HAL
open science

Estimation de faibles indices foliaires d'une culture de luzerne par mesure de réflectances hémisphériques dans le rouge clair (660 nm) et le rouge sombre (730 nm)

J.M. Allirand, M. Chartier, Bruno Andrieu, Ghislain Gosse, C. Varlet-Grancher, D. Coulmier

To cite this version:

J.M. Allirand, M. Chartier, Bruno Andrieu, Ghislain Gosse, C. Varlet-Grancher, et al.. Estimation de faibles indices foliaires d'une culture de luzerne par mesure de réflectances hémisphériques dans le rouge clair (660 nm) et le rouge sombre (730 nm). Agronomie, 1997, 17 (2), pp.83-95. hal-02688422

HAL Id: hal-02688422

https://hal.inrae.fr/hal-02688422

Submitted on 1 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

agronomie (1997) 17, 83-95
© Elsevier/INRA

agronomie: agriculture and environment

Estimation de faibles indices foliaires d'une culture de luzerne par mesure de réflectances hémisphériques dans le rouge clair (660 nm) et le rouge sombre (730 nm)

JM Allirand [1] *, M Chartier [1], B Andrieu[1], G Gosse[1], C Varlet-Grancher [2], D Coulmier [1]

[1] *Unité de recherche en bioclimatologie, Inra, F-78850 Thiverval-Grignon ;*
[2] *Station d'écophysiologie des plantes fourragères, Inra, F-86600 Lusignan, France*

(Reçu le 15 mai 1995 ; accepté le 7 janvier 1996)

Summary — Estimating alfalfa low leaf area indices from red (660 nm) and far-red (730 nm) hemispheric reflectance measurements. The leaf area index of a crop is the main driver of dry matter production. We propose to use the differences between leaf and soil reflectance in the red and far-red wavebands, in order to estimate the leaf area index. Reflectance measurements are made with low-cost sensors measuring hemispheric fluxes around 660 and 730 nm. The reflectance normalized difference, empirically related to the leaf area index of an alfalfa canopy, allows to estimate low (< 2) leaf area indices; the relationship, however, is dependant on soil optical properties, and experimental precautions must be envisaged. The low cost of the sensors enables to propose to use them for crop permanent monitoring.

alfalfa / leaf area index / vegetation index / normalized difference / red / far-red

Résumé — L'indice foliaire détermine pour une large part la production de matière sèche d'une culture. On propose ici une méthode radiométrique d'estimation de l'indice foliaire, fondée sur les différences de réflectance des feuilles et du sol dans le rouge clair et le rouge sombre. La mesure est effectuée à partir de capteurs peu onéreux, utilisables au champ, qui mesurent des flux hémisphériques dans des bandes spectrales centrées autour de 660 et 730 nm. On établit pour une culture de luzerne une relation empirique entre la différence normalisée de ces réflectances et l'indice foliaire, qui permet d'estimer des indices foliaires dans la gamme 0–2. Les résultats expérimentaux, confirmés par une analyse de sensibilité effectuée à l'aide d'un modèle de transfert radiatif, montrent toutefois une sensibilité de la relation obtenue aux propriétés optiques du sol, qui implique certaines précautions expérimentales. Par ailleurs, la mesure de flux hémisphériques s'avère donner des résultats analogues à une visée verticale. Le faible coût des capteurs permet d'envisager de les utiliser à poste fixe pour suivre la mise en place de l'indice foliaire de cultures.

luzerne / indice foliaire / indice de végétation / différence normalisée / rouge clair / rouge sombre

* Correspondance et tirés à part.
Tél : (33) 01 30 81 55 58 ; fax : (33) 01 30 81 55 63

INTRODUCTION

Depuis les travaux de Monteith (1972), les modèles de fonctionnement du couvert sont généralement fondés sur l'analyse du rendement énergétique, et plus précisément sur l'existence d'une relation linéaire entre le rayonnement absorbé et la matière sèche produite en conditions non limitantes (Bonhomme et al, 1982 ; Jones et Kiniry, 1986 ; Cannell, 1988 ; Spitters et al, 1989). Ces modèles utilisent l'indice foliaire (*Leaf Area Index* ou LAI, pour les Anglo-Saxons), comme principale caractéristique de la structure du couvert permettant de quantifier l'absorption de l'énergie lumineuse (Varlet-Grancher, 1982). C'est en particulier le cas du modèle de production potentielle de luzerne proposé par Gosse et al (1984) et Lemaire et Allirand (1993).

Le repérage du début du processus d'absorption du rayonnement et l'évolution de son efficience tant qu'elle n'est pas maximale, sont primordiaux pour la mise en œuvre de tels modèles. C'est donc surtout en début de croissance que la connaissance de l'indice foliaire est importante, et nécessite une fréquence de mesure élevée. La mesure directe par planimétrie des feuilles implique un échantillonnage important pour atteindre la précision requise, ce qui rend cette méthode fastidieuse. La mise en application des modèles actuels de croissance bénéficierait donc largement d'une possibilité de suivi aisé de l'évolution de l'indice foliaire durant la mise en place du couvert.

L'une des solutions adoptées consiste à utiliser des relations statistiques reliant l'indice foliaire à l'évolution de la température de l'air, quantifiée en termes de somme de degrés-jour (Onstad et Fick, 1983 ; Gosse et al, 1984,...) ; la forte variabilité génétique de la vitesse de repousse après défoliation (Canal, 1993) implique un paramétrage préalable de ce type de relation. Suite aux travaux de Warren-Wilson (1959, 1963a, b), se sont développées des méthodes indirectes fondées sur la mesure de la probabilité directionnelle d'interception du rayonnement (Bonhomme et Chartier, 1972 ; Lang, 1987...) Ces techniques ont toutefois en commun d'être difficilement utilisables pour des espèces à petites feuilles, et sont relativement lourdes à mettre en œuvre. D'autres techniques ont pour fondement la mesure de la réflectance bidirectionnelle du couvert dans un ou plusieurs canaux, effectuée généralement par radiométrie aéroportée ou satellitaire : la réflectance spectrale d'un sol donné étant en première approximation une fonction linéaire croissante de la longueur d'onde, et celle d'une feuille étant caractérisée par une variation brutale entre le visible et le proche infrarouge, on peut caractériser la structure d'un couvert par une combinaison des réflectances visible et proche infrarouge (Varlet-Grancher, 1974). C'est ainsi que de nombreuses relations liant la réponse radiométrique d'un couvert à son indice foliaire (Asrar et al, 1985 ; Best et Harlan, 1985 ; Hatfield et al, 1985 ; Baret, 1986 ; Redelfs et al, 1987...), ou à l'efficience de l'absorption du rayonnement visible (Kimes et al, 1981 ; Daughtry et al, 1983 ; Asrar et al, 1984 ; Hatfield et al, 1984 ; Baret et al, 1988...) ont déjà été étudiées à partir de modèles de transferts radiatifs (Sellers, 1985). Les combinaisons les plus simples sont des rapports ou des différences de réflectance, éventuellement normées (Rouse et al, 1974) ; mais il existe aussi des indices de végétation plus complexes, quoique souvent fonctionnellement équivalents (Perry et Lautenschlager, 1984).

L'influence de la qualité de la lumière sur différents phénomènes biologiques (Holmes et Smith, 1975), a conduit à la conception de capteurs mesurant les composantes hémisphériques du rapport ζ = rouge clair (660 nm)/rouge sombre (730 nm) (Methy et al, 1987 ; Woodward, 1987). Ces auteurs ont également suggéré d'utiliser ces capteurs pour estimer l'indice foliaire d'un couvert. En effet, les bandes spectrales rouge clair et rouge sombre sont très proches des bandes « rouge » et « proche infrarouge » utilisées habituellement en télédétection.

L'objectif de ce travail est de montrer que de tels capteurs de terrain, légers, robustes, peu onéreux, et souvent disponibles dans un laboratoire d'écophysiologie, permettent d'effectuer de bonnes estimations de l'indice foliaire d'une culture. L'utilisation de mesures de réflectances hémisphériques permet d'intégrer la variabilité spatiale de la réflectance (Allirand et al, 1988), sans nécessiter d'effectuer la mesure à une hauteur conséquente au-dessus de l'ensemble sol/culture.

Une expérimentation effectuée sur luzerne (*Medicago sativa* L) a permis de mettre au point la méthode proposée, et d'en démontrer l'intérêt et les limites ; l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif dans un couvert végétal permet d'en préciser le domaine de validité.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les mesures ont été effectuées sur une parcelle de luzerne (cultivar Europe), semée en lignes espacées de 12 cm dans un sol brun lessivé sur limon, situé à

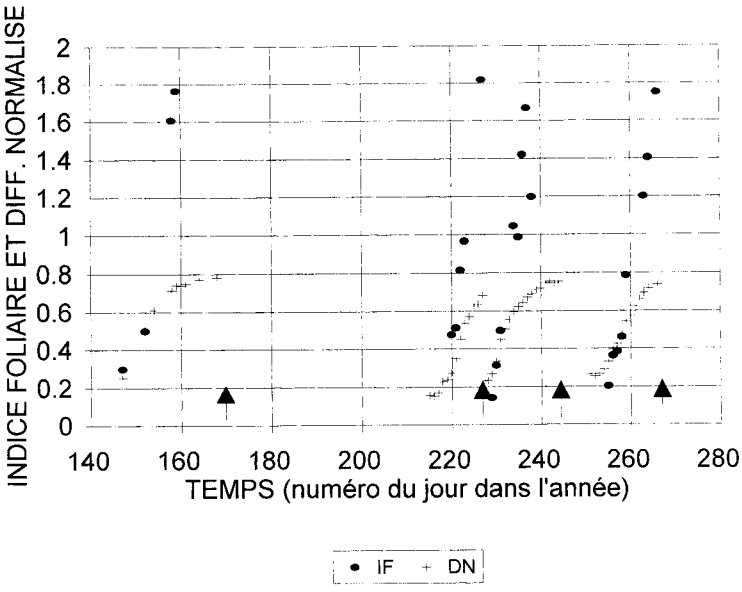

Figure 1. Évolution conjointe de l'indice foliaire mesuré (●) d'une culture de luzerne et de la différence normalisée des réflectances rouge clair et rouge sombre (+) ; pour faciliter la lecture, les valeurs d'indice foliaire supérieures à 2 ne sont pas représentées ; les flèches verticales indiquent les dates de fauche des parcelles.

Thiverval-Grignon (F-78850) (49°N, 2°W). Nous avons suivi des repousses de printemps, d'été et d'automne (fig 1), afin d'obtenir une gamme large de conditions radiatives et de caractéristiques du sol et du couvert. Ces repousses correspondaient à des sous-parcelles qui avaient des rythmes d'exploitation variés.

Expérimentation

Instrumentation et acquisition des données

Les capteurs couramment utilisés en écophysiologie pour mesurer le rayonnement photosynthétiquement actif (400–700 nm) sont des capteurs hémisphériques, dont l'élément sensible, corrigé en cosinus, est une photodiode au silicium cristallin. Le capteur « Skye red/far-red »[a] que nous avons utilisé est fondé sur le même principe ; il est doté de filtres permettant de mesurer simultanément les densités de flux de photons dans des canaux centrés autour de 660 et 730 nm, avec des bandes passantes de 24 nm. Chaque canal est monté en parallèle aux bornes d'une résistance de 1 000 Ω, ce qui fournit une tension mesurable par une centrale d'acquisition de données.

Une centrale de mesures effectuait une scrutation des flux radiatifs toutes les 10 s, et moyennait ces valeurs sur un pas de temps de 15 min. Cette intégration permet de réduire la variabilité des mesures de rayonnement instantanées lors de passages nuageux. Pour l'évaluation des indices foliaires, nous n'avons pris en compte que les mesures effectuées au voisinage du midi solaire.

Mesures de réflectances et indice de végétation

Deux capteurs fixés sur un mât situé en milieu de la parcelle ont été utilisés. L'un mesurait les composantes rouge clair et rouge sombre du rayonnement incident, et l'autre mesurait les mêmes composantes pour le rayonnement réfléchi par l'ensemble sol–culture. Le capteur était situé à 1 m au-dessus de la végétation ; dans ce cas, 95 % du signal mesuré provient d'un cercle de rayon 4,36 m (Schwerdtfeger, 1976).

Nous avons construit un indice de végétation à partir des réflectances, et non à partir de luminances de l'ensemble sol–couvert, afin de nous affranchir d'éventuelles variations des conditions radiatives incidentes. L'indice choisi est la différence normalisée (Rouse et al, 1974) :

$$DN = (Ref_{730} - Ref_{660})/(Ref_{730} + Ref_{660}) \quad [1]$$

avec Ref_{XXX} = réflectance à *xxx* nm

Caractérisation directe du couvert

Les propriétés optiques des feuilles et du sol ont été déterminées à l'aide d'un spectroradiomètre LI-COR (LI-1800), muni d'une sphère intégrante pour les mesures foliaires. Les indices foliaires ont été mesurés quotidiennement par prélèvement de 1 m linéaire de végétation et planimétrie de la totalité des feuilles (planimètre LI-COR de type LI-3100). L'erreur sur la mesure de l'indice foliaire est inférieure à 10 %.

Modélisation de la réflectance spectrale

L'étude de sensibilité a été réalisée à l'aide du modèle de transfert radiatif de Bonhomme et Varlet-Grancher (1977), qui calcule de façon analytique, pour une longueur d'onde donnée, les flux radiatifs hémisphériques aux bornes du couvert ; les variables d'entrée décrivent les caractéristiques radiatives du système (rayonnements direct et diffus sur un plan horizontal au-dessus de la culture, hauteur du soleil), la structure du couvert (indice foliaire, inclinaison moyenne des feuilles), et les propriétés optiques des feuilles et du sol. Vis-à-vis

[a] Skye Instruments Ltd, unit 5, Ddole Industrial Estate Llandrindod Wells, Powys, LD16DF, Royaume-Uni.

du calcul des flux hémisphériques, ce modèle est équivalent au modèle SAIL (Verhoef, 1984), avec toutefois deux hypothèses supplémentaires permettant de simplifier le calcul : égalité de la réflectance et de la transmittance foliaire, distribution conique d'inclinaison des feuilles.

RÉSULTATS

Relation empirique entre différence normalisée et indice foliaire

La figure 1 illustre les évolutions de la différence normalisée et de l'indice foliaire sur les quatre repousses de luzerne. On constate :

– une dynamique de la différence normalisée allant de 0,15 à 0,80 pour une variation d'indice foliaire de 0,10 à 1,8 ;

– une saturation de la différence normalisée pour des indices foliaires de l'ordre de 1,5 à 2 ;

– une bonne sensibilité de la différence normalisée lors du redémarrage de la végétation ;

– des valeurs de la différence normalisée de l'ensemble « sol nu + souches de luzerne », mesurées avant le démarrage de la culture, différentes selon la repousse ; cela suggère une influence notable de l'état de surface du sol sur ses propriétés de réflectance spectrale.

La figure 2, représentant l'indice foliaire en fonction de la différence normalisée, illustre ces différentes remarques. La saturation pour les indices foliaires élevés, est un phénomène bien connu (voir par exemple Sellers, 1985). Plusieurs auteurs (Asrar et al, 1984 ; Baret et Olioso, 1989) ont montré que la relation entre la différence normalisée et l'indice foliaire suit une loi de Beer :

$$DN = DN_{\infty} + (DN_{sol} - DN)\, e^{-K \times IF} \qquad [2]$$

avec : DN_{∞} = valeur asymptotique de DN ; DN_{sol} = valeur de DN pour le sol nu ; K = coefficient d'extinction ; IF = indice foliaire.

La valeur de DN_{sol} (0,074) a été calculée à partir de la réflectance du sol de la parcelle, dans des conditions de tassement et d'humidité correspondant à celles de l'expérimentation (voir plus loin). Les valeurs de et K ont été estimées par un ajustement non linéaire sur nos données expérimentales : DN_{∞} = 0,78, K = 1,369. Ceci nous permet de proposer la relation suivante pour estimer l'indice foliaire d'une culture de luzerne connaissant la différence normalisée :

$$IF = -0{,}73 \times LN\,((0{,}78 - DN)/0{,}71) \qquad [3]$$

L'influence de la précision de la mesure de DN sur l'estimation de l'indice foliaire IF s'obtient en différentiant [3] : d (IF)/d (DN) = – 0,73/(DN – 0,78). L'erreur sur IF sera donc 1,52 fois plus grande que l'erreur sur DN pour DN = 0,30, et 9,13 fois plus grande que l'erreur sur DN pour DN = 0,70.

On peut estimer de faibles indices foliaires d'une culture de luzerne en utilisant la relation empirique obtenue dans nos conditions expérimentales, si cette relation peut être considérée

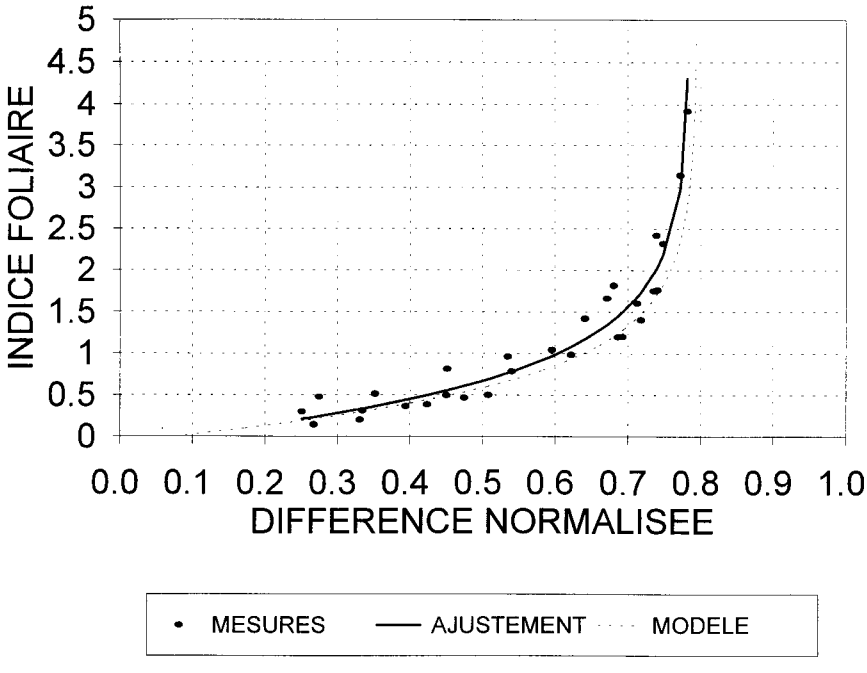

Figure 2. Évolution de l'indice foliaire en fonction de la différence normalisée des réflectances rouge clair et rouge sombre : (●) points expérimentaux, (—) ajustement des points expérimentaux, (...) simultation effectuée à l'aide d'un modèle de transfert radiatif.

comme stable. Bien qu'une approche expérimentale de cette stabilité fût possible, nous avons privilégié l'utilisation d'un modèle de pénétration du rayonnement dans le couvert (Bonhomme et Varlet-Grancher, 1977), pour effectuer une analyse de sensibilité. L'hypothèse d'homogénéité horizontale du couvert, intrinsèque au modèle, n'est de fait pas respectée dans les stades jeunes si le semis a été effectué en rangs ; elle sera considérée comme satisfaite dans les conditions expérimentales décrites, car d'une part l'écart au semis entre les rangs est faible (12 cm) et d'autre part, en situation de repousse après défoliation, les bourgeons assurant le redémarrage sont situés sur des chaumes plus ou moins obliques et longs d'environ 5 cm.

Validation et étude de sensibilité de la relation proposée

Les variables d'entrée du modèle

Pour chaque variable du modèle, on a cherché une valeur caractéristique de nos conditions expérimentales, ainsi qu'une gamme plausible de variation. Les valeurs sont regroupées sur le tableau I. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Caractéristiques radiatives

La hauteur du soleil à midi peut varier de 40 à 65° à la latitude du lieu d'expérimentation entre les équinoxes et le solstice d'été. Le rapport [diffus/(direct + diffus)], caractéristique de la diffusion atmosphérique, a été supposé être du même ordre de grandeur pour 660 et pour 730 nm, et pouvant varier entre 0,20 dans le cas d'un ciel clair et 1 dans le cas d'un ciel couvert. Nous avons retenu pour le rapport ζ une valeur de 1,1 pour la composante directe et de 1,3 pour la composante diffuse, conformément aux résultats de Bonhomme et Varlet-Grancher (1976) et Méthy et al (1987). Le rapport est plus important dans la composante diffuse en raison de la décroissance de la diffusion en fonction de la longueur d'onde.

Tableau I. Valeurs et gammes de variation des variables d'entrée du modèle de transfert radiatif utilisé pour tester la sensibilité de la relation liant la différence normalisée et l'indice foliaire d'une culture de luzerne

Caractéristiques radiatives
Diffus / (direct + diffus) : 0,5 (0,2, 1,0)
Rouge clair / rouge sombre : 1,2 (1,1, 1,3)
Hauteur du soleil : 55° (40°, 65°)
Caractéristiques du couvert
Inclinaison foliaire : 35° (25°, 45°)
Réflectance foliaire :
660 nnm : 8,3 % (7,8 %, 8,8 %)
730 nm : 40,3 % (39,8 %, 40,8 %)
Caractéristiques du sol
Réflectance :
660 nm : 15 % (5 %, 33 %)
730 nm : 17,4 %

Caractéristiques du couvert

L'inclinaison moyenne des feuilles retenue est de 35° par rapport à l'horizontale (Gosse et al, 1982). Cette valeur moyenne masque une variabilité au sein du profil d'indice foliaire, ou de l'état hydrique (Scott et Wells, 1969), que nous évaluons à plus ou moins 10°.

Dans le rouge clair, la réflectance de feuilles de luzerne diffère sensiblement selon la face considérée, et est systématiquement supérieure à la transmittance (tableau II) ; compte tenu des hypothèses du modèle, nous avons choisi d'utiliser la valeur moyenne de réflectance des deux faces (8,3 % ± 0,5). Dans le rouge sombre, il n'y a pas de différence sensible entre les deux faces, ni entre réflectance et transmittance, et la valeur moyenne est de 40,3 % ± 0,5.

Caractéristiques du sol

Les valeurs de réflectance du sol (15 % à 660 nm et 17,3 % à 730 nm) ont été mesurées par ciel clair au voisinage du midi solaire. Les propriétés optiques d'un sol dépendent à la fois de sa nature (constituants minéraux, taille des particules, teneur en matière organique...), et de ses propriétés de surface telles l'humidité superficielle et le microrelief (Bowers et Hanks, 1965 ; Varlet-Grancher, 1974). Pour déterminer des gammes de variation, nous avons pris en compte le concept de droite des sols (Richardson et Wiegand, 1977 ; Baret et al, 1993...), qui exprime la relation entre les variations de réflectance d'un sol dans deux longueurs d'onde. La pente et l'ordonnée à l'origine sont caractéristiques d'un couple de bandes spectrales.

$$\text{Refsol}_{730}(\%) = a + (b * \text{Refsol}_{660}(\%)) \quad [4]$$

avec Refsol_{xxx} = Réflectance du sol pour la bande centrée sur xxx nm, exprimée en %

Tableau II. Mesures (%) des propriétés optiques (réflectance et transmittance) dans le rouge clair (660 nm) et le rouge sombre (730 nm) des deux faces de feuilles de luzerne adultes

	Réflectance (%)				*Transmittance (%)*			
	Face supérieure		*Face inférieure*		*Face supérieure*		*Face inférieure*	
	660 nm	*730 nm*	*660 nm*	*730 nm*	*660 nm*	*730 nm*	*660 nm*	*730 nm*
Feuille 1	6,60	39,80	9,90	41,00	0,80	39,50	0,90	40,70
Feuille 2	6,90	40,30	10,50	40,20	0,40	38,90	0,50	42,40
Feuille 3	6,00	40,70	9,70	40,30	0,80	39,10	0,80	39,20
Moyenne	6,50	40,27	10,03	40,50	0,67	39,17	0,73	40,77
Écart type	0,46	0,45	0,42	0,44	0,23	0,31	0,21	1,60

La figure 3 représente :

– les mesures de réflectances rouge clair et rouge sombre de plusieurs sols des environs de Thiverval-Grignon (sols bruns lessivés sur limon) et de Châlons-sur-Marne (rendzines sur craie à poche) ;

– pour le sol de la parcelle expérimentale, les réflectances rouge clair et rouge sombre mesurées lors d'une phase de dessèchement, correspondant à une humidité pondérale du premier centimètre de sol passant de 29 à 4 %. Les paramètres des droites des sols ajustés sur ces mesures sont cohérents avec ceux proposés par Baret et Olioso (1989) pour les bandes spectrales 650 nm et 850 nm. Dans notre cas, la droite du sol se rapproche de la première bissectrice, ce qui correspond au fait que les deux bandes spectrales prises en compte sont plus proches.

ajustement 1 (sol de la parcelle expérimentale en dessèchement)

$a = 0{,}573 \pm 0{,}138$, $b = 1{,}122 \pm 0{,}014$, $R^2 = 0{,}996$

ajustement 2 (différents types de sols)

$a = 2{,}088 \pm 1{,}37$, $b = 1{,}102 \pm 0{,}052$, $R^2 = 0{,}917$

ajustement Baret et Olioso (1989)

$a = 6{,}7$ $b = 1.16$

Pour effectuer l'analyse de sensibilité, on a pris une gamme de variation de la réflectance à 660 nm de 0,05 à 0,33, les réflectances à 730 nm correspondantes étant déterminées à l'aide de la droite des sols (ajustement 2).

Validation de la relation proposée

On constate une bonne adéquation entre les points mesurés et la simulation effectuée (fig 2), compte

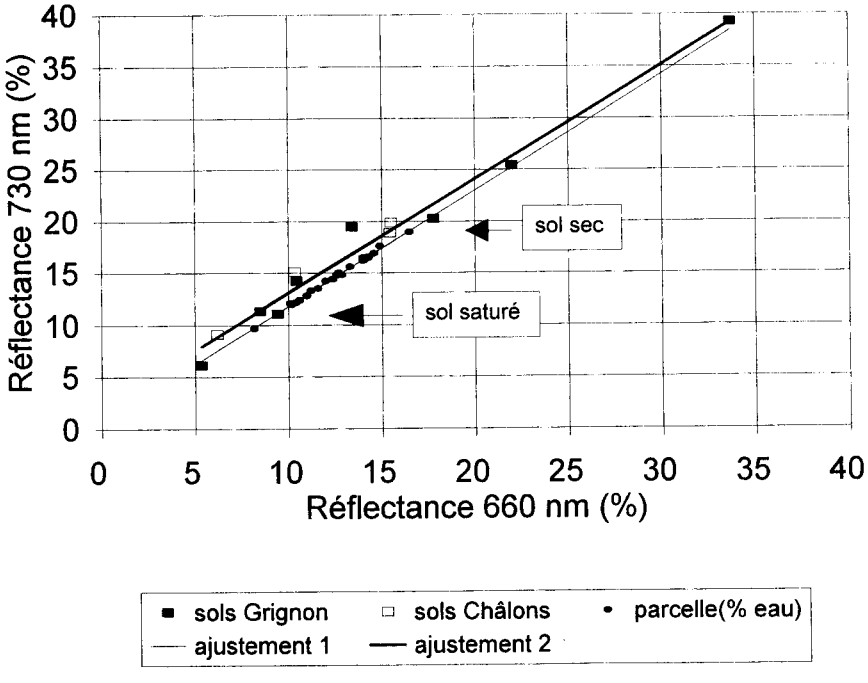

Fig 3. Représentation sous forme de droite des sols, de la réflectance de sols dans le rouge sombre en fonction de la réflectance dans le rouge clair ; (■) sols des environs de Thiverval-Grignon, (□) sols des environs de Châlons sur Marne, (●) sol de la parcelle expérimentale lors d'une phase de dessèchement (humidité superficielle passant de 29 % à 4 %), (—) ajustement des valeurs correspondant au sol de la parcelle expérimentale lors d'une phase de dessèchement, (▮) ajustement des valeurs des différents types de sols.

tenu de la précision de la mesure directe des faibles indices foliaires, et de l'estimation des variables d'entrée du modèle. On note toutefois une sous-estimation systématique par le modèle (dont la valeur maximale est 8 %), que l'on peut sans doute attribuer à l'absence de prise en compte par le modèle des éléments verticaux verts (tiges) dans la structure du couvert, ou aux hypothèses simplificatrices effectuées concernant les propriétés optiques des feuilles. Finalement, ces résultats montrent qu'il est légitime d'utiliser le modèle pour effectuer une analyse de sensibilité, dans des gammes de variation susceptibles de couvrir toutes les situations expérimentales que l'on peut rencontrer.

Étude de sensibilité

Caractéristiques radiatives

Les conditions radiatives (hauteur du soleil, rapport diffus/(direct + diffus)), n'ont pas d'influence notable sur les relations simulées entre l'indice foliaire et la différence normalisée. Ce résultat est en accord avec l'observation des cinétiques journalières du rapport $\zeta_{incident}$ et de la différence normalisée pour deux journées consécutives à conditions radiatives tranchées (fig 4) : ni le type de temps, ni la hauteur du soleil au cours d'une belle journée n'affectent de façon conséquente la différence normalisée.

Si l'on remarque que :

$$\mathrm{Ref}_{660} = (\zeta_{réfléchi} / \zeta_{incident})\ \mathrm{Ref}_{730}$$

après substitution, la relation [1] devient équivalente à :

$$\mathrm{DN} = (\zeta_{incident} - \zeta_{réfléchi}) / (\zeta_{incident} + \zeta_{réfléchi})$$

La faible sensibilité de la différence normalisée à d'éventuelles variations de $\zeta_{incident}$, suggère la possibilité de ne mesurer que les flux réfléchis par le couvert ($\zeta_{réfléchi}$). C'est ainsi qu'avec notre jeu de données expérimentales on peut constater que les valeurs de différence normalisée calculées en fixant le rapport $\zeta_{incident}$ à des valeurs comprises entre 1,1 et 1,3, sont très peu différentes des différences normalisées obtenues avec les valeurs mesurées de $\zeta_{incident}$ (fig 5). On peut donc envisager de préconiser une simplification de la mesure,

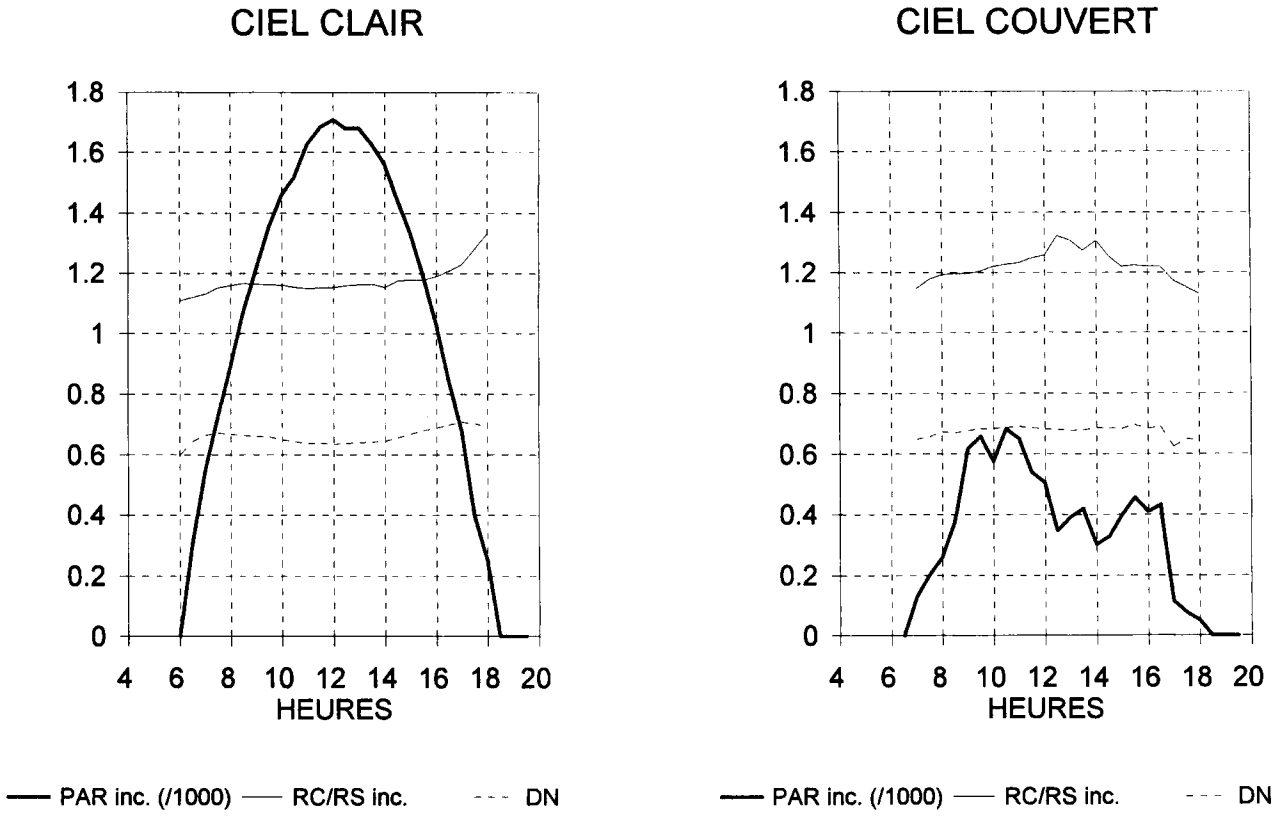

Fig 4. Cinétiques journalières pour deux journées consécutives ayant des caractéristiques radiatives tranchées (ciel clair et ciel couvert) du rayonnement photosynthétiquement actif ou PAR (▮), exprimé en µmoles de photons/m²/s (valeur divisée par 1000) ; du rapport ζ (rouge clair / rouge sombre) dans le rayonnement incident (—) ; et de la différence normalisée (---) caractéristique d'un couvert.

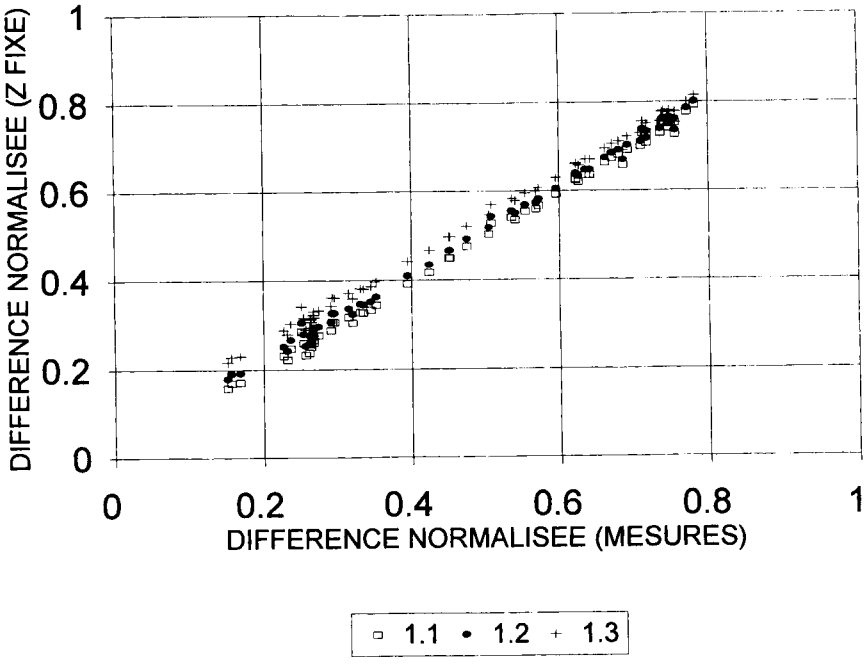

Fig 5. Représentation des différences normalisées expérimentales, calculées avec des rapports ζ fixés à des valeurs de 1,1, 1,2 et 1,3, en fonction des différences normalisées mesurées.

consistant à n'utiliser que des mesures de luminance du couvert dans les bandes considérées, en s'affranchissant des mesures d'éclairement.

Caractéristiques du couvert

L'inclinaison moyenne des feuilles, dans une gamme de variation de 20° centrée autour de la moyenne, n'a qu'une influence faible (inférieure à 10 %) sur la relation testée (fig 6).

Dans une gamme de variation correspondant aux différences observées entre faces supérieures et faces inférieures, les propriétés optiques foliaires ont, elles aussi, un poids peu important (fig 7), même dans le cas où on les fait varier de façon isolée, ce qui est rarement le cas dans la réalité. La méthode est destinée à s'appliquer à la phase d'installation de la culture, caractérisée par des feuilles jeunes, généralement vertes et turgescentes, dont les propriétés optiques devraient peu varier.

Réflectance du sol

Le passage d'une valeur de réflectance du sol dans le rouge clair de 5 à 33 %, correspondant aux deux valeurs extrêmes rencontrées dans notre échantillon de sols, conduit à des estimations d'indices foliaires respectivement de 0,3 et 0,75, pour DN = 0,5 (fig 8b). Comme l'ont montré Baret et Olioso (1989), on constate que la sensibilité de la différence normalisée aux propriétés optiques du sol est maximale pour les faibles niveaux de réflectance du sol. Cette forte amplitude de variation exclut l'utilisation de la relation [3] sur un sol quelconque sans une mesure préalable de ses propriétés optiques.

Par ailleurs, pour le sol de l'expérimentation, soumis à un dessèchement correspondant à une humidité pondérale de surface passant de 29 à 4 % (fig 3), la réflectance reste quasiment constante entre 29 et 12 % d'humidité, et augmente fortement entre 12 et 4 %. Il en résulte que la relation liant la différence normalisée à l'indice foliaire varie surtout (fig 8a) pour des modifications d'humidité dans des sols à faibles niveaux d'humidité ; l'amplitude de la variation peut atteindre 15 % pour une valeur de DN = 0,5.

Comparaison entre utilisation de réflectances hémisphériques et bi-directionnelles

L'utilisation de capteurs hémisphériques constitue une originalité, en regard de l'utilisation plus classique de capteurs directionnels visant dans un faible angle solide autour de la verticale. Nous avons étudié par simulation numérique les résultats susceptibles d'être obtenus avec ces deux types de capteurs dans les conditions de notre expérimentation. À cet effet, on a utilisé un modèle dérivé de SAIL (Verhoef,1984), décrivant les flux bidirectionnels et prenant en compte les effets du *hot-spot* ; la réflectance hémisphérique directionnelle y est calculée par intégration numérique de la réflectance bidirectionnelle. Ce modèle a été présenté par Andrieu et al (1997).

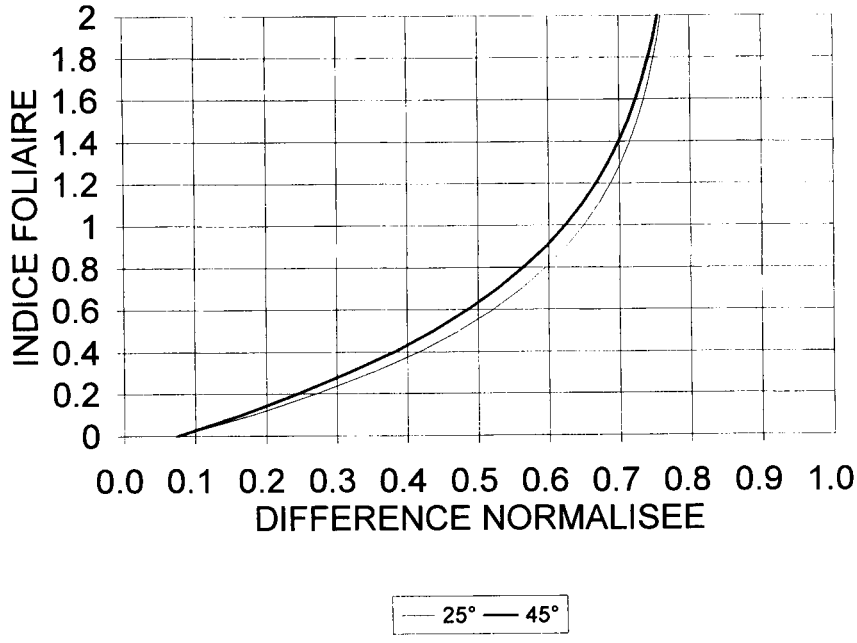

Fig 6. Simulation de la relation différence normalisée – indice foliaire pour deux valeurs extrêmes (25° et 45°) de l'inclinaison foliaire d'un couvert de luzerne, les autres variables d'entrée du modèle étant celles figurant sur le tableau I.

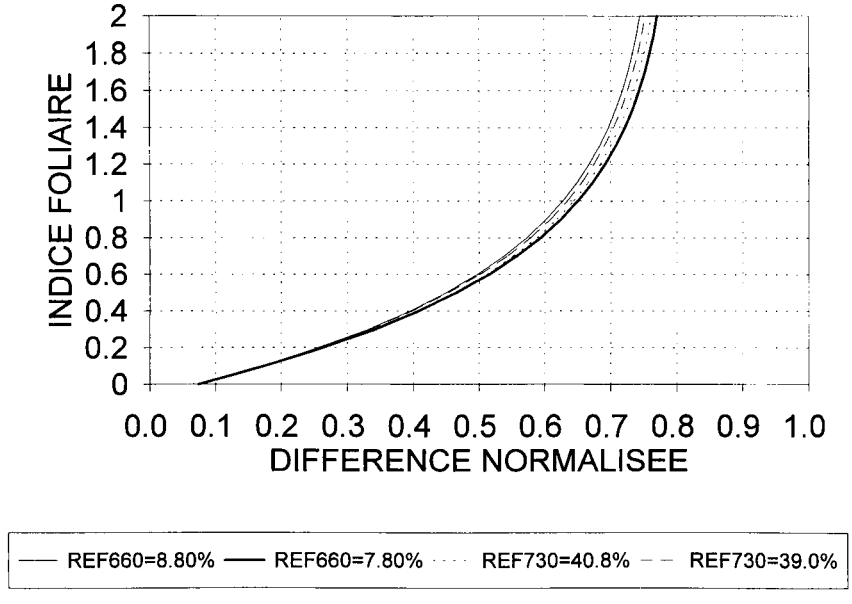

Fig 7. Simulation de la relation différence normalisée – indice foliaire pour différentes valeurs de réflectances foliaires, (réflectance foliaire à 660 nm = 8,8 % ou 7,8 %, réflectance foliaire à 730 nm = 40,8 % ou 39,8 %), les autres variables d'entrée du modèle étant celles figurant sur le tableau I.

Les comparaisons ont été effectuées avec les mêmes gammes de variables d'entrée que précédemment. La prise en compte du *hot-spot* nécessite en outre d'estimer la dimension caractéristique des feuilles ramenée à la hauteur du couvert. Nous avons estimé cette valeur égale à 0,1.

Les simulations, effectuées avec le même modèle, sont présentées (fig 9) pour des hauteurs de soleil comprises entre 30 et 90°, pour une mesure hémisphérique et pour une visée verticale. On observe que :

– pour les hauteurs de soleil entre 40° et 65°, les deux types de mesure donnent des résultats analogues et très stables. Cette gamme correspond aux valeurs constatées à midi entre les équinoxes et le solstice d'été à la latitude du lieu d'expérimentation ;

– pour des hauteurs de soleil de 30° à 90 °, la mesure hémisphérique est légèrement moins sensible à la hauteur du soleil que la mesure verticale. Les mesures simulées en visée verticale pour une hauteur de soleil de 90° sont affectées par le phénomène de *hot-spot*, mais cela reste un cas d'école sous nos latitudes.

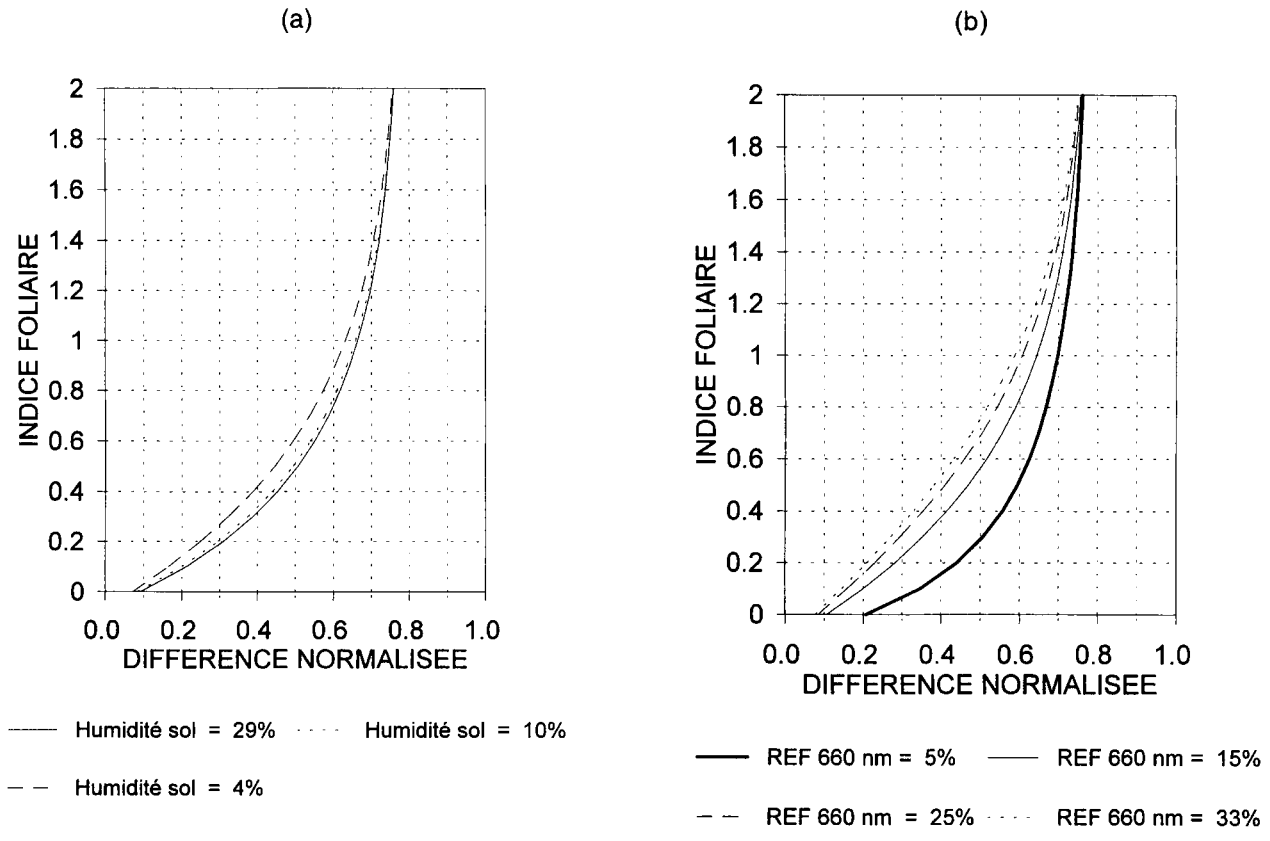

Fig 8.a. Simulation de la relation différence normalisée – indice foliaire pour des valeurs de réflectances du sol correspondant à différents niveaux d'humidité de la couche superficielle du sol (29 %, 10 %, 4 %), les autres variables d'entrée du modèle étant celles figurant sur le tableau I. **b.** Simulation de la relation différence normalisée – indice foliaire dans la gamme de variation de réflectance rouge clair (5, 15, 25 et 33 %) rencontrée dans l'échantillonnage de sols effectué. Les réflectances rouge sombre sont calculées à l'aide de la droite des sols.

DISCUSSION, CONCLUSION

L'utilisation de réflectances hémisphériques dans des canaux rouge clair et rouge sombre permet d'établir en un lieu une relation simple entre l'indice foliaire du couvert et un indice de végétation. La relation empirique établie [3] est :

– stable quelles que soient les conditions radiatives, pour peu que la mesure soit effectuée en milieu de journée afin d'obtenir des valeurs maximales des flux réfléchis ;
– très peu dépendante des caractéristiques structurales et optiques du couvert de luzerne ;
– fortement dépendante des propriétes optiques du sol.

L'utilisation de la technique en un lieu quelconque serait facilitée par l'utilisation d'un indice de végétation moins sensible aux variations des propriétés optiques du sol dues soit à sa nature, soit à son humidité de surface ou à sa rugosité. De tels indices ont déjà été proposés et testés : *Soil adjusted vegetation index* (Huete, 1988), *Transformed soil adjusted vegetation index* (Baret et Guyot, 1990), *Weighted difference vegetation index* (Clevers et Verhoef, 1993).

Les avantages de la technique proposée résident dans la nature du capteur utilisé : simplicité d'utilisation, faible coût, robustesse. En outre, la mesure hémisphérique permet d'effectuer une mesure près du sol tout en intégrant la variabilité spatiale de la réflectance. L'ensemble de ces caractéristiques rend envisageable une utilisation à poste fixe durant toute la phase de mise en place du couvert, ce qui par rapport à l'utilisation d'un radiomètre classique, minimiserait les manipulations à effectuer, tout en assurant une précision analogue. Toutefois, une éventuelle dérive dans le temps des capteurs, liée à une altération des filtres, n'a pas encore été testée.

Il serait sans doute sage de ne pas substituer totalement les estimations radiométriques de l'indice foliaire aux mesures directes (planimétrie). En revanche, l'association de quelques mesures de référence, et d'estimations radiomé-

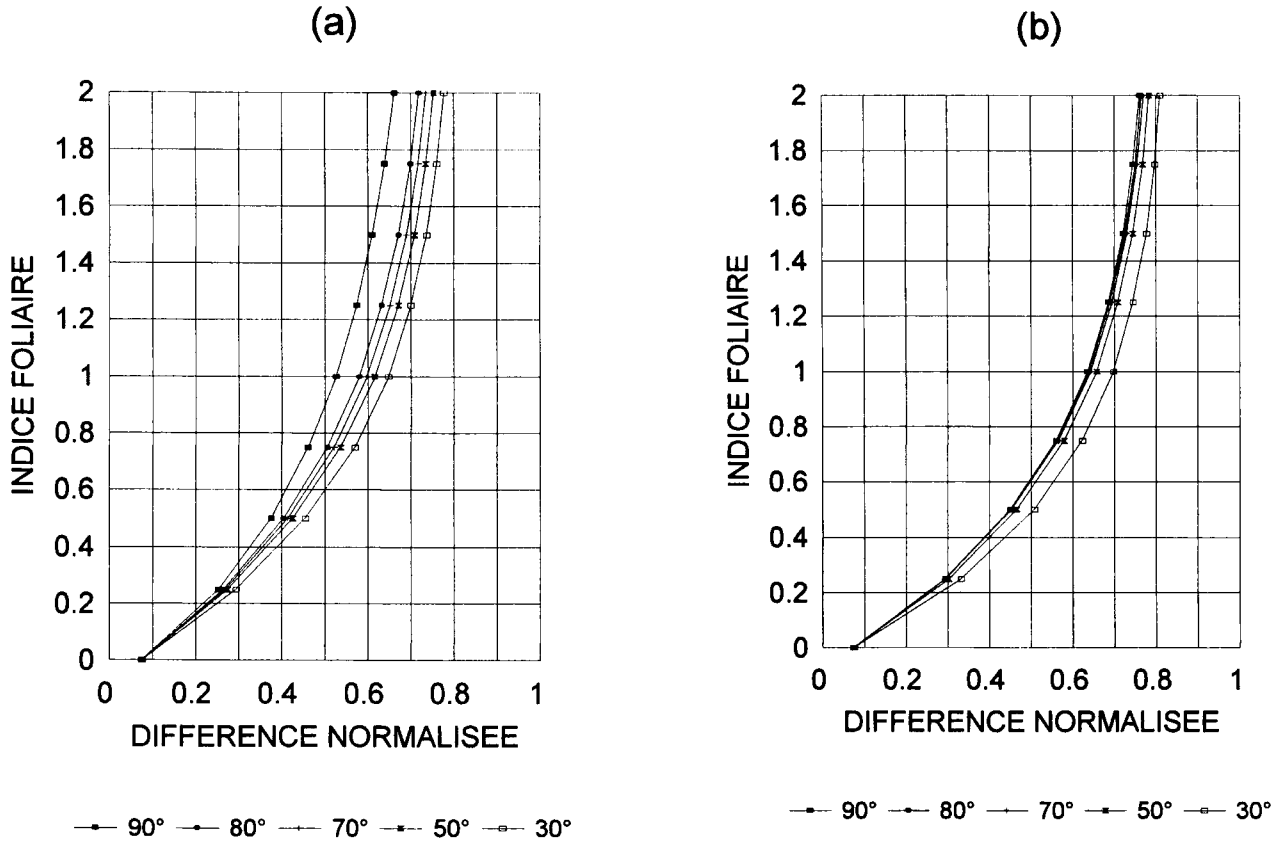

Fig 9. Simulation de la relation indice foliaire – différence normalisée, pour différentes hauteurs de soleil, avec deux types de mesures de la réflectance : **a.** visée verticale, **b.** mesure hémisphérique.

triques très fréquentes permettrait sans doute de mieux décrire des cinétiques de mise en place d'indice foliaire, en assurant un échantillonnage temporel et spatial beaucoup plus important que par des seules mesures directes.

Dans le cas des fourrages, la cinétique de réponse radiométrique du couvert doit permettre de définir avec précision la date de début de croissance, paramètre particulièrement sensible pour la qualité de l'estimation de la production par un modèle. Par ailleurs, l'utilisation de cette technique pour réaliser des comparaisons variétales au sein d'une espèce, devrait permettre de discriminer rapidement les cultivars sur les critères de date de début de végétation et/ou de vitesse initiale de mise en place de l'indice foliaire (Canal, 1993).

Enfin, la faible sensibilité aux caractéristiques du couvert de la relation liant la différence normalisée à l'indice foliaire, suggère d'étendre l'étude de la validité de la relation obtenue à d'autres couverts végétaux homogènes bien typés.

RÉFÉRENCES

Allirand JM, Chartier M, Gosse G (1988) Estimation de l'efficience de l'interception d'un couvert de luzerne à partir d'un indice de végétation. In *: Signatures spectrales d'objets en télédetection,* 4° coll. int. CNES, Inra, Esa, Asprs, CNRS, Aussois (France), 18–22 janvier 1988, 163-166

Andrieu B, Baret F, Jacquemoud S, Malthus T, Steven M (1997) Evaluation of an improved version of SAIL model to simulate bi-directional reflectance of sugar-beet canopies. *Rem Sens of Env* (sous presse)

Asrar G, Fuchs M, Kanemasu ET, Hattfield JL (1984) Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron J* 76, 300-306

Asrar G, Kanemasu ET, Yoshida M (1985) Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Rem Sens of Env* 17, 1-11

Baret F (1986) Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse univ, Paris-Sud, 182 p

Baret F, Guyot G, Terres JM, Rigal D (1988) Profil spectral et estimation de la biomasse. In : *Signatures spectrales d'objets en télédetection,* 4° coll. int. CNES, INRA, ESA, ASPRS, CNRS, Aussois (France), 18–22 janvier 1988

Baret F, Guyot G (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens Environ* 35, 161-173

Baret F, Jacquemoud S, Hanocq JF (1993) About the soil line concept in remote sensing. *Adv Space Res* 13,5

Baret F, Olioso A (1989) Estimation à partir de mesures de réflectance spectrale du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par une culture de blé. *agronomie* 9, 885-895

Best RG, Harlan JC (1985) Spectral estimation of green leaf area index of oats. *Rem Sens of Env* 17, 27-36

Bonhomme R, Chartier P (1972) The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage and gap frequency. *Isr J Agric Res* 22, 53-61

Bonhomme R, Varlet-Grancher C (1976) Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. VII. Variations du rapport des énergies rouge sombre-rouge clair. *Ann Agr* 27, 327-332

Bonhomme R, Varlet-Grancher C (1977) Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. I. Établissement des lois et vérification expérimentale. *Ann Agr* 28, 567-582

Bonhomme R, Ruget F, Derieux M, Vincourt P (1982) Relation entre production de matière sèche aérienne et énergie interceptée chez différents génotypes de maïs. *C R Acad Sci, Paris,* série III, 294, 393-398

Bowers SA, Hanks RJ (1965) Reflection of radiant energy from soils. *Soil Sci* 100, 130-138

Canal A (1993) Étude de la variabilité génétique che la luzerne *(Medcago sativa L)* pour la repousse d'été et la repousse d'automne. Thèse-Master, CIHEAM, Saragosse, Espagne, Inra station d'amélioration des plantes fourragères, F-86600 Lusignan

Cannell MG (1988) The scientific background. In : *Biomass and Forestry in Europe: a Strategy for the Future.* Elsevier Applied Sci, *83-140.*

Clevers JGPW, Verhoef W (1993) LAI estimation by means of the WDVI: a sensibility analysis with a combined PROSPECT-SAIL model. *Rem Sens of Env* 7, 43-64

Daughtry CST, Gallo KP, Mauer ME (1983) Spectral estimates of solar radiation intercepted by corn canopies *Agron J,* 75, 527-531

Gosse G, Chartier M, Varlet-Grancher C, Bonhomme R (1982) Interception du rayonnement utile à la photosynthèse chez la luzerne : variations et modélisation. *agronomie*, 2, 583-588

Gosse G, Chartier M, Lemaire G (1984) Mise au point d'un modèle de prévision de production de luzerne. *CR Acad Sci Paris,* série III, 298, 541-544

Hatfield JL, Asrar G, Kanemasu ET (1984) Intercepted photosynthetically active radiation estimed by spectral reflectance. *Rem Sens of Env* 14, 65-75

Hatfield JL, Kanemasu ET, Asrar G, Jackson RD, Pinter PJ, Reginato RJ, Idso SB (1985) Leaf area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. *Int J Rem Sens* 6, 167-175

Holmes MG, Smith H (1975) The function of phytochrome in plant growing in the natural environment. *Nature* 254, 512-514

Huete AR (1988), A soil adusted vegetation index (SAVI). *Rem Sens Env* 25, 295-309

Jones CA, Kiniry JR (1986) *Céres-Maize: a simulation model of maize growth and development.* Hardbound, Texas A & M University Press, 194 p

Kimes OS, Markham BL, Tucker CJ, Mc Murtrey JE (1981) Temporal relationships between spectral response and agronomic variables in a corn canopy. *Rem Sens Environ* 11, 401-411

Lang ARG (1987) Simplified estimation of leaf area index from transmission of the sun's beam. *Agric For Meteorol* 41, 179-186

Lemaire G, Allirand JM (1993) Relation entre croissance et qualité de la luzerne : interaction génotype-mode d'exploitation *Fourrages* 134, 183-198

Methy M (1977) Estimation quantitative de la biomasse aérienne d'un peuplement de graminées par une méthode optique non destructrice. *Oecol Plant* 12, 395-401

Methy M, Fabreguettes J, Jardon F, Roy J (1987) Design of a simple instrument for the measurement of red/far-red ratio. *Acta Oecol, Oecol Plant* 8, 3, 291-290

Monteith JL (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J Appl Ecol,* 9, 747-766

Onstad DW, Fick GW (1983) Predicting crude protein, in vitro true digestibility and leaf proportion in alfalfa herbage. *Crop Sci* 23,961-964

Perry CP Jr, Lautenschlagger LF (1984) Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Rem Sens Environ* 14, 169-182

Redelfs MS, Stone LR, Kanemasu ET, Birkham HB (1987) Greenness leaf area index relationships of seven row crops. *Agron J* 79, 254-259

Richardson AJ, Wiegand CL (1977) Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogram Eng Rem Sens* 43, 1541-1542

Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW, Harlan JC (1974) Monitoring the advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC type III, final report Green belt, MD, 371 p

Schwerdtfeger P (1976) *Physical Principles of Micrometeorological Measurements. Developments in Atmospheric Science, 6.* Elsevier, Amsterdam

Scott D, Wells JS (1969) Leaf orientation in barley, lupin, and lucerne stands. *N Z J Bot* 7, 372-388

Sellers PJ (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int J Rem Sens* 6, 1335-1372

Spitters CJT, Keulen H van, Kraalingen DWG van (1989) A simple and universal crop growth simulation : SUCROS 87. In : *Simulation and Systems Management in Crop Protection. Simulation Monograph 32* (R Rabbinge, SA Ward, HH van Laar, eds), Pudoc, Wageningen.

Varlet-Grancher C (1974) Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de maïs. V. Quantité et qualité de la lumière réfléchie *Ann Agr* 25, 797-810

Varlet-Grancher C (1982) Analyse du rendement de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. Thèse doc, univ. Paris-Sud-Orsay, *144 p*

Verhoef W (1984) Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the SAIL model. *Rem Sens Env* 6, 125-184

Warren-Wilson J (1959) Analysis of the spatial distribution of foliage by two dimensional points quadrats. *New Phytol* 58, 92-101.

Warren-Wilson J (1963 a) Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined points quadrats. *Aust J Bot* 11, 95-105

Warren-Wilson J (1963 b) Errors resulting from thickness of point quadrats. *Aust J Bot* 11, 178-188

Woodward F I (1983) Instruments for the measurement of photosynthetically active radiation and red, far red and blue light. *J Appl Ecol* 20, 103-115