

Estimation à partir de mesures de réflectance spectrale du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par une culture de blé

F. Baret et A. Olioso

avec la collaboration technique de J.L. Luciani, J.F. Hanocq et J.C. Monterrot

INRA, station de bioclimatologie, BP 91, 84140 Montfavet, France

(reçu le 10 mars 1989; accepté le 18 juillet 1989)

Résumé — L'énergie photosynthétiquement active (PAR) absorbée par une culture détermine son potentiel de production de biomasse. Les réflectances spectrales sont fonctionnellement liées à la fraction d'énergie PAR absorbée ou interceptée par le couvert. Leur suivi dans le temps permet d'améliorer l'estimation de la production des cultures par télédétection. La relation entre l'indice de végétation (DN) combinant les réflectances spectrales rouge et proche infra-rouge, et la fraction PAR absorbée par le couvert au cours de la journée (ϵ_i), est analysée à partir de simulations du modèle de transfert radiatif SAIL. Il apparaît que cette relation peut se mettre sous une forme simple :

$$\epsilon_i = 0,94 [1 - ((0,9 - DN)/(0,9 - DN_s))^\alpha] \quad (a)$$

où DN_s représente la valeur de l'indice de végétation du sol nu et α dépend de la position du soleil et du port foliaire. Dans certaines conditions, la valeur de α est proche de l'unité et la relation entre ϵ_i et DN devient linéaire.

Des mesures de l'indice de végétation ont été effectuées au sol sur des cultures de blé en phase d'implantation. Simultanément, la grandeur ϵ_i a été estimée à partir de photographies hémisphériques prises au-dessus des cultures. Les relations expérimentales obtenues entre DN et ϵ_i sont en bonne concordance avec la relation (a). L'exposant α varie de 1,33 à 2,22 suivant les conditions d'éclairement, rendant la relation entre DN et ϵ_i non linéaire.

télédétection – réflectance – indice de végétation – blé – énergie photosynthétiquement active

Summary — Photosynthetically absorbed radiation by a wheat canopy estimated from spectral reflectance.

Biomass production resulted from the conversion of photosynthetically active radiation (PAR) absorbed by the crop. Remotely sensed radiometrical data are functionally linked to the fraction of PAR energy absorbed by the canopy. Monitoring spectral reflectance of vegetation should contribute to improve the estimation of crop biomass production. The SAIL radiative transfer model is used to analyse the sensitivity of the relationship between the vegetation index (DN) which combines red and near infrared reflectances and the PAR fraction absorbed daily by the canopy (ϵ_i). For commodity, we have decomposed this relationship into two sub-relationships using a simple formalism to describe them with good accuracy :

- the ND-LAI (leaf area index) and
- the LAI – ϵ_i relationships.

The combination of these two equations (equation (5)) and (equation (3)) leads to the following simple expression relating ϵ_i to ND:

$$\epsilon_i = 0.94 [1 - ((0.9 - DN)/(0.9 - DN_s))^\alpha] \quad (a)$$

DN_s represents the DN value for bare soil which varies with soil brightness (Fig. 3). α depends on sun position and leaf inclination (Fig. 5). However, in some conditions, α is very close to 1. and the relationship between ϵ_i and DN becomes linear.

DN measurements were performed at ground level on several wheat plots from emergence to stem elongation. Simultaneously, ϵ_i was estimated from hemispherical photographs taken above the crop. Results show that experimental relationships between DN and ϵ_i are in accordance with the theoretical equation (a). The exponent α is in the range 1.33, 2.22 depending on irradiance conditions (Table III), making the relationship between DN and ϵ_i non-linear. In conclusion, the success of using spectral data to assess ϵ_i is mainly influenced by our knowledge of soil optical properties (ND_s) or by the potential development of improved algorithms to minimize soil effects on vegetation indices.

remote sensing – reflectance – biomass – vegetation index – wheat – PAR

INTRODUCTION

La production primaire d'un couvert végétal résulte de l'absorption du flux lumineux solaire incident et de sa transformation en biomasse par le système photosynthétique. Le rendement énergétique de ces processus peut être formalisé simplement à l'échelle instantanée par le produit de deux facteurs (Monteith, 1972; Varlet-Grancher *et al.*, 1982). Le premier facteur, ε_i , est appelé efficacité de l'absorption du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR : 400–700 nm) par le couvert. Il représente le rapport du PAR absorbé par le couvert au PAR incident. Le second facteur, ε_p , caractérise l'efficacité de la transformation de la quantité d'énergie PAR absorbée, en matière sèche. La connaissance tout au long du cycle de la culture de ces deux termes, permet d'estimer la quantité de biomasse produite (Varlet-Grancher *et al.*, 1982; Gosse *et al.*, 1986; Green, 1987; Olioso, 1987; Garcia *et al.*, 1988).

L'efficacité ε_i dépend principalement des propriétés optiques des feuilles actives dans le domaine PAR, de la réflectance de la strate inférieure non photosynthétiquement active (sol ou végétation sénescence), de la structure du couvert (indice foliaire, inclinaison des feuilles) et des caractéristiques de l'éclairement (position du soleil, importance du rayonnement diffus). Ce sont les mêmes processus de diffusion et d'absorption qui déterminent la réponse spectrale du couvert. Il existe donc une relation fonctionnelle liée à la structure du couvert, entre le facteur ε_i nécessaire à l'estimation de la production de biomasse, et les réflectances spectrales qui peuvent être mesurées par un capteur de télédétection dans le domaine des courtes longueurs d'onde. Cette relation a été mise en évidence expérimentalement par Ajai *et al.* (1984), Asrar *et al.* (1984), Hatfield *et al.* (1984), Daughtry (1988). Ces résultats ont été confirmés à partir de considérations théoriques par Sellers (1985), Kumar (1988), Baret & Major (1988). Ces auteurs expriment généralement la réponse radiométrique du couvert sous forme d'indices de végétation, qui consistent en une combinaison particulière des réflectances dans les domaines spectraux rouge et proche infrarouge. Ces indices permettent de limiter l'influence de facteurs extérieurs au couvert végétal (géométrie de la visée et de l'éclairement, réflectance du sol, pente, ...).

L'analyse bibliographique révèle la variabilité des relations entre ε_i et indice de végétation. Cet article a pour objectif l'analyse des facteurs de variation de ces relations, afin de mieux en cerner le domaine de validité. Pour ce faire, nous utiliserons dans un premier temps, un modèle de

transfert radiatif de manière à analyser, du point de vue théorique, la sensibilité à différents facteurs de variation des relations entre ε_i et indice de végétation. Dans un deuxième temps, nous comparerons les relations théoriques précédentes à des mesures réalisées sur des cultures de blé dans différentes conditions. Nous développerons à cette fin une méthode d'estimation de ε_i basée sur l'utilisation de photographies hémisphériques.

ANALYSE THÉORIQUE DE LA RELATION ENTRE ε_i ET L'INDICE DE VÉGÉTATION

Méthode

Nous avons utilisé le modèle de réflectance SAIL décrit par Verhoef (1984, 1985). Bien que relativement simple, il reproduit avec suffisamment de réalisme la réflectance bidirectionnelle de cultures homogènes. Ce modèle a été partiellement validé à plusieurs reprises (Le Master *et al.*, 1980; Badhwar *et al.*, 1985; Goel & Deering, 1985; Rigal & Terres, 1988). Les principales hypothèses sont :

- un couvert homogène horizontalement et infiniment étendu,
- des éléments du couvert lambertiens (feuilles et sol),
- des propriétés optiques identiques aux deux faces des feuilles,
- un azimut des feuilles aléatoire.

Nous avons simulé les réflectances dans le rouge (R) et dans le proche infrarouge (PIR), de façon à calculer l'indice de végétation DN (différence normalisée), proposé par Rouse *et al.* (1974) :

$$DN = (PIR - R) / (PIR + R) \quad (1)$$

Cet indice très fréquemment utilisé, réalise un bon compromis entre simplicité et performances. Les différentes simulations ont été faites en supposant que les mesures radiométriques étaient effectuées au midi solaire.

Le modèle SAIL nous a permis de calculer à chaque instant, la fraction d'énergie photosynthétiquement active absorbée par le couvert. Cette quantité a été intégrée sur l'ensemble de la journée, en la convoluant à l'évolution du rayonnement incident instantané. Ceci est nécessaire afin de relier l'efficacité de l'absorption, qui varie tout au long de la journée avec la position du soleil, à des mesures radiométriques instantanées réalisées à une heure donnée.

L'efficacité ε_i ainsi obtenue est compatible avec les données de rayonnement global journa-

lier, fournies par la plupart des réseaux d'observations météorologiques. Dans ces calculs, nous avons considéré uniquement un rayonnement incident direct, proportionnel au cosinus de l'angle zénithal solaire.

La démarche adoptée consiste à simuler ε_i et DN pour les différentes valeurs des variables d'entrée du modèle SAIL précisées par le Tableau I. Ces résultats théoriques servent de base à l'étude des relations entre ε_i et DN.

Analyse de la relation entre DN et ε_i

Les simulations aboutissent à une relation statistique linéaire moyenne présentée par la Figure 1 et l'équation 2 :

$$\varepsilon_i = 1,328 \text{ DN} - 0,308 \quad (R^2=0,910; n=2\ 016) \quad (2)$$

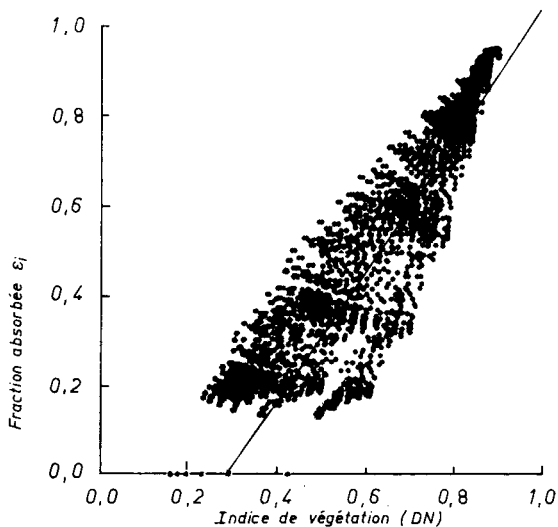


Fig. 1. Relation entre l'indice de végétation DN et l'efficacité de l'absorption par le couvert du rayonnement photosynthétiquement actif (ε_i). Les points correspondent aux simulations du modèle SAIL. La droite en trait plein correspond à la régression linéaire du nuage de points.

Cette relation est en assez bon accord avec celles proposées par Hatfield *et al.* (1984) ou Asrar *et al.* (1984), Sellers (1985), Daughtry (1988). Mais cet accord relatif ne doit pas masquer la variabilité importante existant autour de la droite moyenne, comme le montre la Figure 1. Nous allons à présent, chercher à préciser la nature et l'effet des facteurs perturbateurs, qui ne sont pas explicitement pris en compte dans l'approche statistique directe.

Afin de mieux décrire ces différents facteurs, nous avons décomposé la relation entre DN et ε_i en deux sous-relations, en proposant pour chacune d'elles un formalisme simplifié :

- relation entre DN et l'indice foliaire,
- relation entre ε_i et l'indice foliaire.

Établissement d'une relation simplifiée entre DN et l'indice foliaire

Plusieurs études expérimentales (Asrar *et al.*, 1984; Kouassi, 1986) montrent que la relation entre DN et l'indice foliaire, suit une simple loi de Beer du type :

$$\text{DN} = \text{DN}_\infty + (\text{DN}_s - \text{DN}_\infty) e^{-K_{\text{DN}} \cdot \text{LAI}} \quad (3)$$

avec

DN_∞ : valeur asymptotique de DN atteinte pour des indices foliaires tendant vers l'infini,

DN_s : valeur de DN pour le sol nu (ou la strate sénescence sous-jacente),

K_{DN} : coefficient d'extinction,

LAI : indice foliaire.

Les paramètres DN_∞ et K_{DN} dépendent ici des conditions d'éclaircissement et de l'inclinaison des feuilles. Pour chaque condition caractérisée par un angle zénithal solaire et un angle moyen d'in-

Tableau I. Paramètres et variables d'entrée du modèle de transfert radiatif SAIL utilisés pour nos simulations.

Propriétés optiques	R	PIR	PAR					
Réflectance feuilles	0,075	0,520	0,10					
Transmittance feuilles	0,007	0,440	0,05					
Réflectance sol (dans le rouge) (1)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30		
Indice foliaire	0,0	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,0
Angle d'inclinaison foliaire (2)	20°	30°	40°	50°	60°	70°		
Angle zénithal solaire (3)	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	
Orientation de la visée	Visée verticale							

(1) La réflectance du sol dans le proche infrarouge est déduite de celle du rouge par l'équation de la droite du sol : $\text{PIR}=1,16 \text{ R}+0,067$ (voir commentaires Fig. 3).

(2) Ceci correspond à l'angle moyen d'une fonction bêta de distribution des inclinaisons foliaires pour laquelle la variance est liée à la moyenne de manière à représenter correctement le cas d'une distribution sphérique (Goel & Strelbel, 1984).

(3) Pour le calcul de ε_i , ceci correspond à l'angle zénithal minimum (midi solaire).

clinaison des feuilles, nous avons déterminé les valeurs de ces paramètres par ajustement non linéaire (Bouvier *et al.*, 1985) de la fonction (3) aux DN simulés.

Le modèle simple (3) reproduit très correctement les résultats du modèle de transfert radiatif plus complexe SAIL ($R^2=0,995$ (2016)), et il permet d'analyser la dépendance de DN_{∞} et K_{DN} à la position du soleil et à l'angle d'inclinaison des feuilles θ_L (Fig. 2).

La valeur asymptotique DN_{∞} varie de 0,89 à 0,94 (Fig. 2a). Ce paramètre ne semble pas très sensible à l'angle zénithal solaire ou à l'angle d'inclinaison des feuilles, sauf dans le cas de cultures plutôt érectophiles et de positions du soleil proches du zénith. La valeur moyenne de DN_{∞} est proche de 0,90. Le coefficient d'extinction K_{DN} , varie dans des proportions beaucoup plus importantes, de 0,5 à 2,1 avec une valeur moyenne proche de 1,2 (Fig. 2b). Pour des angles solaires zénithaux inférieurs à 50°, K_{DN} diminue régulièrement quand l'inclinaison foliaire augmente, mais reste peu sensible à l'effet de la position du soleil. Au contraire, pour des angles zénithaux solaires supérieurs à 50°, K_{DN} augmente très rapidement avec l'angle zénithal solaire, tout en restant très peu sensible à l'inclinaison foliaire.

Le modèle simplifié (3) permet également de calculer une expression analytique de la sensibilité aux propriétés optiques du sol sous-jacent :

$$dDN/dDN_s = e^{-K_{DN} \cdot LAI} \quad (4)$$

La sensibilité de l'indice de végétation aux propriétés optiques du sol sera donc d'autant plus

importante que l'indice foliaire ou le coefficient d'extinction seront faibles. Ce sera le cas pour des cultures érectophiles avec une mesure radiométrique réalisée quand le soleil est au plus haut. Ce sera également le cas pour des sols sombres qui présentent une sensibilité maximale à des variations de propriétés optiques (Fig. 3). Ces propriétés optiques dépendent du type de sol, et pour un type de sol donné, de sa rugosité et de son humidité de surface.

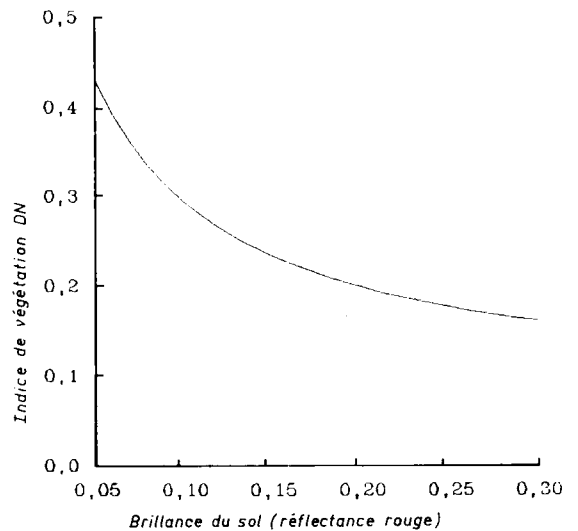


Fig. 3 Effet de la brillance du sol (représentée par sa réflectance dans le rouge (R)) sur la valeur de son indice de végétation DN. Ces résultats correspondent au sol de la station expérimentale de Montfavet ayant comme droite du sol (relation linéaire entre sa réflectance rouge et sa réflectance proche infrarouge (PIR)) : $PIR=1,16 R+0,067$ (Baret, 1986).

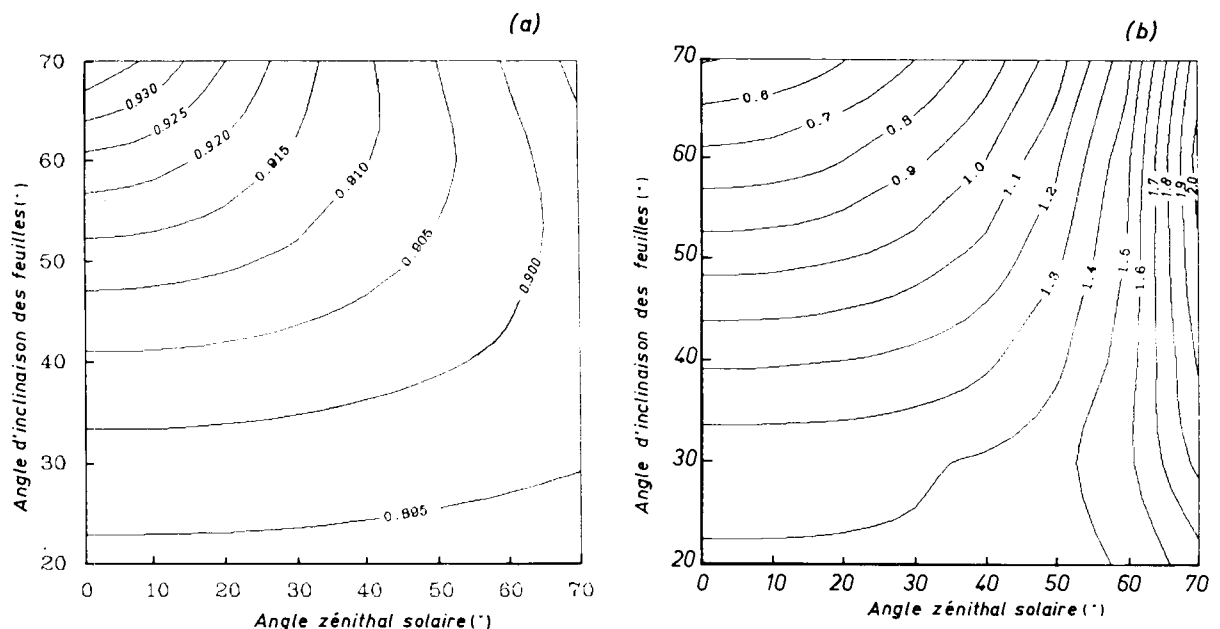


Fig. 2. (a) : Influence de l'angle zénithal solaire (θ_s) et de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_L) sur DN_{∞} ; (b) : idem pour K_{DN} .

Établissement d'une relation simplifiée entre ϵ_i et l'indice foliaire

Nous avons employé un formalisme classiquement utilisé pour décrire les résultats de diverses études expérimentales (Monteith, 1981; Asrar *et al.*, 1984) :

$$\epsilon_i = \epsilon_{i\infty} (1 - e^{-K_{\epsilon_i} LAI}) \tag{5}$$

avec

$\epsilon_{i\infty}$: valeur asymptotique de ϵ_i pour des indices foliaires tendant vers l'infini,

K_{ϵ_i} : coefficient d'extinction.

Les paramètres $\epsilon_{i\infty}$ et K_{ϵ_i} dépendant eux aussi des conditions d'éclairement et de l'orientation des feuilles. Ils ont été déterminés en utilisant la même démarche que celle utilisée au paragraphe précédent pour DN_{∞} et K_{DN} .

Ce modèle simplifié est également en très bon accord avec le modèle SAIL ($R^2=0,998$ (2016)). L'équation (5) ne prend pas en compte l'effet des propriétés optiques du sol tout en restant très performante. L'influence des propriétés optiques du sol sur la valeur de la fraction absorbée par le couvert dans le domaine PAR, est en effet peu importante.

La Figure 4 montre la sensibilité des paramètres $\epsilon_{i\infty}$ et K_{ϵ_i} à l'angle zénithal solaire au midi solaire (θ_{12} , ϵ_i étant intégré sur la journée) et à l'angle d'inclinaison des feuilles. La valeur asymptotique $\epsilon_{i\infty}$ varie dans de faibles proportions de 0,93 à 0,95, avec une valeur moyenne proche de 0,94 (Fig. 4a). En revanche, le coeffi-

cient d'extinction K_{ϵ_i} varie dans des proportions assez semblables à celles de K_{DN} , de 0,6 à 2,2 avec une valeur moyenne proche de 1,0 (Fig. 4b). Comme K_{DN} , K_{ϵ_i} diminue régulièrement quand l'inclinaison foliaire augmente pour des angles zénithaux au midi solaire inférieurs à 30°. Il est alors moins sensible à l'angle zénithal solaire. En revanche, pour des angles zénithaux solaires supérieurs à 30°, K_{ϵ_i} augmente rapidement avec l'angle zénithal solaire θ_{12} , et est alors peu sensible à l'inclinaison des feuilles.

Établissement d'une relation entre DN et ϵ_i

Le couplage des deux modèles simplifiés précédents permet de construire une relation analytique entre DN et ϵ_i :

$$\epsilon_i = \epsilon_{i\infty} [1 - ((DN - DN_{\infty}) / (DN_s - DN_{\infty}))^{K_{\epsilon_i}/K_{DN}}] \tag{6}$$

Cette équation formalise l'effet des propriétés optiques du sol sur ϵ_i par l'intermédiaire du terme DN_s . La dépendance de DN_{∞} à la réflectance du sol étant plus accentuée pour les sols sombres (Fig. 3), la sensibilité de la relation entre ϵ_i et DN aux propriétés optiques du sol sera importante dans ce cas. L'équation (6) montre également que la linéarité de la relation n'est pas stricte, et dépend du rapport des coefficients d'extinction K_{ϵ_i}/K_{DN} . Les remarques effectuées aux deux paragraphes précédents sur le sens de variation et les valeurs des deux coefficients K_{ϵ_i} et K_{DN} , révèlent une certaine similitude de leur comportement. Il semble possible en première approxi-

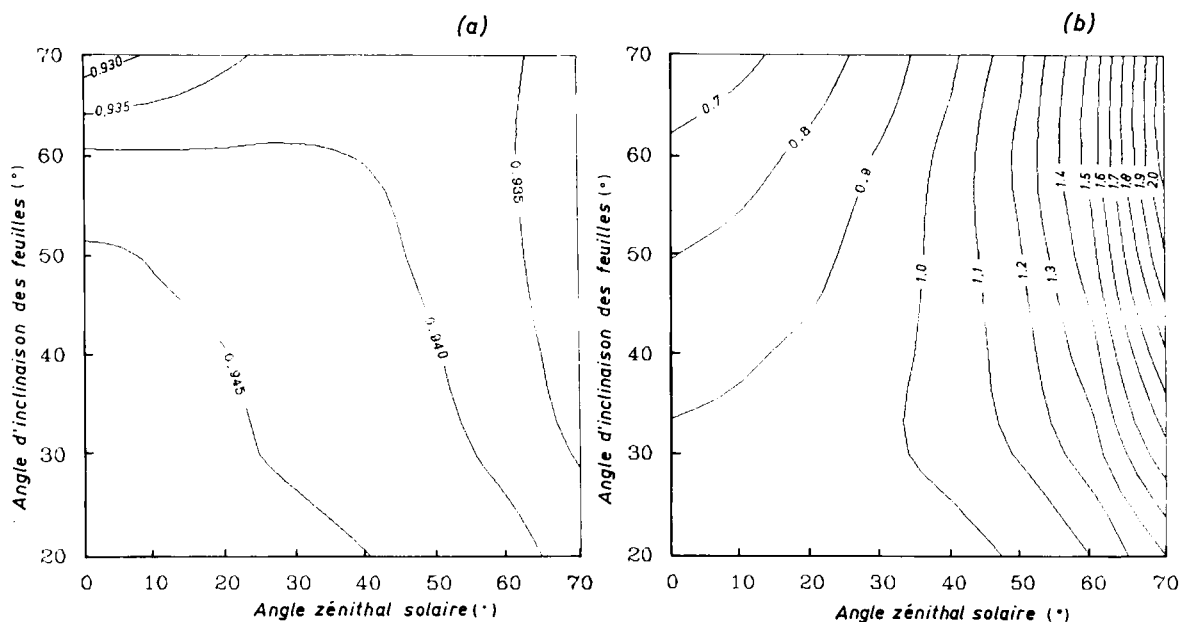


Fig. 4. (a) Influence de l'angle zénithal solaire au midi solaire (θ_{12} , ϵ_i , étant intégré sur la journée) et de l'angle d'inclinaison foliaire θ_L sur $\epsilon_{i\infty}$. (b) Idem pour K_{ϵ_i} .

mation, de poser $K_{DN}=K_{\epsilon_i}$ quand les mesures radiométriques sont effectuées au midi solaire ($\theta_s=\theta_{12}$). Cette approximation n'est exactement vérifiée que pour un nombre limité de cas. Ils correspondent (Fig. 5), à des angles moyens d'inclinaison foliaire proches de 60° , et ce, relativement indépendamment de l'angle zénithal solaire. Les quelques rares études s'étant intéressées à la mesure de la fonction de distribution des angles foliaires de cultures de blé (Le Master *et al.*, 1980; Goel & Strebel, 1984; Baret, 1986), révèlent des angles moyens d'inclinaison compris entre 40° et 70° . Ils peuvent donc conduire à des différences significatives entre K_{DN} et K_{ϵ_i} .

En supposant K_{DN} et K_{ϵ_i} identiques, la relation (6) se simplifie et devient linéaire. Les paramètres $\epsilon_{i\infty}$ et DN_∞ sont peu sensibles à la position du soleil, ainsi qu'à l'inclinaison des feuilles. Nous pouvons les confondre à leur valeur moyenne, et l'équation devient alors :

$$\epsilon_i = 0,94 \left((DN - DN_s) / (0,9 - DN_s) \right) \quad (7)$$

L'application de l'équation (7) aboutit à une estimation correcte de ϵ_i à partir de DN en comparaison des simulations du modèle SAIL ($R^2=0,964$ (2016), Fig. 6). Cette relation linéaire prend en compte explicitement les propriétés optiques du sol contrairement à celles généralement proposées dans la littérature.

Au terme de cette première partie, nous avons établi une expression simple de la relation entre ϵ_i et DN. Dans la partie suivante, nous en testerons la validité par rapport à nos résultats expérimentaux établis sur des cultures de blé en phase d'implantation. Dans ce cas, la structure en rangs ne correspond plus aux hypothèses d'homogénéité du couvert formulées au travers du modèle SAIL.

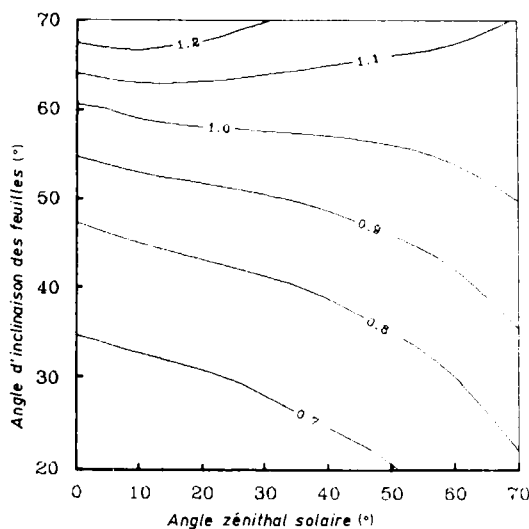


Fig. 5. Influence de l'angle solaire zénithal (θ_{12}) et de l'angle d'inclinaison (θ_l) sur le rapport K_{ϵ_i}/K_{DN} .

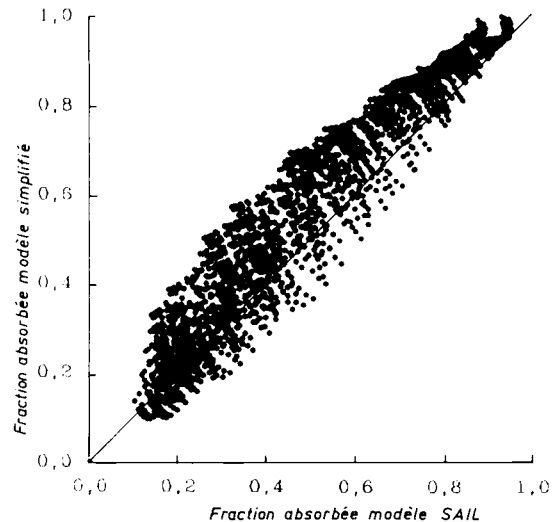


Fig. 6. Relation entre ϵ_i estimé à partir de l'équation (7) et ϵ_i estimé à partir des simulations du modèle SAIL.

MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE DE LA RELATION ENTRE ϵ_i ET DN

L'expérimentation

Le site expérimental et les cultures

L'expérimentation s'est déroulée sur le domaine expérimental d'Avignon-Montfavet ($4^\circ 51'$ long. E; $43^\circ 55'$ lat. N), situé dans la plaine alluviale de la basse vallée du Rhône. Les semis de blé (variété Fidel) ont été réalisés à 3 époques différentes : 01 octobre 1986 (Fidel 1), 28 novembre 1986 (Fidel 2) et 27 février 1987 (Fidel 3). Une deuxième variété (Arminda) de port foliaire plus dressé a été semée le 28 novembre 1986 (Arminda 2). La densité à la levée variait entre 300 et 400 plantes/m². Les rangs étaient orientés nord-sud et écartés de 0,17 m. Il faut noter que la première date de semis fut fortement atteinte au cours de la montaison par différentes maladies et parasites.

Les mesures radiométriques

L'indice de végétation DN est calculé à partir des réflectances rouge (610–680 nm) et proche infra-rouge (790–890 nm) mesurées à l'aide d'un réflectomètre CIMEL (Guyot *et al.*, 1984). Cet appareil est constitué de deux têtes de mesure : une tête de mesure de l'éclairement équipée d'objectifs diffusants (180° d'ouverture) et une tête de mesure de la luminance équipée d'objectifs de 12° d'ouverture. Le réflectomètre est fixé à 5 m de hauteur. La surface visée est d'environ 0,85 m² et un minimum de 6 répétitions sont

effectuées sur chaque traitement. L'étalonnage du réflectomètre est réalisé en visant une surface de référence de réflectance connue. Simultanément, des mesures de rayonnement global et de rayonnement diffus renseignent sur les conditions d'éclairement. Une à deux séries de mesures sont enregistrées chaque semaine au midi solaire, à partir de la levée de la première date de semis jusqu'à la récolte. Seules les mesures correspondant à des conditions où le rapport diffus/direct est inférieur à 40% (ciel dégagé) ont été retenues. Une parcelle de sol nu est intercalée entre les traitements et fournit les valeurs de DN_s .

La Figure 7 montre l'évolution de l'indice de végétation pour les différents traitements. Les valeurs de DN correspondant aux mesures de ε_i sont reportées au Tableau II ainsi que les valeurs de sol nu associées (DN_s).

Les mesures de ε_i : utilisation de photographies hémisphériques

La détermination de la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbée par un couvert est réalisée classiquement par des méthodes de bilan radiatif (Varlet-Grancher *et al.*, 1982). Ces méthodes posent différents problèmes pour des couverts en phase d'installation ayant un développement vertical faible. Nous

avons développé une méthodologie basée sur l'utilisation de photographies hémisphériques réalisées par dessus le couvert avec un film infrarouge couleur.

Les photographies hémisphériques ont été utilisées par différents auteurs (Bonhomme & Charrier, 1972; Ducrey, 1975a, 1975b) pour obtenir une information directionnelle sur la transmission du rayonnement solaire sous culture ou sous forêt. Elles nous permettent de calculer la fraction interceptée par la végétation pour chaque direction d'incidence. La distinction entre les éléments verts photosynthétiquement actifs et le sol, ou la végétation sénescente, est réalisée en combinant les images rouge et proche infrarouge extraites de la photographie, sous la forme d'un «indice de végétation» (Oliosio, 1987). Une étude particulière, également réalisée à partir du modèle SAIL, montre que dans le domaine PAR, et pour des feuilles vertes, la fraction interceptée est très peu différente de la fraction absorbée : 94% du rayonnement intercepté est effectivement absorbé par le couvert. La bonne adéquation de ces deux grandeurs est liée à la très forte absorption des feuilles vertes dans le domaine PAR (85% dans ce cas particulier).

Dans ces conditions, l'utilisation de photographies hémisphériques infrarouge couleur permet de reconstruire l'évolution diurne de l'absorption du PAR par le couvert, en convoluant la fraction absorbée dans la direction d'incidence du soleil, à la quantité d'énergie incidente correspondante. Cette méthode, contrairement à celle basée sur le bilan radiatif, ne dépend pas des conditions d'éclairement au moment de la mesure. Elle dépend seulement de l'architecture du couvert, ce qui nous permet de calculer ε_i pour différentes conditions d'éclairement. Nous avons réalisé ce calcul dans 5 cas extrêmes :

- Pour des conditions d'éclairement diffus homogène uniquement,
- Pour des conditions d'éclairement directionnel uniquement en distinguant alors 4 cas :

- Au moment du solstice d'hiver (soleil bas sur l'horizon) ($\theta_{12}=67^\circ$),
- A l'équinoxe ($\theta_{12}=44^\circ$),
- Au moment du solstice d'été (soleil relativement haut) ($\theta_{12}=20^\circ$),
- En supposant l'angle solaire θ_{12} égal à l'angle du soleil au moment de la mesure radiométrique (effectuée au midi solaire, cf. Tableau II). Ce cas correspond aux conditions réelles de nos expérimentations.

Nous avons utilisé un objectif «fish-eye» Nikkor (7,5 mm de focale), placé à environ 0,10 m au-dessus du couvert, et des films infrarouges couleurs Ektachrome 2236. Afin de prendre en

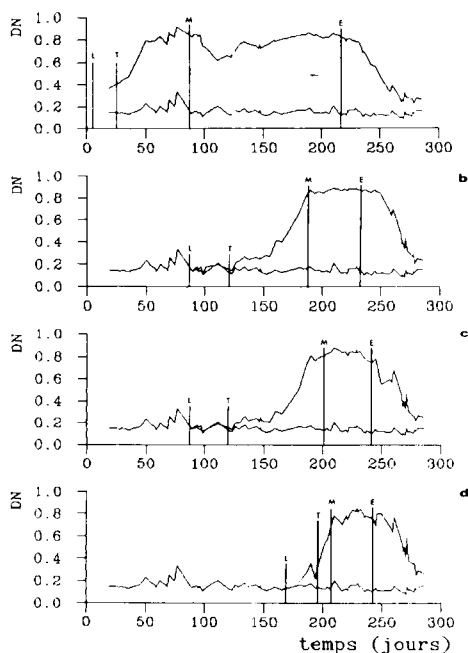


Fig. 7. Evolution de l'indice de végétation (DN) pour les 4 traitements étudiés (a : Fidel 1; b : Fidel 2; c : Arminda 2; d : Fidel 3). Le temps est exprimé en jours comptés à partir du 1 octobre 1986. Les différentes dates de stade phénologique sont indiquées (L : Levée; T : Début tallage; M : Stade épi à 1 cm; E : Epiaison). Pour chaque graphique, la courbe du haut est celle du traitement considéré et la courbe du bas correspond aux mesures du sol nu.

Tableau II. Valeurs d'indice de végétation et valeurs d' ϵ_i estimées à partir des photographies hémisphériques pour différentes conditions d'éclairage définies ci-dessus.

Traitement	Date	T° depuis le 01/10/86 (base 0°C)	Mesures radiométriques				ϵ_i , estimé par photographies hémisphériques			
			θ_s (*)	DN	DN _s	Diffus	Sols. hiver	Equinoxe	Sols. été	θ_{12}
Fidel 1	24-10-86	395	56	0,383	0,148	0,330	0,470	0,305	0,250	0,391
	12-11-86	611	61	0,581	0,152	0,688	0,782	0,677	0,643	0,755
	19-02-87	1 219	55	0,756	0,155	0,875	0,933	0,907	0,863	0,919
	04-03-87	1 319	50	0,752	0,116	0,876	0,936	0,899	0,866	0,906
	18-03-87	1 397	45	0,807	0,154	0,826	0,908	0,876	0,828	0,877
	15-04-87	1 679	34	0,837	0,142	0,894	0,927	0,913	0,894	0,905
Fidel 2	19-02-87	1 219	55	0,252	0,155	0,271	0,276	0,217	0,280	0,245
	04-03-87	1 312	50	0,272	0,116	0,395	0,438	0,347	0,340	0,410
	02-04-87	1 530	39	0,707	0,165	0,863	0,930	0,891	0,847	0,882
Arminda 2	19-02-87	1 219	55	0,222	0,155	0,213	0,211	0,164	0,141	0,187
	04-03-87	1 312	50	0,212	0,116	0,188	0,201	0,158	0,132	0,169
	18-03-87	1 403	45	0,312	0,154	0,319	0,347	0,254	0,251	0,258
	02-04-87	1 530	39	0,584	0,165	0,706	0,817	0,691	0,662	0,684
	15-04-87	1 679	34	0,777	0,142	0,901	0,934	0,920	0,903	0,913
Fidel 3	02-04-87	1 530	39	0,221	0,165	0,185	0,218	0,159	0,136	0,154
	15-04-87	1 679	34	0,285	0,142	0,318	0,392	0,275	0,258	0,268
	28-04-87	1 862	30	0,566	0,130	0,552	0,709	0,543	0,490	0,512

(*) Angle solaire zénithal au moment de la mesure radiométrique.

compte la variabilité et la structure en rang du couvert, quatre répétitions de couple de photographies sur le rang et sur l'interrang sont effectuées. Compte tenu de l'orientation nord-sud des rangs et en supposant une distribution azimutale des feuilles aléatoire, chaque photographie représente la composition de 4 quadrants identiques. Ceux-ci forment alors 32 pseudo-répétitions sur lesquelles les moyennes d'interception directionnelle sont calculées par pas de 10° en azimut et 10° en zénith. La numérisation des films photographiques est effectuée à l'aide d'une caméra CCD de résolution 500x500 équipée de filtres permettant d'extraire séparément l'image rouge et l'image infrarouge. La caméra est reliée à un micro-ordinateur par l'intermédiaire d'une carte de numérisation. Après combinaison des images numériques rouge et infrarouge, un seuillage assure la séparation entre la partie végétation verte et les autres éléments. L'indétermination sur la valeur seuil conduit à une imprécision de l'ordre de 10% pour chaque photographie.

Les dates des différentes photographies ainsi que les valeurs correspondantes de ϵ_i pour les 5 conditions d'éclairage précédemment définies sont reportées au Tableau II.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La Figure 7 montre que l'indice de végétation DN est sensible à l'état du sol. Les pics notés en début et en fin de cycle correspondent à des périodes pendant lesquelles la surface du sol est humide (valeurs de DN_s plus fortes). La valeur maximale de DN mesurée (DN=0,89 (Fig. 7)) est proche de la valeur asymptotique moyenne calculée par le modèle SAIL (DN_∞=0,90). De même, les valeurs maximales observées de ϵ_i ($\epsilon_i=0,93$ (Tableau II)) sont proches de la valeur asymptotique fournie par le modèle SAIL ($\epsilon_{i\infty}=0,94$). Ces valeurs de DN_∞ et $\epsilon_{i\infty}$ sont également en bonne concordance avec les résultats d'Asrar *et al.* (1984). Pour tester le modèle (6), nous avons fixé les paramètres DN_∞ et $\epsilon_{i\infty}$ respectivement à 0,90 et 0,94. Nous avons calé le paramètre K_{ϵ_i}/K_{DN} en utilisant les programmes d'ajustements non linéaires développés par Bouvier *et al.* (1985), basé sur la maximisation de la fonction de vraisemblance. Ce critère nous permet ainsi de comparer statistiquement des ajustements en confrontant le rapport de leur maximum de vraisemblance à une loi de χ^2 . Le Tableau III présente les résultats de différents ajustements. Dans le premier cas (a), l'ajustement est réalisé

Tableau III. Comparaison des différents modèles testés.

(*) Modèles utilisés Conditions d'éclairement	(a)		(b)		(c)	
	$\varepsilon_{i\infty}$	K_{ei}/K_{DN}	$\varepsilon_{i\infty}$	K_{ei}/K_{DN}	$\varepsilon_{i\infty}$	K_{ei}/K_{DN}
Diffus	0,94	1,599	0,94	1,654	0,94	1,00
Solstice d'hiver	0,94	2,218	0,94	1,654	0,94	1,00
Equinoxe	0,94	1,503	0,94	1,654	0,94	1,00
Solstice d'été	0,94	1,332	0,94	1,654	0,94	1,00
θ_{12}	0,94	1,619	0,94	1,654	0,94	1,00
(**) 2 lg V	241,46		(***) 213,72		(***) 168,19	

* : Les modèles testés correspondent tous à l'équation (6) pour laquelle on a posé $DN_{\infty}=0,9$ et $\varepsilon_{i\infty}=0,94$; (a) On distingue les différentes conditions d'éclairement pour ajuster K_{ei}/K_{DN} ; (b) On ne distingue pas les différentes conditions d'éclairement pour ajuster K_{ei}/K_{DN} ; (c) On fixe K_{ei}/K_{DN} à 1,00 : modèle équivalent à l'équation linéaire (7).

** : V : Vraisemblance

*** : significativement différent de (a) ($P=0,10$).

séparément pour chacune des 5 conditions d'éclairement définies pour le calcul de ε_j . Le second cas (b) correspond à un ajustement global sans distinction des conditions d'éclairement.

Le rapport K_{ei}/K_{DN} dépend des conditions d'éclairement prises en compte pour calculer ε_j , comme le montrent les valeurs obtenues pour l'ajustement (a) et la différence significative qui existe entre (a) et (b). Le modèle linéaire (c) pour lequel on fixe K_{ei}/K_{DN} à 1,00 est significativement différent des modèles plus généraux (a) ou (b). La non linéarité de la relation entre DN et ε_i est d'autant plus forte que les faibles élévations solaires prennent du poids (solstice d'hiver, diffus θ_{12}). Cela s'accorde bien avec les résultats de l'analyse théorique de la première partie (Fig. 5), mais s'oppose en première analyse aux résultats expérimentaux d'Hatfield *et al.* (1984) ou Asrar *et al.* (1984), et Daughtry (1988). En fait, ces études ont principalement été réalisées pour des latitudes faibles (θ_{12} faible) et révèlent tout de même une tendance à la non linéarité.

En revanche, nos données expérimentales ne nous permettent pas de mettre en évidence l'effet du port foliaire sur la relation entre DN et ε_j . La Figure 7 révèle des variations de port foliaire visibles à partir de l'évolution de DN. On remarque que pour le semis précoce (Fidel 1), le redressement au stade «épi 1 cm» s'accompagne d'une diminution de l'indice de végétation. De même, la comparaison des évolutions de DN des variétés Fidel et Arminda en 2^e date de semis révèle le port plus érectophile d'Arminda. Malheureusement, le faible nombre de points expérimentaux de certains traitements, ainsi que la liaison forte entre stade phénologique, indice

foliaire et port foliaire ne nous permet pas de conclure à un effet du port foliaire.

Les valeurs expérimentales du rapport K_{ei}/K_{DN} sont supérieures à celles obtenues à partir de nos simulations. L'effet rang, non pris en compte par le modèle SAIL qui suppose le couvert homogène dans le plan horizontal, explique sans doute une partie des divergences observées. De plus les ajustements réalisés à partir des simulations du modèle SAIL supposent des variations de l'indice foliaire indépendantes de la position du soleil, alors qu'en conditions expérimentales ces évolutions sont simultanées.

Le modèle non linéaire (8) semble donc le mieux adapté pour décrire la relation entre DN et ε_j :

$$\varepsilon_j = 0,94 [1 - ((0,9 - DN)/(0,9 - DN_s))^{K_{ei}/K_{DN}}] \quad (8)$$

La Figure 8 montre la bonne adéquation entre ε_j estimé par ce modèle et ε_j mesuré. L'écart type résiduel sur ε_j est inférieur à 0,06. Celui du modèle linéaire correspondant est de 0,10.

CONCLUSION

L'analyse théorique réalisée à partir de simulations du modèle SAIL montre que la relation entre ε_j et DN est sous la dépendance des conditions d'éclairement au cours de la journée (nécessaires au calcul de la fraction absorbée) ainsi que de celles présentes au moment de la mesure radiométrique. Ces paramètres sont parfaitement contrôlables ou mesurables. La relation entre ε_j et DN dépend aussi des propriétés

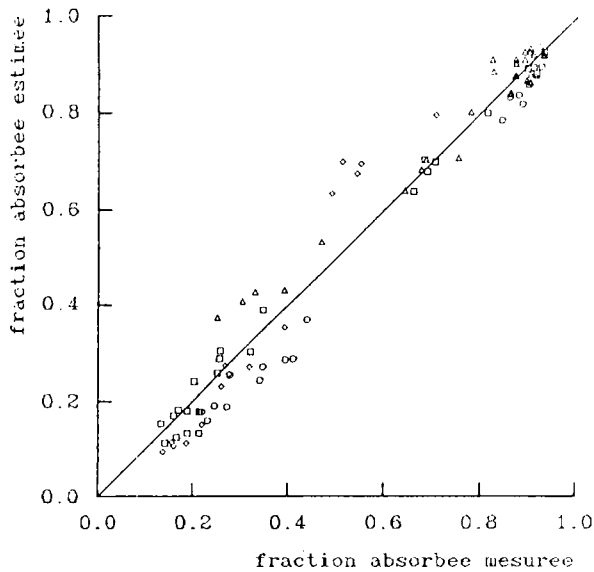


Fig. 8. Relation entre la fraction absorbée mesurée à partir de photographies hémisphériques et la fraction absorbée estimée à partir de l'indice de végétation et du modèle (8). Chaque traitement est représenté par un caractère différent : Δ : Fidel 1; \circ : Fidel 2; \square : Arminda 2; \diamond : Fidel 3. Pour chaque traitement, la fraction absorbée est mesurée dans les 5 conditions d'éclairement spécifiées au paragraphe III-A-3 et estimée à partir des paramètres $K_{\varepsilon_i} / K_{DN}$ du tableau 3 (modèle a).

optiques du sol (ou de la strate sénescence) sous-jacent qui peuvent être très variables et difficiles à appréhender. La sensibilité de l'indice de végétation aux propriétés optiques des sols induit une variabilité particulièrement importante de la relation entre ε_i et DN dans le cas de sols sombres. Le port foliaire participe aussi à la définition de la relation entre ε_i et DN.

L'utilisation de modèles simplifiés décrivant les relations entre ε_i et LAI d'une part et entre DN et LAI d'autre part a permis de formaliser la relation entre ε_i et DN en une expression analytique (équation (8)) prenant en compte explicitement l'effet du sol et ne comportant qu'un seul paramètre $K_{\varepsilon_i} / K_{DN}$. Ce paramètre décrit la non linéarité de l'équation (8) et est sous la dépendance des conditions d'éclairement et du port foliaire. Dans certaines conditions particulières, $K_{\varepsilon_i} / K_{DN}$ est égal à 1,00 et la relation (8) devient linéaire et conforme aux résultats d'autres auteurs.

L'expérimentation effectuée sur des cultures de blé révèle la justesse de l'approche théorique ainsi que ses limites. L'ajustement du modèle (8) aux données expérimentales mesurées sur des cultures de blé en phase d'installation, montre que le paramètre $K_{\varepsilon_i} / K_{DN}$ est significativement supérieur à 1,00 rendant la relation entre ε_i et DN non linéaire. Le paramètre $K_{\varepsilon_i} / K_{DN}$ dépend bien de la géométrie d'éclairement. En revanche, il ne nous a pas été possible de mettre en évidence la dépendance de ce paramètre par rapport à l'ar-

chitecture du couvert comme le suggérait l'analyse théorique.

L'ensemble de ce travail permet donc d'envisager l'utilisation de la télédétection pour estimer la biomasse produite par les cultures de blé, par le biais d'une estimation de l'énergie photosynthétiquement active absorbée par le couvert. Mais la précision de cette technique dépendra en particulier de la capacité qu'ont les indices de végétation de minimiser l'influence des propriétés optiques du sol. Il faudrait également introduire les effets liés à la réponse non linéaire de la photosynthèse à l'éclairement, et améliorer notre connaissance du déterminisme du facteur ε_b de conversion de l'énergie absorbée en biomasse.

Enfin, il conviendra de définir des stratégies d'interpolation entre les dates de mesures satellitaires. La fréquence actuelle de ces mesures (Spot, Landsat) ne permet pas, en effet, un suivi dans le temps de l'évolution de la fraction PAR absorbée compatible avec l'estimation de la biomasse produite par le couvert.

RÉFÉRENCES

- Ajai, Sashikumar M.N., Kamat D.S., Aggarwal P.K. & Sinha S.K. (1984) Spectral estimates of intercepted photosynthetically active radiation by wheat canopies. *Proc. crop growth conditions and remote sensing*. 22-23 June 1984, ISRO-IARI, 411-419
- Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T. & Hatfield J.L. (1984) Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.* 76, 300-306
- Badhwar G.D., Verhoef W. & Bunnik N.J.J. (1985) A comparative study of Suits and SAIL canopy reflectance models. *Remote Sens. Environ.* 17, 179-195
- Baret F. (1986) *Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales*. Thèse université Paris-Sud (Orsay) No 98, 1-182
- Baret F. & Major D. (1988) Significance of the normalized difference. *Workshop : Vegetation indices and their interpretation*, Nottingham 1988/05/25
- Bonhomme R. & Chartier P. (1972) The interpretation and automatic measurements of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage and gap frequency. *Israel. J. Agric. Res.* 22, 53-61
- Bouvier A., Gelis F., Huet S. Mesean A. & Neveu P. (1985) CS-NL (notice détaillée de l'utilisation du logiciel d'ajustement non linéaire CS-NL). Laboratoire de biométrie, INRA-CNRZ, Jouy-en-Josas
- Daughtry C.S.T. (1988) Estimating absorbed radiation and phytomass from multispectral reflectance of corn and soybean. *Proc. IGARS'88 ESA SP 284*, 821-824
- Ducrey M. (1975) Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire. I. Analyse théorique de l'interception. *Ann. Sci. Forest.* 32, 73-92
- Ducrey M. (1975b) Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des cou-

- verts forestiers au rayonnement solaire. II. Etude expérimentale. *Ann. Sci. Forest.* 32, 205-221
- Garcia R., Kanemasu E.T., Blad B.L., Bauer A., Hatfield J.H., Major D.J., Reginato R.J. & Hubbard K.G. (1988) Interception and use efficiency of light in winter wheat under different nitrogen regimes. *Agric. For. Meteorol.* 44, 175-186
- Goel N.S. & Strebel D.E. (1984) Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. *Agron. J.* 76, 800-802
- Goel N.S. & Deering D.W. (1985) Evaluation of a canopy reflectance model for LAI estimation through its inversion. *IEEE Trans. Geosci Remote Sens.* GE 23, 674-684
- Gosse G., Varlet-Granchet C., Bonhomme R., Chartier M., Allirand J.M. & Lemaire G. (1986) Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie* 6, 47-56
- Green C.F. (1987) Nitrogen nutrition and wheat growth in relation to absorbed solar radiation. *Agric. For Meteorol.* 41, 207-248
- Guyot G., Hanocq J.F., Buis J.P. & Saint G. (1984) Mise au point d'un radiomètre de simulation de Spot. 2^e Col. *Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*. Bordeaux. 12-16 Sept. 1983. INRA 233-242
- Hatfield J.L., Asrar G. & Kanemasu E.T. (1984) Intercepted photosynthetically active radiation in wheat canopies estimated by spectral reflectance. *Remote Sens. Environ.* 14, 65-75
- Kouassi N. (1986) *Suivi d'une culture de blé par télédétection*. Mémoires de fin d'études INRA, Montfavet, France
- Kumar M. (1988) Crop canopy spectral reflectance. *Int. J. Remote Sensing*, 9, 285-294
- Le Master E.W., Chance J.E. & Wiegand C.L. (1980) A seasonal verification of the Suits spectral reflectance model for wheat. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 46, 107-114
- Monteith J.L. (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9, 747-766
- Monteith J.L. (1981) Does light limit crop production? In : *Physiological processes limiting plant production* C.B. Johnson (ed.) Butterworths (London) : 23-38
- Olioso A. (1987) *Utilisation de photos hémisphériques pour étudier l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en biomasse par une culture de blé*. Mémoire INRA/ENSAM. INRA, Montfavet, France
- Rigal D. & Terres J.M. (1988) *Modélisation du profil spectral de cultures de maïs et de soja. Estimation de la biomasse produite*. Mémoire INRA-ESAP : INRA, Montfavet, France, 1-85
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. & Harlan J.C. (1974) *Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation*. NASA/GSFC. Type III. Final report. Greenbelt MD : 1-371
- Sellers P.J. (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sensing.* 6, 1 335-1 372
- Varlet-Granchet C., Bonhomme R., Chartier M. & Artis P. (1982) Efficacité de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta Oecol. Oecol. Plant.* 3(17) 1, 2-26
- Verhoef W. (1984) Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling : the SAIL model. *Remote Sens. Environ.* 16, 125-141
- Verhoef W. (1985) Earth observation modeling based on layer scattering matrices. *Remote Sens. Environ.* 17, 164-178