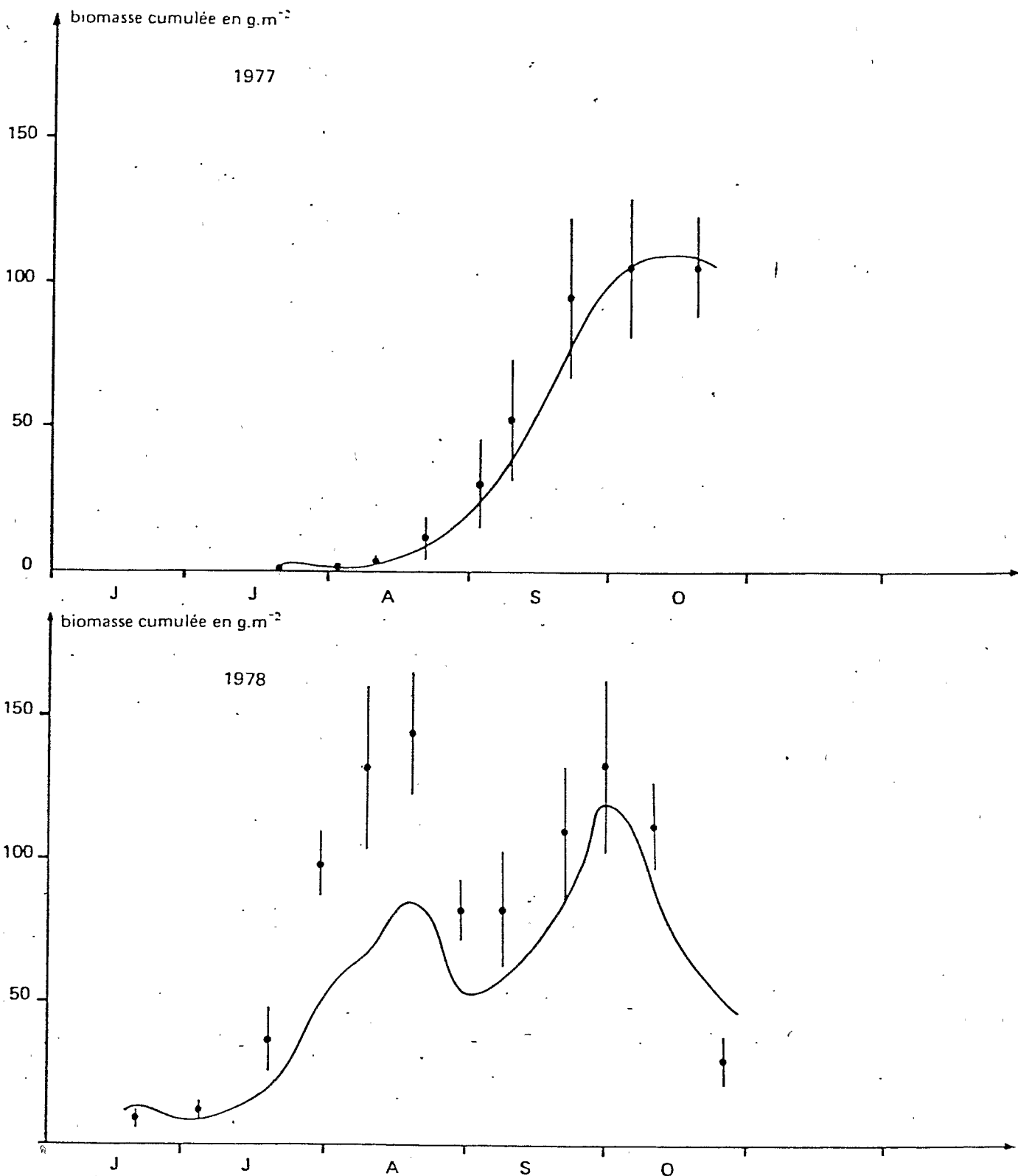


Fig. 5 Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées de biomasse pour le groupement I_B de DAHRA NORD

● valeurs mesurées | intervalle de confiance

la ligne continue représente les valeurs $K = 0,95 g.m^{-2} . mm^{-2} . l$

$BM = 200 g.m^{-2}$

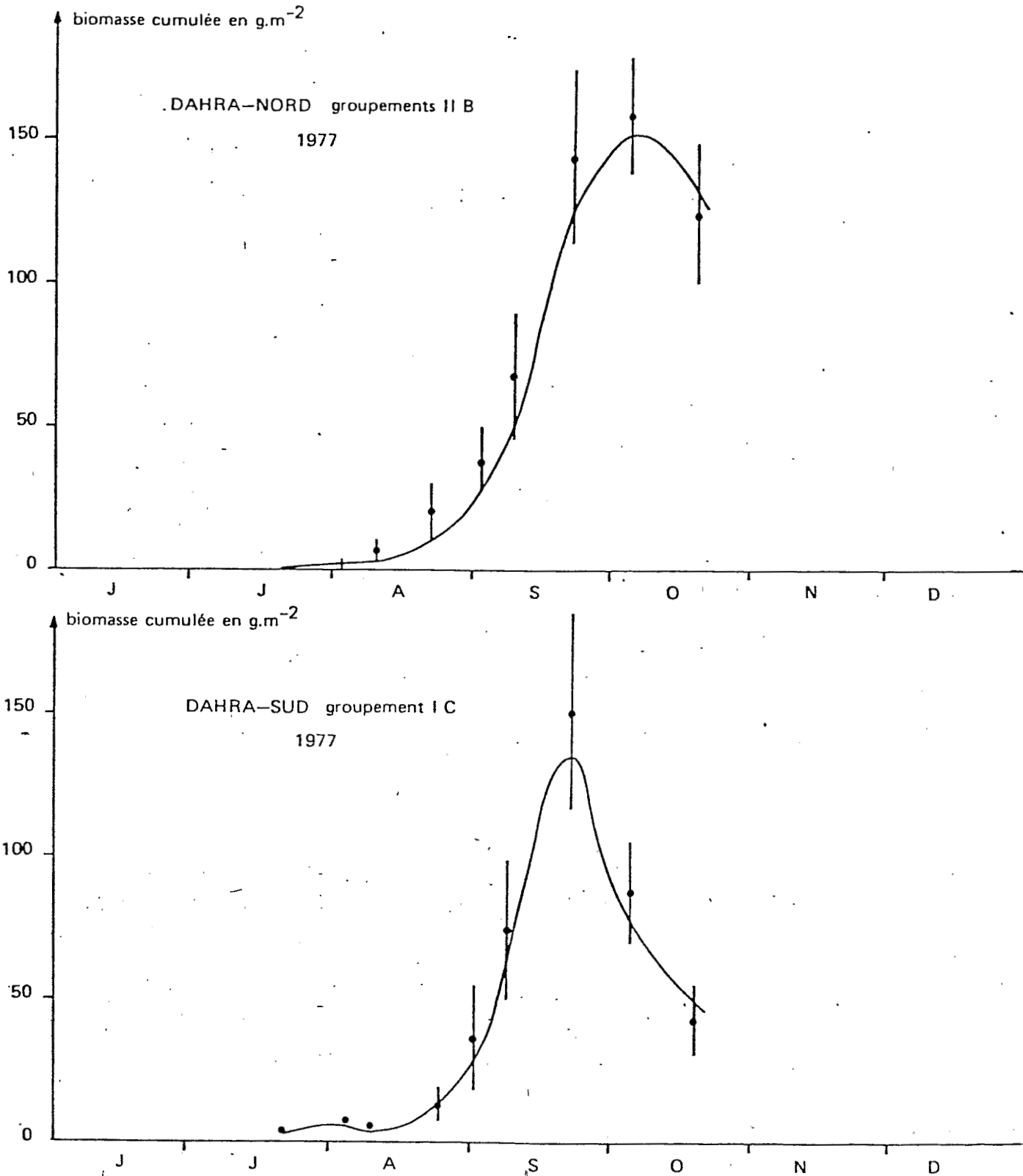


Fig. 6 Comparaison des valeurs mesurées et simulées de biomasse

valeurs mesurées, ● intervalle de confiance
la ligne continue représente les valeurs simulées

pour Dahra Nord II B : $K = 1,37 g.m^{-2} . mm^{-1}$, $BM = 300 g.m^{-2}$

pour Dahra Sud I C : $K = 1,15 g.m^{-2} . mm^{-1}$, $BM = 200 g.m^{-2}$