

16 AVRIL 1985

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

N° : 17327

36
Cote : B Arzuite

Détermination radiométrique de la phytomasse herbacée en milieu sahélien : perspectives et limites

M. Grouzis

Section Écologie Végétale, O. R. S. T. O. M., B. P. 182, Ouagadougou, République de Haute-Volta

M. Méthy

Département de Physiologie Écologique du C. E. P. E. Louis-Emberger, C. N. R. S., B. P. 5051, 34033 Montpellier Cedex (France)

RÉSUMÉ

La détermination de la productivité des herbages et de la capacité de charge qui en résulte, pour l'aménagement d'une zone pastorale, nécessite des mesures fréquentes et extensives de la phytomasse. Les méthodes basées sur les propriétés du rayonnement solaire réfléchi offrent de nombreux avantages par rapport à la technique classique de la récolte intégrale. Malheureusement, ces méthodes n'ont été éprouvées que sur des végétations prairiales monospécifiques, artificielles ou semi-naturelles, ce qui ne permet pas de juger de leurs possibilités d'utilisation sur une végétation spontanée et pluri-spécifique.

Tout en précisant les conditions d'utilisation d'un radiomètre (effet du type de temps, de la hauteur du soleil), ce travail définit principalement les effets de la structure de la végétation, et ceux du stade phénologique sur les paramètres d'étalonnage, dans les steppes à épineux sahéliens du Nord de la Haute-Volta (Mare d'Oursi, 412 mm de précipitations annuelles). Les variations du rapport (R) des signaux photoélectriques obtenus dans les domaines spectraux proche infrarouge et rouge en fonction de la hauteur angulaire du soleil, ainsi que les effets de l'instabilité des conditions d'ensoleillement soulignent la nécessité d'utiliser l'appareil par temps serein et en milieu de journée. Les variations de la phytomasse herbacée en fonction de R peuvent être ajustées à une régression linéaire. Les liaisons sont toujours hautement significatives ($\alpha = 0,01$) quels que soient le type structural et le stade phénologique. Au moment du maximum de biomasse, les valeurs du coefficient de détermination montrent qu'en moyenne 70 % de la variabilité de la biomasse sont expliqués par les variations du rapport R . La comparaison des droites par analyse de covariance montre que les paramètres sont significativement différents. Une courbe d'étalonnage est donc nécessaire pour chaque type structural. Il faut par ailleurs étalonner l'appareil pour les principaux stades phénologiques.

Lorsque le taux de matière végétale non photosynthétiquement active augmente, le rapport R diminue; la technique devient inutilisable.

MOTS-CLÉS : Radiométrie - Phytomasse herbacée - Structure - Phénologie - Steppe sahélienne.

SUMMARY

In studies of plant production for pasture management, extensive, frequent and accurate measurements of plant biomass are needed. The remote sensing methods which are based on the measurement of shortwave radiation in the visible and the near infrared are more advantageous (fast, non-destructive, cheap...) than the traditional method of hand clipping and weighing of vegetation. Up until now, the near infrared/red radiance ratio (R) method has only been applied to artificial or semi-natural prairie vegetation composed of only one species. Calibration on natural and multi-specific vegetation is therefore necessary before practical application is possible.

The main purpose of this paper is to evaluate the applicability of this remote sensing technique on natural vegetation types of Sahelian shortgrassland in the North of Upper Volta (Oursi Pond, mean annual precipitation: 412 mm). The effects of vegetation structure and phenology on calibration relationships are examined. The results suggest that the radiometric device should be used on days with clear skies at about midday, because the reflectance ratio changes with the solar elevation. The variation in herbaceous phytomass can be expressed as a function of R with a linear regression. The correlations are always highly significant ($\alpha = 0,01$) and they depend on the structural type and the phenological stage of the vegetation. At the stage of maximum standing crop, the spectral data explain about 70 % of the variability in total aerial herbaceous phytomass. The comparison of linear regression equations by means of analysis of covariance shows that, in practice, a separate calibration relationship is necessary for each vegetation type and for each phenological stage.

At the end of the phenological cycle, when vegetation turns brown due to the reduction of chlorophyll content, the reflectance ratio decreases and the spectral measurement technique becomes unusable.

KEY-WORDS: *Spectral reflectance measurements - Herbaceous phytomass - Structure of vegetation - Phenology - Sahelian shortgrassland - Upper Volta.*

I. — INTRODUCTION

Ce travail s'insère dans le cadre d'une étude menée dans le Nord de la Haute-Volta, sur le thème de la productivité et de l'évolution des phytocœnosés sahéliennes. La détermination de la productivité des herbages et de la charge pastorale qui en résulte, essentielle dans l'aménagement d'une zone pastorale, nécessite des mesures extensives et fréquentes de la phytomasse. La technique classique de la récolte intégrale, avec coupe et pesée de la végétation, a été jusqu'ici largement utilisée; elle a notamment permis de définir une méthode d'évaluation de la phytomasse herbacée à petite échelle (LEVANG & GROUZIS, 1980). Cette technique de mesure directe est donc utilisable avec succès, mais elle s'avère le plus souvent longue et onéreuse, en particulier dans le cas des couverts hétérogènes; de plus, son caractère destructif ne permet pas de suivre la dynamique saisonnière d'une parcelle sur un même échantillon.

L'établissement de corrélations entre la phytomasse et certaines caractéristiques morphologiques comme la longueur ou la largeur des feuilles permet d'éviter ce dernier écueil mais, là encore, il s'agit d'une méthode longue et coûteuse. Plus rapide est l'estimation visuelle par des observateurs entraînés (PECHANEL & PICKFORD, 1937; TADMOR *et al.*, 1975) mais le facteur humain, plus encore que dans toute autre méthode, intervient pour une bonne part dans la précision des résultats.

Plus récemment, à la suite des travaux de FLETCHER & ROBINSON (1956) une méthode de type électronique a été développée, utilisant l'effet capacitif correspondant aux propriétés diélectriques de la matière végétale. Cette méthode présente l'avantage d'une certaine rapidité, mais l'inconvénient d'être basée sur une sensibilité au contenu en eau (ALCOCK & LOVETT, 1967).

Un dernier groupe de méthodes utilise les interactions entre le milieu végétal et des radiations artificielles ou naturelles. Ainsi l'atténuation des rayons bêta ou gamma (UNGER, 1967) donne-t-elle lieu à des techniques intéressantes autant par leur coût que par leur précision. Un couvert végétal est en fait, dans les conditions naturelles, le siège d'interactions entre le rayonnement d'origine solaire et les organes végétaux. Obstacles privilégiés, les feuilles présentent des propriétés optiques du point de vue de la transmission et de la réflexion, qui sont fonction de la radiation considérée : élevées dans le proche infrarouge, la transmittance et la réflectance sont

au contraire faibles dans le domaine photosynthétiquement utilisable (R. P. U.) où s'exerce l'action des pigments chlorophylliens, avec toutefois un maximum relatif vers 550 nm. Les propriétés optiques du couvert présentent des caractéristiques semblables qui peuvent, dans certains domaines spectraux, être bien corrélées à la quantité de matière végétale à l'origine de l'interception (JENSEN, 1980). Ce sont en fait des indices basés sur une combinaison de propriétés dans plusieurs domaines spectraux qui ont fait l'objet du plus grand nombre de travaux. JORDAN (1969) est ainsi parvenu à la détermination de l'indice foliaire des forêts tropicales à partir du rapport des transmittances pour 800 nm et 675 nm, longueurs d'onde pour lesquelles on trouve généralement les corrélations les plus favorables, respectivement positives et négatives. Mais c'est avec l'essor de la télédétection passive que ce type de technique, appliqué au rayonnement ascendant réfléchi vers la basse atmosphère, a connu son plein développement. A la suite des travaux de COLWELL (1973) le rapport infrarouge/rouge a été en particulier appliqué à l'analyse des images LANDSAT (CARNEGIE *et al.*, 1975; JOHNSON, 1976). Au sol, les résultats obtenus par ce type de méthode sont prometteurs. Cependant, les observations n'ont été réalisées que sur des végétations prairiales monospécifiques (*Bouteloua gracilis* : PEARSON *et al.*, 1976; *Dactylis glomerata* : METHY, 1977), exception faite des travaux de THALEN *et al.* (1980) relatifs à des couverts semi-naturels aux Pays-Bas. De plus les individus présentaient, à l'instant des mesures, le même stade phénologique. L'application de la méthode à d'autres types de végétation demandait donc à être précisée.

Le but du présent travail est d'étudier les réponses d'un radiomètre à une gamme de types de végétation plurispécifique sahéenne, d'architecture et de composition floristique variées. Il se propose par ailleurs de mettre en évidence les effets du stade phénologique sur les paramètres d'étalonnage.

II. — MATÉRIELS ET MÉTHODES

1. CARACTÉRISTIQUES ÉCOLOGIQUES DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Le bassin versant de la mare d'Oursi, cadre de ces recherches, se situe au Nord de la Haute-Volta entre les méridiens 0°10' et 0°40' ouest et les parallèles 14°20' et 14°50' nord. Il s'étend sur la bordure septentrionale de la zone soudano-sahéenne d'Aubreville (1949). Celle-ci est caractérisée par une longue saison sèche (octobre à mai) et une courte saison pluvieuse. La pluviométrie annuelle moyenne (1976-1980), répartie sur 42 jours de pluie, est de 412 mm. L'E. T. P. Penman annuelle moyenne est de 2 671 mm.

La végétation est constituée d'une strate herbacée à base de plantes annuelles à cycle court et d'une strate arbustive plus ou moins lâche. Les spectres biologiques révèlent la dominance des thérophytes (50 à 70 % des espèces) et des phanérophytes, types biologiques qui présentent la meilleure adaptation écologique à la saison défavorable (GROUZIS, 1979). L'analyse floristique souligne l'importance des graminées dont la contribution spécifique atteint 97 % dans les groupements sur glacié ; les légumineuses sont par contre bien représentées dans les terrains à texture sableuse.

2. PRINCIPE PHYSIQUE DE LA MÉTHODE

La méthode est basée sur l'existence dans le proche infrarouge (notamment aux alentours de 800 nm) d'une corrélation positive entre réflectance et phytomasse. La corrélation entre ces deux paramètres est au contraire négative dans les longueurs d'ondes du R. P. U. correspondant à l'absorption chlorophyllienne (plus particulièrement aux alentours de 680 nm). C'est le rapport des deux réflectances qui est utilisé de manière à accroître la sensibilité de la méthode.

Le radiomètre se compose, comme dans METHY (1977), de deux cellules photoélectriques au silicium, équipées chacune d'un filtre interférentiel à couches métalliques dont les pics de transmission sont respectivement situés à 676 nm et à 802 nm pour l'appareil utilisé. Un système de diaphragmes limite le champ angulaire à 25°. Pour une distance de 1,25 m, ces deux ensembles visent une même cible, assimilable à une surface circulaire d'un diamètre de 0,55 m. Un millivoltmètre d'une résolution maximale de 100 μ V permet la mesure de la tension aux bornes des résistances de charge des photocellules. Cette tension est proportionnelle à la luminance spectrale énergétique des cibles visées, c'est-à-dire la puissance rayonnée par unité d'angle solide (ou intensité) ramenée à l'unité de surface émettrice apparente.

La détermination effective des réflectances monochromatiques implique la visée d'un écran étalon à l'instant des mesures. Cependant, la distribution spectrale du rayonnement global varie peu au cours d'une journée sereine et le rapport des énergies monochromatiques incidentes est sensiblement constant. Pour une cible donnée le rapport des réflectances recherché est donc en fait égal, à un facteur constant près, au rapport R des tensions délivrées par le radiomètre.

La fraction réfléchie du rayonnement solaire, qui dépend de l'architecture du couvert, des propriétés optiques des feuilles et du sol, varie en fonction de la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon (h). Il en est de même pour le rapport des deux réflectances monochromatiques choisies et on voit apparaître la nécessité d'effectuer, sur le matériel végétal étudié, une analyse préalable de cet effet, pour permettre une comparaison des mesures relatives à des hauteurs solaires différentes. Cette analyse comportera l'établissement de la courbe $R = f(h)$ sur une cible représentative. En affectant une valeur unitaire au rapport obtenu pour la hauteur du soleil choisie pour les normalisations ultérieures (par exemple 60°) il est possible d'obtenir une courbe de normalisation permettant d'attribuer à chaque hauteur du soleil un facteur de normalisation. Le produit par ce facteur des valeurs de R donne des mesures normalisées comparables entre elles.

3. MATÉRIEL VÉGÉTAL

3.1. Caractéristiques de la végétation étudiée lors de l'étalonnage

Six unités de végétation correspondant à des structures et à des situations écologiques bien contrastées ont été retenues pour l'étalonnage du radiomètre.

Le groupement établi sur dune (Oursi, fig. 1 A) est dominé par *Zornia glochidiata* D. C. (contribution spécifique 66,4 %), légumineuse basse (\approx 20 cm) plus ou moins étalée. Les autres espèces constituant ce groupement sont : *Heliotropium strigosum* Willd. (9,6 %), *Brachiaria xantholeuca* (Hack. ex Schinz.) Stapf., *Tribulus terrestris* L. (4 %), et 18 espèces compagnes dont la contribution spécifique s'élève à 16 %.

Alysicarpus ovalifolius (Schum et Thonn) J. Léon (36,7 %), *Cenchrus biflorus* Roxb. (23,9 %), *Schoenefeldia gracilis* Kunth (17 %), *Aristida mutabilis* Trin. et Rupr. et 15 espèces diverses (15,4 %) constituent le groupement établi sur sables éoliens en position de piémont (Kolel, fig. 1 B). Le couvert végétal est relativement continu et l'on peut discerner dans le couvert herbacé une strate haute (40-45 cm) constituée par les graminées cespitueuses érigées et une strate basse, représentée par *Alysicarpus ovalifolius*, légumineuse à port plus ou moins étalé.

Deux groupements sont situés dans un bas-fond argileux de Winde Tiuluki. La station de Winde (fig. 1 D) représente une végétation à recouvrement continu, dominée par *Panicum laetum* Kunth. (70 %), graminée étalée (20-25 cm) portant à maturité des panicules lâches et blanches. Les autres espèces sont : *Aeschynomene indica* L. (21 %), *Echinochloa colona* (L.) Link (5 %) et diverses espèces (4 %).

Le deuxième groupement (Winde Protégé, fig. 1 C) correspondant à la même situation écologique dérive de la précédente par une simple mise en défens de la végétation. La composition floristique et la structure sont alors totalement modifiées (GROUZIS, 1982). *Aeschynomene indica* (96 %), légumineuse érigée d'environ 60 cm de hauteur, confère au groupement sa physionomie.

Le groupement situé sur un glacis à placages sableux (Gountoure) est constitué de 2 sous-unités correspondant aux microvariations des facteurs écologiques, en particulier de la microtopographie. Les microbuttes sableuses (fig. 1 E) sont dominées par *Aristida mutabilis* et *Schoenefeldia gracilis*.

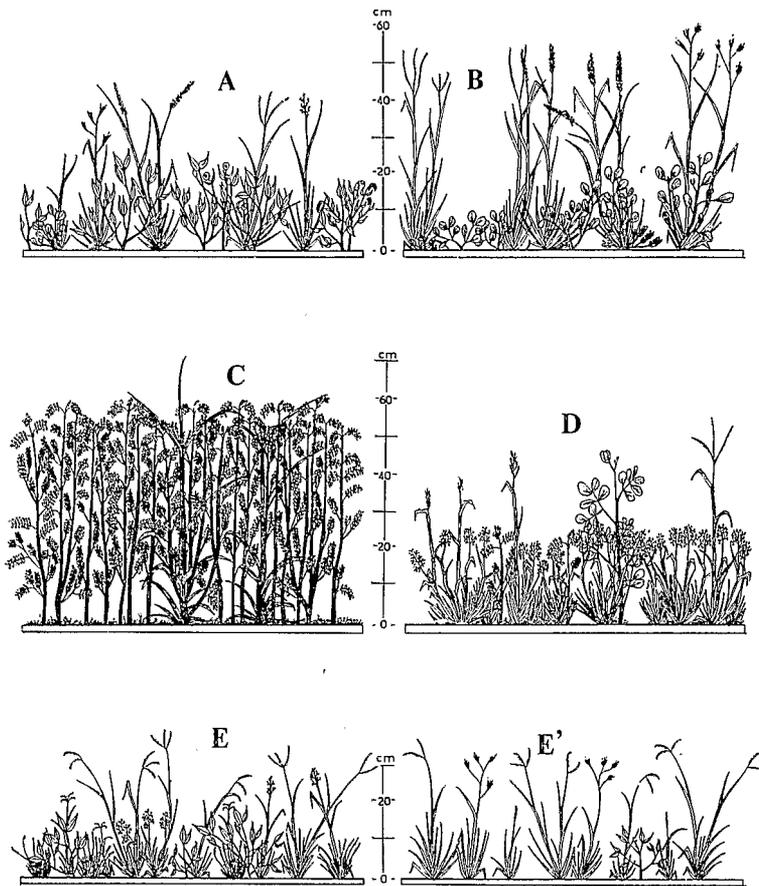


FIG. 1. — Aspect architectural des groupements végétaux étudiés.

- A : Oursi, groupement à *Zornia glochidiata*, *Heliotropium strigosum*, *Brachiaria xantholeuca*.
 B : Kolel, groupement à *Alysicarpus ovalifolius*, *Cenchrus biflorus*, *Schoenefeldia gracilis*.
 C : Winde Protégé, groupement à *Aeschynomene indica* et *Cyperus esculentus*.
 D : Winde, groupement à *Panicum laetum*, *Echinochloa colona*, *Aeschynomene indica*.
 E : Gountoure, groupement à *Aristida mutabilis* et *Schoenefeldia gracilis* sur microbuttes sableuses.
 E' : Gountoure, groupement à *Zornia glochidiata*, *Tripogon minimus* et *Panicum laetum* sur dépressions.

La végétation est peu dense. Les microdépressions, zone d'épandage à bilan hydrique plus favorable (fig. 1 E'), comprennent une végétation à recouvrement élevé, à base de *Zornia glochidiata*, *Tripogon minimus* (A. Rich) Hochst. ex Steud et *Panicum laetum*. Les échantillons ont été distribués dans ces deux sous-unités, mais ont ensuite été réunis car, à l'échelle de l'utilisation pastorale, l'ensemble de ce groupement constitue une homogénéité certaine.

Le groupement à *Schoenefeldia gracilis* sur le glacis limoneux de Kouni-Kouni représente une végétation à recouvrement discontinu, c'est-à-dire qu'il est constitué d'une alternance de plages de sol nu et de plages couvertes. Ce groupement est floristiquement pauvre puisque 6 espèces seulement

ont été dénombrées lors de son analyse. Parmi celles-ci *Schoenefeldia gracilis* (97 %) constitue à elle seule la presque totalité de la végétation.

Les teneurs en eau et les proportions moyennes en matériel sec des échantillons relatifs aux différents stades phénologiques sont rassemblées dans le tableau I. Soulignons que le stade phénologique est caractérisé par celui de la ou des espèces dominantes puisque le cycle phénologique des taxons constituant la population n'est pas synchrone (GROUZIS, 1979). L'examen de ce tableau montre que la teneur en eau est généralement supérieure à 62 % excepté pour le stade de dessèchement. La proportion moyenne de matériel non photosynthétique de l'échantillon est faible, sauf pour le stade de dessèchement où il peut constituer une grande fraction de l'échantillon (Kouni 85,4 %, Winde Protégé 80 %).

TABLEAU I. — Teneur en eau (% MF) et proportions moyennes de matériel non photosynthétique pour les différents stades phénologiques.

Stations	Phénologie	Date de mesure	Teneur en eau $\bar{x} \pm s$	Poids de matériel sec en % du total
Oursi	<i>v</i>	24-7-1981	77,7 \pm 5,7	1,2
	<i>m</i>	12-8	74,4 \pm 9,4	7,2
	<i>fF</i>	31-8	70,4 \pm 8,7	6,2
	<i>d</i>	20-9	60,9 \pm 6,6	44,4
Kolel	<i>v</i>	25-7-1981	77,7 \pm 6,6	3,4
	<i>m</i>	12-8	78,1 \pm 3,1	19,9
	<i>fF</i>	6-9	68,2 \pm 6,2	30,4
	<i>d</i>	21-9	—	—
Gountoure	<i>v</i>	27-7-1981	73,3 \pm 7,8	2,9
	<i>m</i>	15-8	68,4 \pm 11,3	10,7
	<i>fF</i>	26-8	66,3 \pm 7,7	13,4
	<i>d</i>	21-9	53,6 \pm 9,9	49,9
Kouni-Kouni	<i>v</i>	—	—	—
	<i>m</i>	—	—	—
	<i>fF</i>	2-9-1981	61,8 \pm 15,8	9,1
	<i>d</i>	24-9	40,8 \pm 17,3	85,4
Winde	<i>v</i>	31-7-1981	79,9 \pm 3,3	13,4
	<i>m</i>	12-8	71,7 \pm 7,6	17,4
	<i>fF</i>	2-9	67,3 \pm 6,4	29,4
	<i>d</i>	23-9	44,8 \pm 11,5	64,5
Winde Protégé	<i>v</i>	31-7-1981	81,2 \pm 1,1	2,5
	<i>m</i>	12-8	75,8 \pm 3,1	7,2
	<i>fF</i>	2-9	69,9 \pm 2,4	32
	<i>d</i>	23-9	20,3 \pm 7,2	79,8

v : végétatif; *m* : montaison ou début floraison; *fF* : fin floraison-fructification; *d* : dessèchement.

3.2. Caractéristiques de la végétation lors de l'établissement de la courbe de normalisation

La nature et les caractéristiques des cibles observées lors de la détermination du facteur de normalisation sont données dans le tableau II.

TABLEAU II. — *Caractéristiques structurales et floristiques des cibles de normalisation.*

Date	Phénologie	Caractéristiques structurales et floristiques	Type de temps
29-07-1981	Végétatif	Groupement herbacé homogène, recouvrement 90 %, hauteur 15-20 cm; feuillage vert sombre, fleurs jaunes, graminées au stade tallage, <i>Tribulus terrestris</i> , <i>Dactyloctenium aegyptium</i> , <i>Schoenefeldia gracilis</i> , <i>Cenchrus biflorus</i>	Temps serein
13-08-1981	Montaison	Groupement herbacé dominé par des graminées cespiteuses (à <i>Schoenefeldia gracilis</i> , <i>Aristida adscensionis</i> , <i>Aristida funiculata</i>) érigées à feuillage vert foncé, recouvrement 100 %, hauteur 30-40 cm	Temps serein
01-09-1981	Floraison-fructification	Même groupement que le précédent; épis clairs, recouvrement 80 %, hauteur 40 cm	Passages nuageux fréquents
06-10-1981	Dessèchement	Groupement herbacé à graminées (<i>Schoenefeldia gracilis</i> , <i>Panicum laetum</i>) en cours de dessèchement; couleur jaune dominante, organes chlorophylliens environ 20 % du total; recouvrement 80 %, hauteur 30 cm	Temps serein

4. PROTOCOLE DE MESURES

Trente à trente-cinq échantillons, réunissant une large gamme de biomasse, ont été répartis dans le groupement végétal étudié, pour tenir compte de son hétérogénéité. Après les mesures radiométriques réalisées à 1,25 m du sol, le matériel végétal est coupé à ras du sol, sur une surface circulaire de 1/4 de m².

Le poids de matière fraîche est mesuré sur le terrain ; la teneur en eau est déterminée par dessiccation à l'étuve à 85° C jusqu'à l'obtention du poids constant.

III. — RÉSULTATS

1. EFFET DE LA HAUTEUR ANGULAIRE DU SOLEIL SUR LE RAPPORT R

Les différentes cibles choisies (tableau II) présentent des courbes de variations de $R = f(h)$ qui confirment bien la nécessité de normaliser tous les résultats ultérieurs (fig. 2). Cette nécessité apparaît tout spécialement si l'on considère le sens même de l'évolution de R en fonction de la hauteur angulaire du soleil. En effet, pour chacune des dates qui ont fait l'objet de mesures, R croît lorsqu'augmente cette hauteur, pour atteindre un palier qui est toutefois inobservable dans les conditions nuageuses. L'évolution du rapport obtenu sur *Dactylis glomerata* (METHY, 1977) et la plupart des exemples de la littérature font au contraire apparaître avant le palier une décroissance de R . KUMAR & MONTEITH (1981) attribuent l'origine du résultat mis en évidence à une plus grande quantité de feuilles éclairées aux faibles hau-

teurs du soleil, sous incidence rasante; le rayonnement spéculaire conduirait sur les feuilles comme sur la couverture végétale à une valeur de R plus élevée qu'en rayonnement diffus. Des mesures complémentaires sont en cours, portant sur les propriétés optiques des feuilles et du sol, dont une analyse de FUCHS *et al.* (1972) a montré toute l'importance.

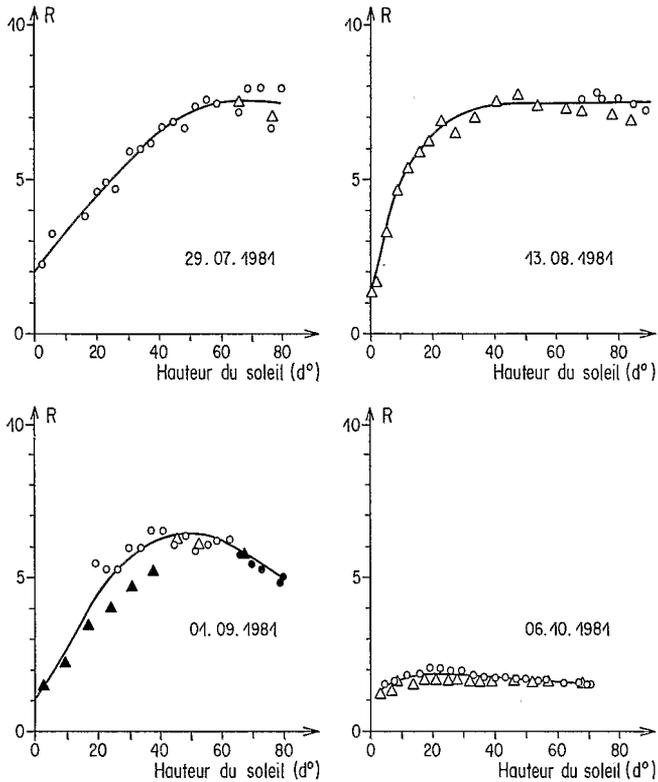


FIG. 2. — Variations en fonction de la hauteur angulaire du soleil du rapport des signaux relatifs aux domaines spectraux proche infrarouge (802 nm) et rouge (676 nm), étudiés pour quatre dates centrées sur les périodes de mesures.

Temps serein : \circ matin, Δ après-midi; temps nuageux : \bullet matin, \blacktriangle après-midi. Voir le tableau II pour la description de la végétation.

La distribution des résultats relatifs à la journée du 01-09-1981 (fig. 2) souligne la nécessité d'opérer par temps serein. Il est à noter enfin que l'effet de hauteur est moindre sur la courbe du 06-10 qui correspond au stade de dessèchement. Le manque de pigments chlorophylliens, et l'absence de sélection spectrale qui en résulte, expliquent cette propriété.

Les courbes sont utilisables pour le calcul des coefficients de normalisation adaptés au stade phénologique considéré. Toutefois l'aspect des courbes obtenues le 13-08 et le 01-09, si l'on excepte les points obtenus en conditions nuageuses pour cette dernière journée, a conduit à tracer une courbe de normalisation unique pour

les stades de montaison et de floraison-fructification (fig. 3). Ce sont donc au total trois courbes qui ont été nécessaires pour normaliser les résultats obtenus sur l'ensemble du cycle végétatif.

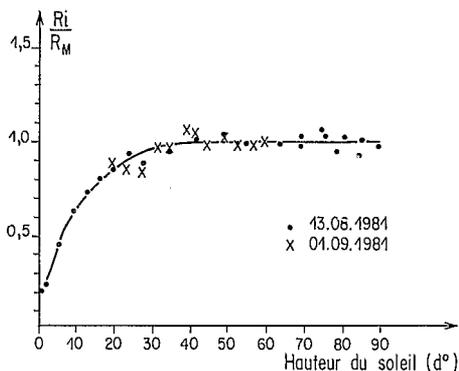


FIG. 3. — Facteur de normalisation en fonction de la hauteur angulaire du soleil pour les stades de montaison et floraison-fructification. R_i = valeur du rapport pour une hauteur i ; R_m = valeur du rapport correspondant au palier représenté sur la figure 2.

2. EFFET DE LA STRUCTURE DE LA VÉGÉTATION

Les résultats relatifs aux différents groupements pour le stade phénologique correspondant au maximum de biomasse sur pied sont représentés sur les graphiques de la figure 4. Les variations de la phytomasse en fonction du rapport de réflexion R ont été ajustées à une droite d'équation générale $Y = ax + b$, où Y est la phytomasse herbacée épigée en $g_{MS} \cdot m^{-2}$ et x le rapport de réflexion infrarouge/rouge. Les liaisons sont toutes hautement significatives ($\alpha = 0,01$) quel que soit le type structural. Les valeurs du coefficient de détermination (r^2) à ce stade phénologique montrent en moyenne, pour les six groupements, que 70 % de la variabilité de la phytomasse herbacée sont expliqués par les variations du rapport R .

L'observation des graphiques de la figure 4 révèle une assez grande dispersion des points échantillonnés. Ce caractère est imputable à la nature plurispécifique de la végétation et au protocole de mesure (échantillons différents) qui augmentent la variabilité. Cette dispersion est d'ailleurs plus accusée pour la droite relative à la station de Winde Protégé (fig. 4 A). En effet, la signification de la liaison entre phytomasse et rapport ne tient qu'à l'intégration des 2 valeurs de sol nu dans la série. Si l'on retire ces 2 valeurs de l'échantillonnage, la relation, devenant alors $y = 11,7 x + 195$ avec $r = 0,195$ ($n = 30$), n'est plus significative.

La grande dispersion des résultats obtenus pour ce type de végétation malgré son homogénéité apparente s'explique aisément par sa structure (fig. 1) et la morphologie de l'espèce dominante. En effet, la hauteur assez élevée d'*Aeschynomene indica* (60-80 cm) et le caractère plagiotrope de ses rameaux perturbent la réflexion par les strates basses, assez fortement recouvertes. De plus, le niveau du toit de la végétation est trop rapproché de la cellule photoélectrique qui se situe à 1,25 m du sol.

L'examen du graphique 4 D, relatif à la station de Kolel pour laquelle de fortes valeurs de biomasse ont été observées, montre qu'il semble y avoir un effet de saturation à partir d'une phytomasse d'environ $400 g_{MS} \cdot m^{-2}$.

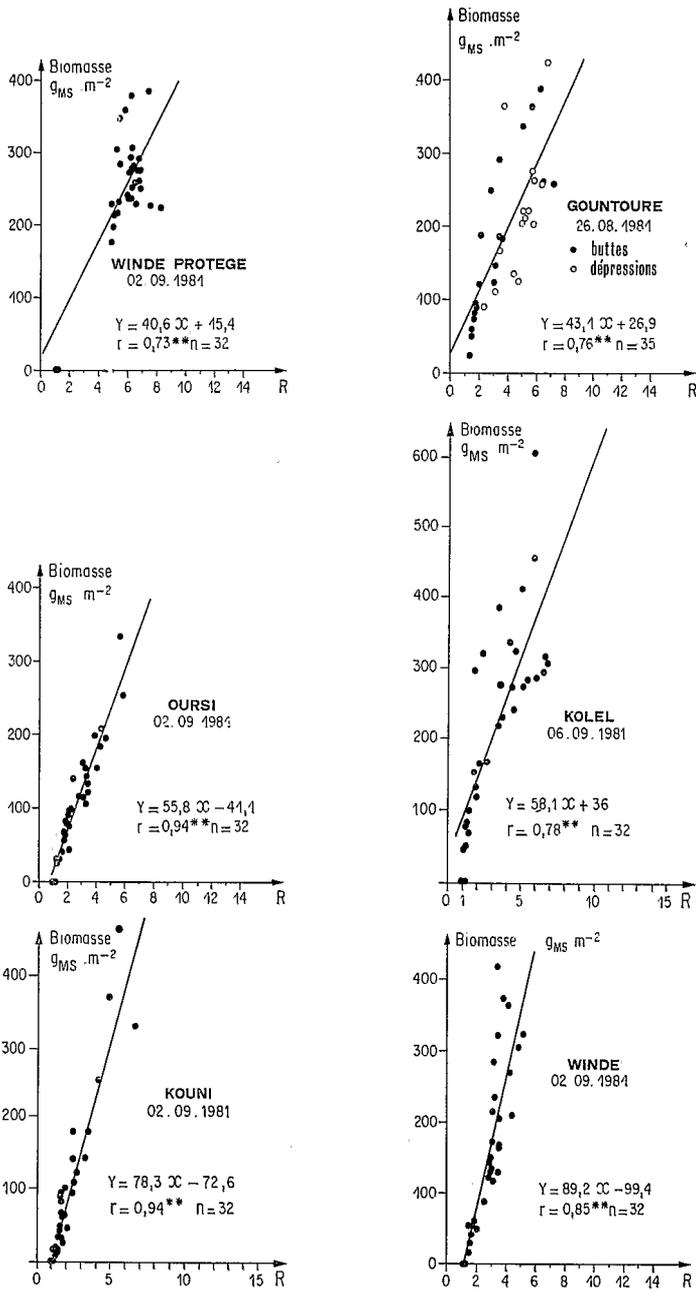


FIG. 4. — Relations entre le poids de matière sèche de la phytomasse épigée et le rapport des signaux photoélectriques relatifs aux deux radiations (stade floraison-fructification).

Les droites de régression relatives aux différents groupements végétaux ont été comparées deux à deux par analyse de covariance (DUNN & CLARK, 1974).

TABLEAU III. — Comparaison des pentes des droites de régression par analyse de covariance. Tableau de signification du coefficient de Fisher.

Stations	Winde Protégé	Gountoure	Oursi	Kolel	Kouni	Winde
Winde Protégé $y = 40,6x + 15,4$						
Gountoure $y = 43,1x + 26,9$	NS					
Oursi $y = 55,8x - 41,1$	NS	NS				
Kolel $y = 58,1x + 36,0$	NS	NS	NS			
Kouni $y = 78,3x - 72,6$	**	**	**	NS		
Winde $y = 89,2x - 99,4$	**	**	**	*	NS	

NS : différence entre pentes non significative ($\alpha = 0,05$).

* : différence entre pentes significative ($\alpha = 0,05$).

** : différence hautement significative ($\alpha = 0,01$).

L'analyse du tableau III, qui donne la signification du coefficient de Fisher dans la comparaison des pentes des droites, permet globalement de discriminer deux groupes :

— les stations de Winde Protégé, Gountoure, Oursi et Kolel qui, à l'exception de la première, correspondent au sol clair à texture sableuse et ayant les espèces communes suivantes : *Zornia glochidiata*, *Cenchrus biflorus*, *Aristida mutabilis*, *Alysicarpus ovalifolius*...

— les stations de Winde et Kouni, établies sur sol foncé, à texture limono-argileuse et constituées essentiellement de *Schoenefeldia gracilis* et *Panicum laetum*. L'analyse statistique par analyse de covariance montre qu'il est possible de confondre les droites relatives à ces deux stations.

$$(F \text{ calculé} = 0,037 [1; 61] < 4).$$

L'équation commune est : $y = 83,0x - 82,2$ avec $r = 0,90$. La même analyse réalisée avec les droites correspondant à Gountoure, Oursi et Kolel montrent que les différences sont hautement significatives ($F \text{ calculé} = 14,84 [2; 95] > 4,83$ pour $\alpha = 0,01$). Il est donc statistiquement inconcevable de formuler une équation commune aux groupements des sols sableux.

3. EFFET DU STADE PHÉNOLOGIQUE

Les résultats relatifs à l'analyse des effets du stade phénologique sur les paramètres d'étalonnage sont représentés sur les graphiques 5, 6, 7 et le tableau IV.

Ils permettent de confirmer un certain nombre de faits préalablement établis, à savoir :

— la nature hautement significative ($\alpha = 0,01$) de la liaison phytomasse-rapport de réflexion,

— la dispersion très accusée des points échantillonnés pour le groupement à *Aeschynomene indica* de la station protégée de Winde. Compte tenu de ces résultats, il est raisonnable de ne pas utiliser la courbe d'étalonnage pour ce type de végétation.

Les résultats montrent par ailleurs que les valeurs des pentes s'élèvent généralement au fur et à mesure que l'on s'avance dans le cycle de végétation. Au stade de

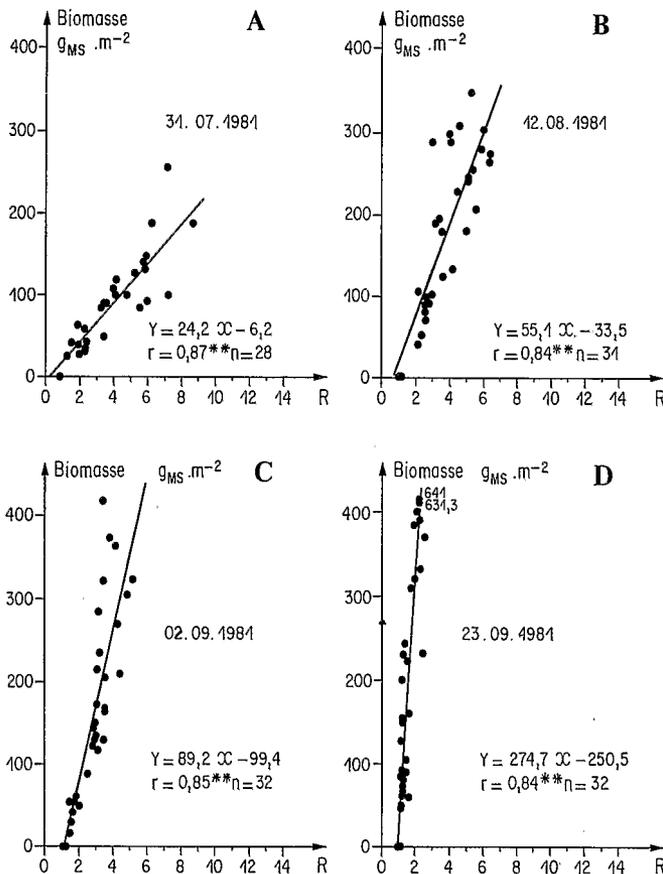


FIG. 5. — Relation entre le poids de matière sèche de la phytomasse épigée et le rapport des signaux photoélectriques (802/676) pour différents stades phénologiques du groupement de Winde.

A : Stade végétatif. B : Montaison. C : Floraison-fructification. D : Dessèchement.

dessèchement (teneur en eau moyenne des échantillons 45 % du poids de matière fraîche, proportion d'organes non photosynthétiques de l'ordre de 65 % du poids total), la méthode n'est plus utilisable. En effet, la végétation tend alors à se comporter comme un sol nu.

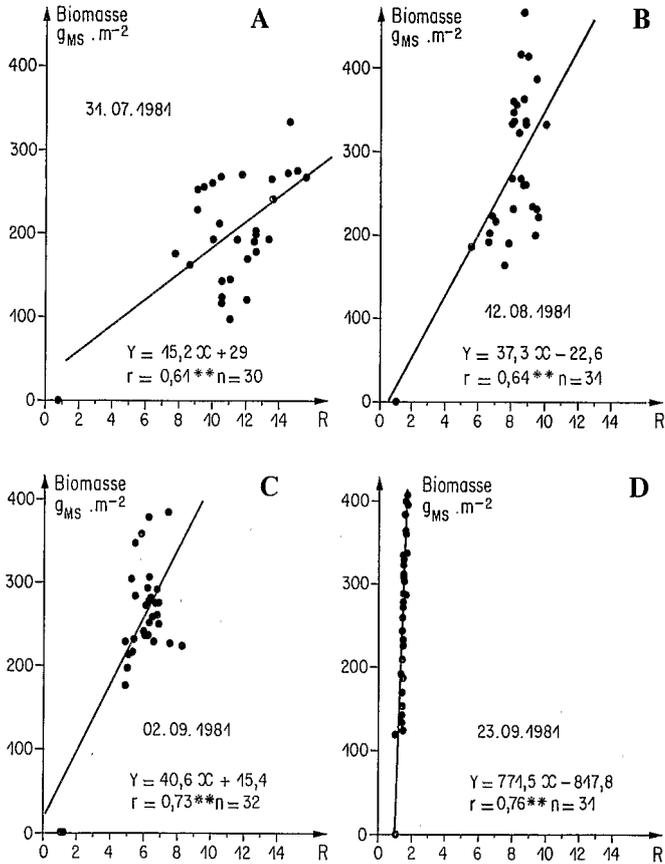


FIG. 6. — Relation entre le poids de matière sèche de la phytomasse épigée et le rapport des signaux photoélectriques (802/676) pour différents stades phénologiques du groupement de Windé Protégé.

A : Stade végétatif. B : Début floraison. C : Fructification. D : Dessèchement.

Pour chaque groupement, les pentes des droites relatives à chaque stade phénologique ont été comparées par analyse de covariance. L'analyse montre que les différences entre celles-ci sont généralement hautement significatives, ce qui montre la nécessité d'étalonnage en fonction du stade phénologique.

Pour chaque groupement encore et pour une date donnée, la structure de la végétation a été supposée identique d'une cible à l'autre. Les figures 7 A et 7 C font

apparaître des écarts entre mesures et régression aux faibles valeurs de phytomasse qui semblent traduire un effet de la densité sur l'architecture.

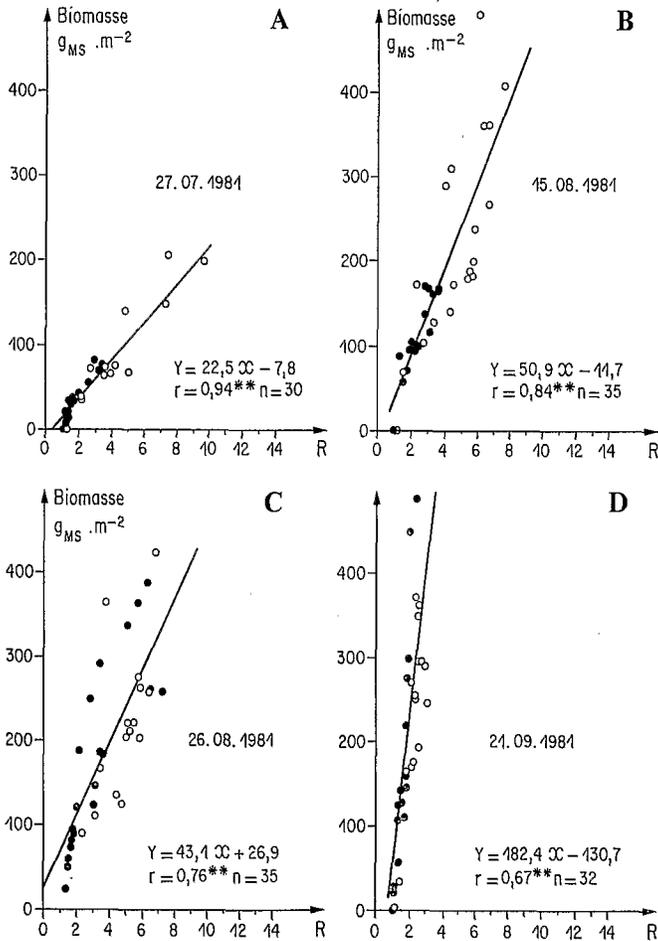


FIG. 7. — Relation entre le poids de matière sèche de la phytomasse épigée et le rapport des signaux photoélectriques (802/676) pour différents stades phénologiques du groupement de Gountoure.

A : Stade végétatif. B : Montaison. C : Floraison-fructification. D : Dessèchement. ○ : Valeurs relatives aux dépressions. ● : valeurs relatives aux microbuttes.

IV. — DISCUSSION. CONCLUSION

La technique de détermination de la phytomasse herbacée épigée basée sur les propriétés du rayonnement solaire réfléchi a été testée sur des végétations spontanées, plurispécifiques sahéliennes, de structure et de composition floristique variées.

TABLEAU IV. — Équations des droites, pour différents stades phénologiques.

Stations	Stade phénologique	Équations	
Oursi	<i>v</i>	$y = 39x - 25,1$	$r = 0,97^{**}$
	<i>m</i>	$y = 41,1x - 17,0$	$r = 0,92^{**}$
	<i>fF</i>	$y = 55,8x - 41,1$	$r = 0,94^{**}$
	<i>d</i>	$y = 142,7x - 118,6$	$r = 0,92^{**}$
Kolel	<i>v</i>	$y = 46,5x - 35,9$	$r = 0,96^{**}$
	<i>m</i>	$y = 82,4x - 102,8$	$r = 0,88^{**}$
	<i>fF</i>	$y = 58,1x + 36,0$	$r = 0,78^{**}$
Kouni	<i>fF</i>	$y = 78,3x - 72,6$	$r = 0,94^{**}$
	<i>d</i>	$y = 356,5x - 335,8$	$r = 0,94^{**}$

v, m, fF, d : cf. tableau I.

** liaison hautement significative ($\alpha = 0,01$).

Les résultats soulignent en premier lieu la nécessité de tenir compte de la hauteur angulaire du disque solaire au-dessus de l'horizon. De plus, il faut opérer par temps serein, quoique les limites dues aux variations de la lumière incidente puissent être levées en utilisant des valeurs relatives à une cible-référence (JENSEN, 1980; TUCKER *et al.*, 1980). Ces conditions doivent être un préalable à l'emploi de la méthode, et les résultats médiocres de WALLER *et al.*, 1981, ne sont pas étonnants puisque obtenus dans les conditions d'expérimentation les plus défavorables à l'utilisation de la technique, c'est-à-dire sans tenir compte : du cycle phénologique, de la hauteur du soleil et des situations atmosphériques.

La dispersion assez forte des valeurs observées lors de l'établissement des courbes d'étalonnage est à relier non seulement à la nature hétérogène de la végétation sahélienne (plurispécificité, architecture variée, état de surface du sol différent) mais encore au choix de la méthode d'échantillonnage. En effet, et en prévision de l'application de la méthode à l'évaluation de la phytomasse sur des étendues assez larges (plusieurs dizaines d'hectares), nous avons préféré couvrir la gamme de phytomasse en multipliant les cibles, pour intégrer le maximum de variabilité. La défoliation successive d'une cible unique aurait sans doute réduit cette dispersion, mais la courbe d'étalonnage ainsi obtenue aurait été difficilement utilisable.

Pour le groupement protégé de Winde, dominé par *Aeschynomene indica*, la dispersion est telle que l'utilisation de la méthode est hautement critiquable. Ceci résulte du fait que les différentes strates de végétation ne participent pas également à la réflexion du rayonnement solaire à cause de l'architecture de l'espèce dominante (hauteur élevée, plagiotropie des rameaux).

Malgré cette dispersion, les résultats permettent d'exprimer la phytomasse herbacée en fonction du rapport des signaux photoélectriques obtenus dans les domaines spectraux proche infrarouge-rouge par une relation linéaire.

Les liaisons sont hautement significatives et l'on observe, au moment du maximum de biomasse, que les variations du rapport *R* expliquent en moyenne 70 % de la variabilité de la phytomasse herbacée.

Il n'est statistiquement pas possible de confondre les équations relatives à chaque type de végétation, chacun manifestant des caractéristiques propres liées aux propriétés optiques des espèces, à l'architecture du feuillage et à l'état de surface du sol. L'importance de la phénologie a par ailleurs été soulignée, ce qui confirme les observations de THALEN *et al.* (1980). En effet, les modifications du couvert liées à l'apparition des fleurs et à la diminution de la proportion des organes chlorophylliens agissent sur les paramètres, de sorte qu'il est nécessaire d'étalonner pour les différents stades phénologiques. Le rapport de réflexion décroît quand la dégénérescence s'installe. La technique devient alors inutilisable par absence de sélection spectrale. Il est à noter que les coefficients d'étalonnage obtenus sont relatifs à des stades phénologiques bien caractérisés. Dans la pratique, et lors des stades intermédiaires, une interpolation pourra être envisagée.

La méthode radiométrique est applicable à la végétation spontanée plurispécifique sahélienne, à condition de satisfaire aux exigences suivantes :

- opérer par temps serein,
- normaliser les valeurs en fonction de la hauteur du soleil,
- étalonner préalablement l'appareil.

La rapidité du procédé permet d'étendre les mesures sur de plus amples surfaces. L'accroissement de l'effectif de l'échantillonnage, la fiabilité des résultats augmentent la précision des mesures de phytomasse et de la capacité de charge qui en découle, puisqu'en milieu sahélien la végétation spontanée représente plus de 90 % de l'alimentation du bétail.

Par ailleurs, le faible coût de l'appareillage, ainsi que la facilité et la rapidité du recueil des informations permettent d'envisager l'équipement en radiomètres des services techniques nationaux pour la surveillance continue (monitoring) des pâturages.

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être mené à bien grâce à l'aimable collaboration de MM. M. LOINTIER & J.-L. SALAGER qui ont respectivement mis au point les programmes de calcul des hauteurs angulaires du soleil et d'analyses de covariance.

BIBLIOGRAPHIE

- ALCOCK M. B. & LOVETT J. V., 1967. — The electronic measurement of the yield of growing pasture. *J. Agric. Sc., Camb.*, **68**, 27-38.
- AUBREVILLE A., 1949. — *Climats, forêts et désertification de l'Afrique Tropicale*. Soc. Éd. géogr. marit. colon., Paris, 351 p.
- CARNEGIE D. M., DEGLORIA S. D. & COLWELL R. N., 1975. — Usefulness of Landsat data for monitoring plant development and range conditions in California's annual grassland. *NASA Earth Resources Survey Symposium Proc.*, Houston, Texas, vol. 1 A, 19-42.
- COLWELL J. E., 1973. — *Bidirectional spectral reflectance of grass canopies for determination of aboveground standing biomass*. Ph. D. Thesis, University of Michigan, University Microfilm, 75-15, 693, 174 p.
- DUNN O. J. & CLARK V. A., 1974. — Applied statistics: analysis of variance and regression. In: *Analysis of covariance*, John Wiley and Sons, p. 307-333.
- FLETCHER J. E. & ROBINSON N. E., 1956. — A capacitance meter for estimating forage weight. *J. Range Manage.*, **9**, 96-97.
- FUCHS M., STANHILL G. & WAANDERS A. G., 1972. — Diurnal variations of the visible and near infrared reflectance of a wheat crop. *Israel J. agric. Res.*, **22**, 63-75.

- GROUZIS M., 1979. — Structure, composition floristique et dynamique de la production de matière sèche de formations végétales sahéliennes (Mare d'Oursi, Haute-Volta). Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. Action complémentaire coordonnée D. G. R. S. T.-O. R. S. T. O. M., 59 p., 15 tabl., 17 fig. h. t.
- GROUZIS M., 1982. — *Restauration des pâturages sahéliens. Mise en défens et reboisement.* O. R. S. T. O. M., Ouagadougou, 37 p.
- JENSEN A., 1980. — Seasonal changes in near infrared reflectance ratio and standing crop biomass in a salt marsh community dominated by *Halimione portulacoides* (L.) Aellen. *New Phytol.*, **86**, 57-67.
- JOHNSON G. R., 1976. — *Remote estimation of herbaceous biomass.* M. S. thesis, Colorado State University, St. Collins, 120 p.
- JORDAN C. F., 1969. — Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, **50**, 663-666.
- KUMAR M. & MONTEITH J. L., 1981. — Remote sensing of crop growth. In: H. SMITH (Ed.), *Plants and the daylight spectrum. Proceedings of the First International Symposium of the British Photobiology Society*, Academic Press, p. 133-144.
- LEVANG P. & GROUZIS M., 1980. — Méthodes d'étude de la biomasse herbacée de formations sahéliennes : application à la Mare d'Oursi, Haute-Volta. *Acta Oecologia, Oecol. Plant.*, vol. 1 (15), **3**, 231-344.
- METHY M., 1977. — Estimation quantitative de la biomasse aérienne d'un peuplement de graminées par une méthode optique non destructive. *Oecol. Plant.*, **12**, 395-401.
- PEARSON R. L., MILLER L. D. & TUCKER C. J., 1976. — Hand-held spectral radiometer to estimate gramineous biomass. *Applied optics*, **15**, 416-418.
- PECHANEC J. F. & PICKFORD G. D., 1937. — A weight estimation method for the determination of range of pasture production. *Journal of American Society of Agronomists*, **29**, 894-904.
- TADMOR N. H., BRIEGHET A., NOY-MEIR I., BENJANIN R. W. & EYALE E., 1975. — An evolution of the calibrated weight estimate method for measuring production in annual vegetation. *J. Range Manage.*, **28**, 65-69.
- THALEN D. C. P., LEEABURG J. A. & BECK R., 1980. — Estimating aerial biomass in semi-natural vegetation from spectral reflectance measurements. 1. Preliminary experiences. *Acta Bot. Neerl.*, **29**, 565-578.
- TUCKER C. J., ELGIN J. H. & MCMURTREY J. E., 1980. — Relationship of crop radiance to alfalfa agronomic values. *Int. J. Remote sensing*, **1**, 69-75.
- UNGER K., 1967. — The use of gamma rays for the determination of change in biomass with time. In: F. E. ECKARDT (Ed.), *Fonctionnement des écosystèmes terrestres au niveau de la production primaire. Actes du colloque de Copenhague*, Paris, Unesco, p. 229-231.
- WALLER S. S., BROWN M. A. & LEWIS J. K., 1981. — Factors involved in estimating green biomass by canopy spectroreflectance measurements. *J. Range Manage.*, **34**, 105-108.