

DE LA NATURE DES GLISSEMENTS SPECTRAUX: MODELISATION ET COMPARAISON A L'INFORMATION CONTENUE DANS LES BANDES LARGES

F. Baret¹, S. Jacquemoud¹, G. Guyot¹, C. Leprieur²

¹ INRA, Bioclimatologie, BP 91, 84143 Montfavet Cedex, France

² LERTS, 18 Avenue Ed. Belin, 31055 Toulouse Cedex, France

Résumé

Le modèle PROSPECT de propriétés optiques des feuilles, le Modèle SAIL de réflectance d'un couvert végétal, et le modèle 5S de simulation des effets atmosphériques ont été couplés pour analyser les glissements spectraux caractérisés par la position du point d'inflexion λ_i du bord rouge (670-780 nm). Si cet indice spectral est équivalent à la connaissance des réflectances en bandes larges rouge et proche infrarouge au niveau de la feuille, il n'en va pas de même au niveau du couvert. Il apparaît que λ_i est très sensible à l'indice foliaire et à la concentration en chlorophylle, et relativement peu dépendant des propriétés optiques des sols et des effets atmosphériques. Ce serait donc un bon indicateur de la capacité photosynthétique des végétaux. En revanche, sa faible dynamique nécessite des études complémentaires en relation avec le bruit des capteurs et les méthodes de calcul.

Mots-clefs: haute résolution spectrale, réflectance, couvert végétal, feuille, glissement spectral, modèle.

1 INTRODUCTION

Le développement récent de la technologie des systèmes spectro-imageurs nécessite une avancée parallèle de l'interprétation de l'information acquise avec une haute résolution spectrale. Différentes expérimentations conduites depuis l'échelle de la feuille jusqu'à celle du couvert vu depuis le satellite, tentent d'expliquer les déformations spectrales observées. La plupart de ces études se limitent à la transition entre le rouge (650 nm) et le proche infrarouge (800 nm) qui correspond à une variation brutale des propriétés optiques de la végétation (Ref. 21). C'est ce que nous appellerons le bord rouge ou "red edge" en anglais. Les déformations observées sont décrites le plus souvent par les dérivées premières ou secondes de la réflectance par rapport à la longueur d'onde (Refs. 14, 20) ou par les glissements spectraux de points singuliers tels que le point d'inflexion du "red edge" (Refs. 1, 4, 9, 10, 16, 18, 21, 25, 24,...).

Comme pour les indices de végétation, des rela-

tions ont été établies entre les paramètres de la feuille ou du couvert et les caractéristiques des déformations spectrales. A l'échelle de la feuille, ces déformations observées entre le rouge et le proche infrarouge sont principalement liées à la concentration en chlorophylle ou en autres pigments accessoires ainsi qu'à la structure interne du mésophylle (Refs. 4, 12, 17, 19, 21). Une augmentation de la concentration en chlorophylle provoque un glissement spectral vers les grandes longueurs d'onde ("red shift") ainsi qu'une augmentation de la valeur absolue des dérivées premières et secondes. Au niveau du couvert, les déformations spectrales ont été reliées à des états de chlorose ou de stress provoqués par des concentrations excessives en certains minéraux (Refs. 9, 10, 14, 18, 25, 26, 30), ou d'une manière plus générale à la vigueur de la végétation (Refs. 1, 6,...). Mais, de nombreux autres facteurs, tant propres au couvert (indice foliaire, orientation des feuilles, propriétés optiques du sol) qu'externes au couvert (géométries de visée et d'éclairage), perturbent les relations observées à l'échelle de la feuille (Refs. 13, 19, 33,...) et rendent l'interprétation des déformations spectrales beaucoup plus complexe. Plus récemment et à l'opposé, certains auteurs justifient l'intérêt des déformations spectrales par une moindre dépendance vis-à-vis de facteurs perturbateurs tels que les propriétés optiques des sols (Refs. 15, 20). Mais relativement peu d'études (Ref. 27) tentent de comparer d'un point de vue critique, le contenu en information de ces caractéristiques spectrales fournies par les systèmes spectro-imageurs, avec celui des bandes larges classiques des satellites actuels.

L'objectif de cet article est d'analyser la sensibilité des déformations spectrales à l'échelle de la feuille puis à celle du couvert. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux glissements spectraux caractérisés par la longueur d'onde λ_i du point d'inflexion du bord rouge. Nous tenterons d'évaluer l'intérêt de cet indice par rapport à l'utilisation de bandes larges classiques. Ces points seront abordés en nous appuyant sur les acquis de la modélisation de la réflectance spectrale des feuilles et des couverts végétaux. Enfin, nous analyserons les problèmes posés par le passage à l'échelle spatiale.

2 EQUIVALENCE ENTRE λ_i ET LES REFLECTANCES EN BANDES LARGES AU NIVEAU DE LA FEUILLE

Le modèle PROSPECT (Ref. 22) simule les propriétés spectrales des feuilles en fonction de leurs caractéristiques biophysiques. La feuille est représentée par un empilement de N couches élémentaires compactes; infinies et homogènes, d'indice de réfraction n et de coefficient d'absorption K . Sur tout le domaine spectral, on peut écrire:

$$K = k_0 + \sum_i k_i C_i \quad (1)$$

où k_0 caractérise l'absorption faible mais non nulle d'une feuille albinos (sans pigments) et sèche (sans eau). k_i est le coefficient d'absorption spécifique du constituant i , et C_i sa concentration. Nous ne considérerons explicitement que les chlorophylles a et b (caractérisées par k_{ab} et C_{ab}) et l'eau (k_e et C_e). Bien que simple, ce cas permet de bien décrire la réalité. Le modèle PROSPECT comporte donc 3 variables d'entrée principales qui ne dépendent pas de la longueur d'onde: C_{ab} , C_e et N . En revanche, les quatre paramètres caractérisent les propriétés optiques intrinsèques des matériaux constitutifs de la feuille (n , k_0 , et surtout k_{ab} et k_e) expliquent la plus grande part des variations spectrales de la réflectance et de la transmittance des feuilles. En remarquant que les domaines d'absorption des pigments chlorophylliens et de l'eau sont disjoints, il est possible de décrire chaque portion des courbes de $k_{ab}(\lambda)$ ou $k_e(\lambda)$ par une logistique généralisée:

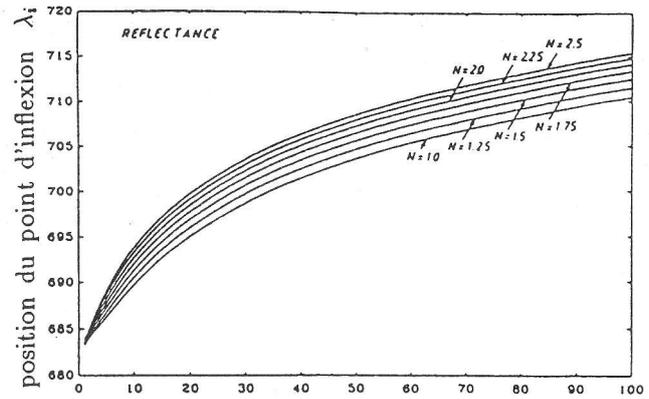
$$k(\lambda) = \alpha_1(\alpha_2 + (1 - \alpha_3 e^{-\alpha_4(\lambda - \alpha_5)})^{\alpha_6}) \quad (2)$$

Le tableau 1 donne les valeurs des coefficients α pour différents domaines spectraux.

λ	452-548	672-752	1340-1446	1800-1922
α_1	-0.0239	-0.0317	18.0795	55.2895
α_2	-1.3020	-1.0000	0.1182	0.1021
α_3	-21.4672	0.9396	-0.5505	-16.8349
α_4	0.1588	0.0982	0.0609	0.0990
α_5	672.0	491.2	1371.8	1864.1
α_6	-0.4806	2.9942	-7.7388	-0.7681
λ_i	505.9	682.5	1395.6	1889.9

Tableau 1: Valeurs des coefficients α de la logistique généralisée (Eq. 2) pour 4 domaines spectraux. λ_i correspond à la longueur d'onde du point d'inflexion (en nm) de la courbe $k(\lambda)$ (en $\text{cm}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$)

Ces expressions analytiques de $k(\lambda)$ permettent de calculer par dérivation formelle du modèle PROSPECT la position du point d'inflexion (λ_i) de la réflectance



Concentration en chlorophylle C_{ab} ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Figure 1: Sensibilité de la position du point d'inflexion λ_i à la concentration en chlorophylle (C_{ab}) et à la structure interne du mésophylle (N).

ou de la transmittance des feuilles pour différents domaines spectraux. La figure 1 montre la très forte dépendance de λ_i vis-à-vis de la concentration en chlorophylle, mais aussi une sensibilité à la structure interne du mésophylle (paramètre N) dans le domaine rouge-proche infrarouge (672-752 nm). λ_i varie de 683 nm pour de très faibles concentrations en chlorophylle, à un maximum de 715 nm pour des feuilles très vertes, épaisses et au parenchyme lacuneux ($N > 2.0$). Ces résultats sont en parfait accord avec la littérature (Refs. 4, 19, 21). Des comportements similaires sont observés dans les domaines du vert-bleu (452-548 nm) avec la concentration en chlorophylle (C_{ab}), et du moyen infrarouge (1340-1446 nm et 1800-1922 nm) en fonction de l'épaisseur équivalente en eau (C_e).

Du fait de la non superposition des domaines d'absorption de l'eau et des pigments chlorophylliens, les propriétés optiques des feuilles sont entièrement expliquées par les deux variables d'entrée C et N sur un domaine spectral limité. La connaissance de la réflectance ρ ou de la transmittance τ dans deux bandes spectrales λ_1 et λ_2 appartenant au même domaine de longueur d'onde (visible-proche infrarouge ou proche infrarouge-moyen infrarouge) permettrait théoriquement d'extraire les valeurs de C et N par inversion du modèle, puis de calculer la valeur de λ_i correspondante. Il y aurait donc une relation univoque F entre le glissement spectral λ_i et le couple de réflectance $\{\rho(\lambda_1), \rho(\lambda_2)\}$:

$$\lambda_i = F(\rho(\lambda_1), \rho(\lambda_2)) \quad (3)$$

Dans le domaine du "red edge", λ_i s'ajuste très bien (écart type résiduel = 0.73 nm) à une surface polynômiale d'ordre 4 en $\rho(672)$ et $\rho(780)$. Nous confondons ici les réflectances en bande large rouge et proche infrarouge aux réflectances en haute résolution spectrale $\rho(672)$ et $\rho(780)$. La faible variation de la

réflectance spectrale autour de ces longueurs d'onde autorise cette approximation. A l'échelle de la feuille, il y a donc équivalence entre les caractéristiques des déformations spectrales et un jeu très limité de réflectances spectrales. En particulier, quand un seul constituant absorbant est considéré, ce qui correspond à un cas très courant, deux bandes spectrales suffisent à caractériser les déformations spectrales sur un domaine de longueur d'onde donné. Passons maintenant à l'échelle du couvert végétal.

3 ANALYSE A L'ECHELLE DU COUVERT

3.1 Analyse de sensibilité

Le couplage du modèle PROSPECT (Ref. 22) au modèle SAIL de réflectance de couvert (Refs. 34, 35) permet de simuler des spectres de réflectance de couvert végétal sur tout le domaine spectral où les coefficients d'absorption spécifique $k_i(\lambda)$ et l'indice de réfraction $n(\lambda)$ sont connus. Sur le bord rouge, on définit ainsi la fonction R_1 :

$$\rho(\lambda) = R_1(n, k_0, k_{ab}, C_{ab}, N, f, \theta_o, \psi_o, \theta_s, \theta_t, \rho_s) \quad (4)$$

où f est l'indice foliaire, θ_o et ψ_o sont les angles zénithal et azimutal de visée, θ_s , l'angle zénithal de la source (90% du rayonnement incident est supposé provenir de la source ponctuelle, les 10% restant correspondent à un flux diffus isotrope), θ_t caractérise la fonction de distribution des inclinaisons foliaires (nous avons considéré ici des distributions ellipsoïdales; Refs. 8, 36), et ρ_s est la réflectance du sol. Parmi les variables de la fonction R_1 , on distinguera celles qui ont une dépendance spectrale (n , k_0 , k_{ab} et ρ_s) de celles qui sont indépendantes de la longueur d'onde. En accord avec la bibliographie (Refs. 7, 31), nous avons adopté pour ρ_s une variation linéaire avec λ . Le concept de droite du sol moyenne entre le rouge (672 nm) et le proche infrarouge (780 nm) (Refs. 3, 28), permet d'exprimer ρ_s en fonction de λ et d'un indice de brillance du sol qui pourrait être la réflectance rouge $\rho_s(672)$:

$$\rho_s(\lambda) = \rho_s(672) + \frac{\lambda - 672}{780 - 672} (0.2\rho_s(672) + 0.04) \quad (5)$$

Il est donc possible de définir une seconde fonction R_2 telle que:

$$\rho(\lambda) = R_2(\lambda, X) \quad (6)$$

où $X = (C_{ab}, N, f, \theta_o, \psi_o, \theta_s, \theta_t, \rho_s(672))$ est le vecteur des variables indépendantes de la longueur d'onde. Le formalisme (6) permet donc de calculer analytiquement la dérivée seconde $\frac{d^2\rho(\lambda)}{d\lambda^2}$ et de rechercher λ_i tel que

$\frac{d^2\rho(\lambda)}{d\lambda^2} = 0$. Les simulations sont réalisées en visée verticale ($\theta_o = 0$). L'indice foliaire f étant la variable la plus importante contrôlant le fonctionnement du couvert, nous analyserons la sensibilité des différentes variables d'entrée en interaction avec f .

Il apparaît que les glissements spectraux sont principalement déterminés par la concentration en chlorophylle et l'indice foliaire (Fig. 2). Une augmentation de la concentration en chlorophylle ou de l'indice foliaire provoque un glissement de λ_i vers les grandes longueurs d'onde. Ces résultats sont en bon accord avec ceux de Demetriades-Shah et Steven (Ref. 14) ou Rock et al. (Ref. 29). On remarquera que la gamme de variation de λ_i du couvert est relativement proche de celle observée à l'échelle de la feuille, si l'on considère l'ensemble des valeurs de concentration en chlorophylle. Par contre, pour une concentration en chlorophylle donnée, l'amplitude de variation de λ_i est relativement réduite (au maximum 20 nm). L'effet de l'architecture du couvert n'est pas négligeable comme l'avait constaté Vanderbilt et al. (Ref. 33), particulièrement dans le cas des couverts érectophiles. Une variation de la structure interne du mésophylle provoque un glissement spectral de l'ordre de 4 nm lorsque N passe de 1.0 à 2.0. Enfin, on peut constater une relative indépendance de λ_i vis-à-vis des propriétés optiques des sols. Des simulations complémentaires montrent une très faible influence des conditions d'éclairement (géométrie et rapport direct/diffus) sur λ_i .

Le glissement spectral entre le rouge et le proche infrarouge est un critère très sensible aux variables régissant le fonctionnement photosynthétique du couvert (teneur en chlorophylle, indice foliaire). A l'instar des travaux de Hall et al. (Ref. 20), il serait intéressant de relier ce critère de déformation spectrale à des variables intégratrices telles que l'efficacité de l'absorption du rayonnement photosynthétiquement actif ϵ_i , ou à la quantité de chlorophylle intégrée sur la hauteur du couvert. On peut à ce niveau établir quelles sont les conditions nécessaires pour que cet indice soit indépendant de variables perturbatrices que nous noterons Θ . Définissons la fonction g par $g = \frac{d^2\rho(\lambda)}{d\lambda^2}$. Comme la réflectance spectrale, g dépendra de la longueur d'onde mais aussi d'autres facteurs, dont le facteur perturbateur Θ . On pose $g = g(\lambda, \Theta)$. On peut alors définir une fonction implicite $\lambda_i(\Theta)$ telle que $g(\lambda_i, \Theta) = 0$. Les propriétés des fonctions implicites permettent d'écrire:

$$\frac{d\lambda_i}{d\Theta} = -\frac{\frac{dg}{d\Theta}}{\frac{dg}{d\lambda}} \quad (7)$$

On remarque donc l'équivalence entre l'indépendance du point d'inflexion λ_i vis-à-vis du facteur perturbateur Θ ($\frac{d\lambda_i}{d\Theta} = 0$) et celle de la dérivée seconde g vis-à-vis de ce même facteur ($\frac{dg}{d\Theta} = 0$).

Recherchons maintenant les conditions nécessaires sur Θ pour que λ_i n'en dépende pas. Nous supposons

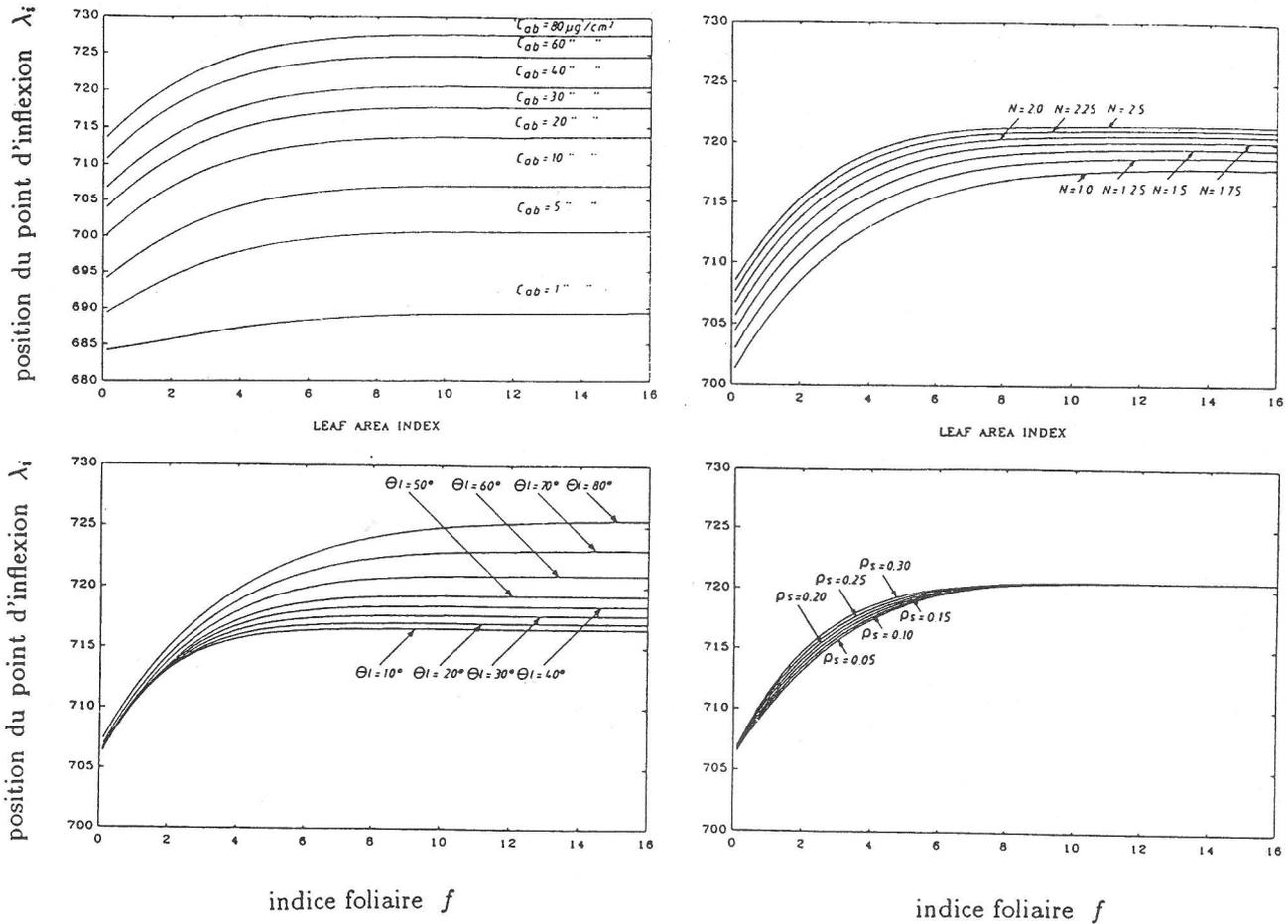


Figure 2: Sensibilité de λ_i à l'indice foliaire, à la concentration en chlorophylle (C_{ab}), à la structure interne du mésophylle (N), à la structure du couvert (θ_l) et aux propriétés optiques du sol (ρ_s (672)). Les angles sont exprimés en degrés. a: Variation avec f et C_{ab} pour $X = (C_{ab}, f, 0, 0, 40, 58, 0.15)$; b: Variation avec f et N pour $X = (40, N, f, 0, 0, 40, 58, 0.15)$; c: Variation avec f et θ_l pour $X = (40, 2, f, 0, 0, 40, \theta_l, 0.15)$; d: Variation avec f et ρ_s (672) pour $X = (40, 2, f, 0, 0, 40, 58, \rho_s(672))$.

que le facteur Θ est fonction de la longueur d'onde λ et d'un paramètre ν : $\Theta = \Theta(\lambda, \nu)$. Cela correspond, par exemple, au cas où le facteur perturbateur Θ est la réflectance du sol nu ρ_s . ρ_s dépend en effet de λ et d'un paramètre ν (Eq. 5) qui est la brillance du sol, ρ_s (672). La réflectance spectrale du couvert $\rho(\lambda)$ peut donc s'écrire: $\rho(\lambda) = \rho(\Omega(\lambda), \Theta(\lambda, \nu))$, où Ω regroupe l'ensemble des autres facteurs qui dépendent ou non de la longueur d'onde.

Le calcul de la dérivée seconde g de ρ par rapport à λ donne:

$$g = \frac{d^2\rho}{d\Theta^2} \left(\frac{d\Theta}{d\lambda}\right)^2 + \frac{d\rho}{d\Theta} \frac{d^2\Theta}{d\lambda^2} + \frac{d^2\rho}{d\Omega^2} \left(\frac{d\Omega}{d\lambda}\right)^2 + \frac{d\rho}{d\Omega} \frac{d^2\Omega}{d\lambda^2} \quad (8)$$

La dérivée de g par rapport au paramètre ν donne:

$$\frac{dg}{d\nu} = \frac{d\Theta}{d\nu} \left[\frac{d^3\rho}{d\nu^3} \left(\frac{d\Theta}{d\lambda}\right)^2 + 3 \frac{d^2\rho}{d\Theta^2} \frac{d^2\Theta}{d\lambda^2} + \frac{d\rho}{d\Theta} \frac{d\lambda}{d\Theta} \frac{d^3\Theta}{d\lambda^3} \right]$$

$$+ \frac{d\Omega}{d\nu} \left[\frac{d^3\rho}{d\nu^3} \left(\frac{d\Omega}{d\lambda}\right)^2 + 3 \frac{d^2\rho}{d\Omega^2} \frac{d^2\Omega}{d\lambda^2} + \frac{d\rho}{d\Omega} \frac{d\lambda}{d\Omega} \frac{d^3\Omega}{d\lambda^3} \right] \quad (9)$$

Par construction, Ω est indépendant du paramètre ν ($\frac{d\Omega}{d\nu} = 0$). L'équation (9) se simplifie donc et la condition d'indépendance de g par rapport à λ est équivalente à:

$$\left[\frac{d^3\rho}{d\nu^3} \left(\frac{d\Theta}{d\lambda}\right)^2 + 3 \frac{d^2\rho}{d\Theta^2} \frac{d^2\Theta}{d\lambda^2} + \frac{d\rho}{d\Theta} \frac{d\lambda}{d\Theta} \frac{d^3\Theta}{d\lambda^3} \right] = 0 \quad (10)$$

qui est vérifiée en particulier si:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\rho}{d\Theta^2} &= 0 \\ \frac{d^2\Theta}{d\lambda^2} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Les conditions (11) peuvent s'énoncer simplement sous la forme: si la réflectance du couvert est liée de manière linéaire à un facteur, et si ce facteur varie linéairement avec la longueur d'onde sur une portion du spectre, alors la dérivée seconde g , et la position du point d'inflexion λ_i , sont indépendantes de ce facteur sur cette même portion de spectre. On peut vérifier la validité de cette propriété en prenant comme exemple le cas de l'influence de la réflectance du sol: La relation entre ρ_s et la réflectance du couvert peut être considérée comme linéaire (Ref. 2), et le spectre de réflectance du sol nu est lui aussi proche de la linéarité sur un domaine spectral réduit. On observe bien une très faible sensibilité de λ_i vis-à-vis de ρ_s (Fig. 2d).

Cette partie a mis en évidence l'intérêt théorique de l'utilisation du glissement spectral, particulièrement sensible aux caractéristiques du couvert et peu dépendant de facteurs perturbateurs tels que la réflectance du sol. On remarquera la faible dynamique du signal qui peut constituer un grave handicap lors de l'utilisation de données réelles nécessairement bruitées. Mais avant de passer aux problèmes que posent l'utilisation de ce critère au niveau spatial, nous allons essayer de comparer l'intérêt de cet indice "haute résolution spectrale" avec celui des bandes larges classiques.

3.2 Relations entre λ_i et les bandes larges classiques

D'un point de vue théorique, un spectre de réflectance de couvert enregistré en dehors des problèmes atmosphériques sera déterminé par un nombre limité de paramètres. Dans un cas relativement simple, on distinguera:

- **Les caractéristiques de l'architecture du couvert.** Au minimum 2 paramètres sont nécessaires: l'indice foliaire f et l'inclinaison des feuilles θ_l .
- **Les propriétés optiques des feuilles.** Le modèle PROSPECT utilise 3 paramètres pour caractériser les spectres de réflectance et de transmittance des feuilles de 450 à 2450 nm (C_{ab} , C_e et N).
- **Les propriétés optiques du sol.** Différentes approches (Refs. 23, 27) montrent qu'un minimum de 4 à 5 paramètres sont nécessaires pour décrire les propriétés directionnelles et spectrales des sols.
- **Les géométrie d'éclairage et de visée,** qui correspondent à un minimum de 3 paramètres: θ_o , ψ_o , θ_s .

Un jeu minimum de 13 paramètres indépendants de la longueur d'onde sera donc nécessaire pour décrire le spectre de réflectance de couvert de 450 nm à 2450 nm. On doit s'attendre en conséquence à observer

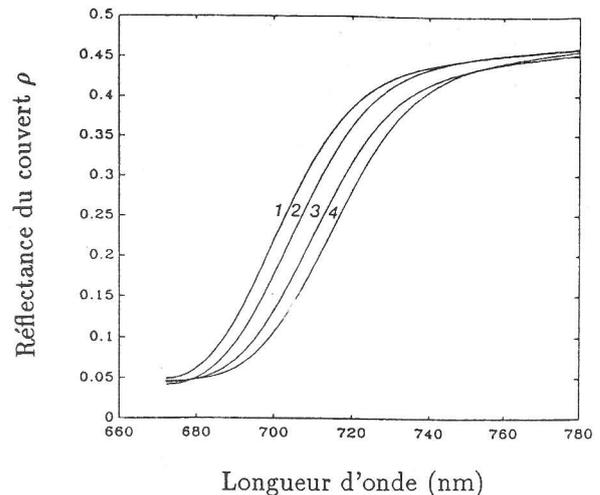


Figure 3: spectres simulés de 4 types de couvert ayant des λ_i différents pour des mêmes niveaux de réflectance rouge et infrarouge. 1: $X=(8.8, 2.43, 1.58, 54.5, 163.3, 66.6, 72, 0.22)$; 2: $X=(46.5, 2.5, 1.2, 31, 27.8, 67, 45, 0.25)$; 3: $X=(35.5, 2.27, 1.02, 48, 1.8, 69.3, 74.6, 0.18)$; 4: $X=(17.9, 1.78, 1.9, 37.6, 106.8, 60.1, 44.9, 0.20)$.

une certaine redondance de l'information spectrale. A l'égal de ce que nous avons présenté au niveau de la feuille, nous allons tester si l'information fournie par la haute résolution spectrale sous la forme du point d'inflexion λ_i , est significativement différente ou non de celle contenue dans des bandes larges classiques. Dans un premier temps, nous avons simulé sur une très large gamme de variation des paramètres d'entrée (vecteur X) les réflectances $\rho(672)$ à 672 nm, $\rho(780)$ à 780 nm et λ_i . Plutôt que de calculer toutes les combinaisons possibles des paramètres d'entrée du modèle, nous avons réalisé 8000 tirages aléatoires du vecteur X , en considérant les distributions indépendantes suivantes pour chaque paramètre: distribution uniforme pour N ($1 \leq N \leq 2.5$), θ_o ($0^\circ \leq \theta_o \leq 60^\circ$), ψ ($0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$), θ_s ($20^\circ \leq \theta_s \leq 70^\circ$), θ_l ($20^\circ \leq \theta_l \leq 80^\circ$) et $\rho_s(672)$ ($0.1 \leq \rho_s(672) \leq 0.30$). Distribution lognormale pour C_{ab} ($0.1 \leq C_{ab} \leq 80 \mu g/cm^2$) et f ($0.1 \leq f \leq 16$). Ce choix est justifié par l'analyse précédente révélant une très grande sensibilité de λ_i pour de faibles valeurs de C_{ab} ou f . La surface correspondant à l'approximation polynômiale de λ_i en fonction de $\rho(672)$ et $\rho(780)$ n'est pas aussi lisse (écart type résiduel de 5.2 nm) que celle obtenue à l'échelle de la feuille. Ce résultat, illustré par la figure 3, prouve que le critère λ_i n'est pas strictement équivalent à la connaissance des réflectances rouge et proche infrarouge. Si l'on ajoute une bande spectrale supplémentaire (en choisissant par exemple une bande nécessairement étroite centrée sur 710 nm), on améliore très sensiblement la part de variance expliquée de λ_i (écart type résiduel de 1.6 nm).

Il apparaît donc que le glissement spectral caractérisé par λ_i contient des informations différentes de celles des bandes classiques rouge et proche infrarouge.

Par contre, il est certain qu'une plus grande part de la variabilité de λ_i puisse être expliquée en utilisant un nombre relativement limité (de l'ordre de 4 à 5) de bandes spectrales situées sur le bord rouge. Mais ces bandes spectrales devront être, d'une part relativement étroites, et d'autre part correctement positionnées sur le spectre afin d'éviter les régions de forte absorption gazeuse. Ceci nous conduit naturellement à analyser les effets atmosphériques et plus généralement à étudier le passage à l'échelle spatiale.

4 PASSAGE A L'ECHELLE SPATIALE

4.1 Les effets atmosphériques

La réflectance apparente au niveau du satellite (ρ_*) peut être reliée de manière simple à la réflectance intrinsèque de la cible (ρ), dans le cas où l'environnement et la cible ont des caractéristiques spectrales voisines.

$$\rho_* = \alpha\rho + \beta \quad (12)$$

La dérivée seconde de ρ_* par rapport à la longueur d'onde s'écrit alors:

$$\frac{d^2\rho_*}{d\lambda^2} = \frac{d\alpha}{d\lambda} \frac{d\rho}{d\lambda} + \alpha \frac{d^2\rho}{d\lambda^2} + \frac{d^2\alpha}{d\lambda^2} + \frac{d^2\beta}{d\lambda^2} \quad (13)$$

Des simulations réalisées à partir du modèle 5S (Ref. 32) montrent qu'en dehors des bandes d'absorption gazeuse, α et β varient de manière quasi linéaire avec la longueur d'onde (Fig. 4). De plus, la pente de α avec la longueur d'onde est très faible. L'équation (13) peut donc être approximée par:

$$\frac{d^2\rho_*}{d\lambda^2} \approx \alpha \frac{d^2\rho}{d\lambda^2} \quad (14)$$

Cette dernière équation montre clairement que le glissement spectral au niveau du sol λ_i , est équivalent à celui observé au niveau satellitaire λ_i^* . La figure 5 illustre très bien l'intérêt de cet indice spectral par rapport à l'utilisation des indices utilisant des bandes larges tels que la différence normalisée (NDVI). Mais s'il est aisé de calculer le critère λ_i à partir de simulations ou de mesures de réflectance en haute résolution spectrale réalisées au niveau du sol, le problème est nettement plus complexe quand il faut calculer λ_i à partir de données de spectro-imageurs aéroportés ou spatiaux.

4.2 Méthodes de caractérisation de λ_i au niveau spatial

Trois contraintes majeures vont conditionner le choix d'une méthode de calcul de λ_i à partir des données fournies par les systèmes spectro-imageurs:

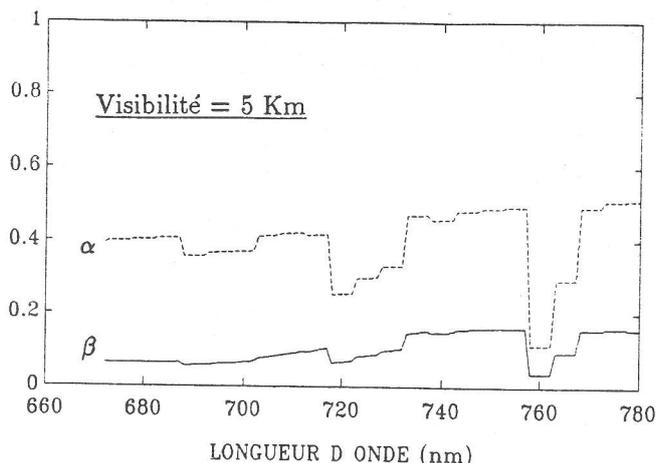


Figure 4: exemple de variation spectrale des paramètres α et β (Eq. 12) calculés à partir du modèle 5S pour une visibilité de 5 Km, une atmosphère de latitude moyenne et des aérosols de type continental.

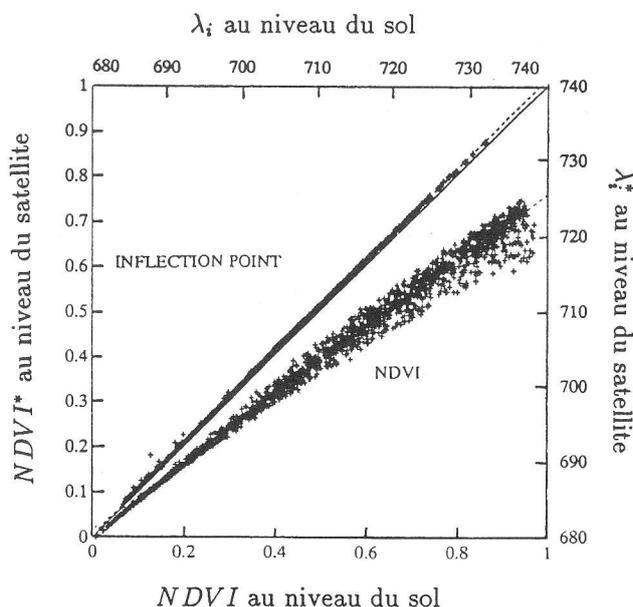


Figure 5: Relation entre les valeurs au sol et au niveau du satellite des indices λ_i et NDVI. Calculs réalisés à partir des spectres simulés au niveau du sol par le tirage aléatoire précédent de vecteurs X des paramètres d'entrée, pour une visée verticale, un angle zénithal solaire de 40° et un rapport entre le rayonnement incident diffus et le rayonnement global de 0.4 correspondant aux conditions atmosphériques données. Le passage au niveau satellitaire est simulé avec le modèle 5S en reprenant les mêmes conditions que celles de la figure 4.

- L'absorption gazeuse qui oblige à ne retenir, en absence de corrections préalables, que des portions limitées du "red edge" (670-687 nm; 705-715 nm; 732-737 nm; 743-756 nm; 772-780nm),
- Le nombre de bandes spectrales disponibles et la rapidité de l'algorithme de calcul,
- Le bruit associé au capteur lui même (en longueur d'onde et en luminance) dont la minimisation oblige à multiplier le nombre de bandes spectrales.

On peut distinguer 3 grands types de méthodes:

Lissage et dérivation numérique sont principalement utilisées à l'heure actuelle au niveau de la feuille ou de mesures terrestres, quand on dispose d'un grand nombre de bandes spectrales très étroites non perturbées (ou corrigées) par l'absorption gazeuse (Refs. 12, 14, 16, 26). Bien que performantes du point de vue de la précision, ces méthodes se heurtent aux deux premières contraintes.

L'ajustement des valeurs de réflectance spectrale à un modèle, le plus souvent empirique, permet de lisser le bruit et de calculer analytiquement λ_i . Collins et al. (Ref. 10) utilisent la décomposition de Cheybshev. Mais Gauthier et Neville (Ref. 18) font remarquer que cette procédure nécessite encore un trop grand nombre de bandes spectrales pour pouvoir être réellement utilisable à l'échelle spatiale. Chang et Collins (Ref. 9), Miller et al. (Ref. 25), Belanger (Ref. 4) ont utilisé un modèle gaussien inverse pour ajuster le bord rouge. Il comporte 3 paramètres et donc un minimum de 3 bandes spectrales pour pouvoir être inversé. Mais cette procédure est coûteuse en temps de calcul (Ref. 5) et pas forcément réaliste si on la compare, sur des données simulées, au λ_i réel (Fig. 6).

Le modèle linéaire. Du fait de la quasi linéarité du spectre à proximité de λ_i , Gauthier et Neville (Ref. 18) caractérisent les glissements spectraux par le point d'interception de cette ligne droite avec l'abscisse. Baret et al. (Ref. 1) et Leprieur (Ref. 24), s'appuyant aussi sur la quasi linéarité du spectre autour de λ_i , caractérisent le glissement spectral par la longueur d'onde du point ayant une valeur de réflectance égale à la moyenne entre celle du rouge et du proche infrarouge. Mais là encore, cette simplification extrême entraîne des erreurs importantes (Fig. 7).

Face à ces différentes possibilités, nous proposons une alternative permettant d'obtenir une bonne estimation de λ_i à partir d'un nombre relativement limité de bandes spectrales. En se basant sur ce qui a été présenté au chapitre 3.2, on calcule λ_i par une approximation polynomiale multiple des réflectances spectrales (Fig. 8). Cette méthode présente l'avantage d'être très facile à mettre en oeuvre et de nécessiter

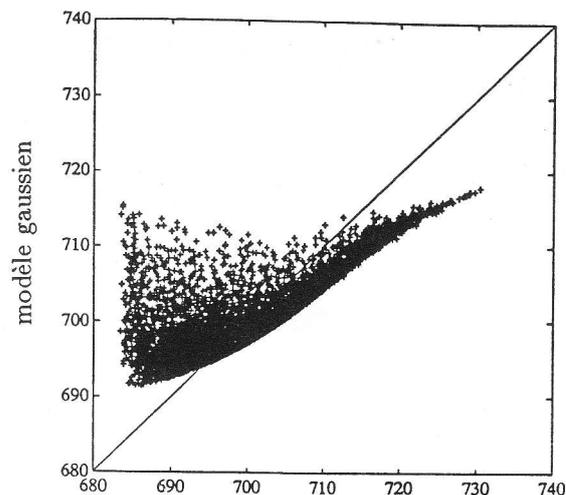


Figure 6: Relations entre λ_i estimé par inversion du modèle gaussien et λ_i calculé de façon analytique. Résultat de simulations de spectres de couvert au niveau du sol, les variables d'entrée étant tirées aléatoirement comme décrit au chapitre 3.2.

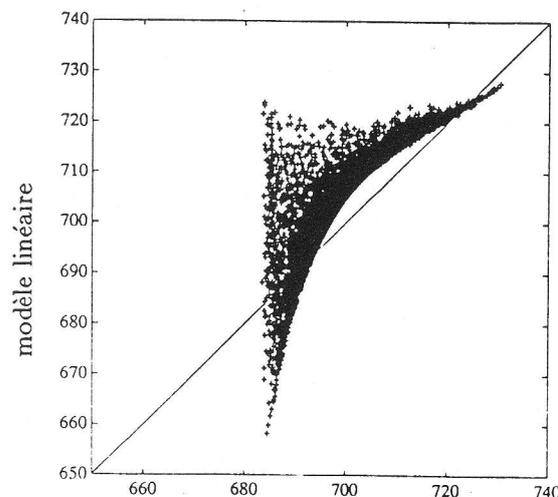


Figure 7: idem figure 6, mais λ_i estimé par le modèle linéaire

de faibles temps de calcul. Elle est ici testée sur des simulations de modèles, mais pourrait parfaitement être calée sur des jeux de spectres haute résolution acquis au niveau du sol ou au niveau spatial, pour lesquels λ_i serait mesuré par lissage et dérivation, puis mis en relation avec un jeu optimal de bandes spectrales.

5 CONCLUSION

Cette étude montre la puissance de l'outil modélisation. Les simulations de spectres de réflectance d'une feuille, d'un couvert végétal et de la réflectance apparente au niveau du satellite nous ont permis d'analyser le déterminisme des glissements spectraux entre le rouge et le proche infrarouge. Au niveau de la feuille, il y a équivalence entre les réflectances spectrales larges et la position du point d'inflexion λ_i du bord rouge.

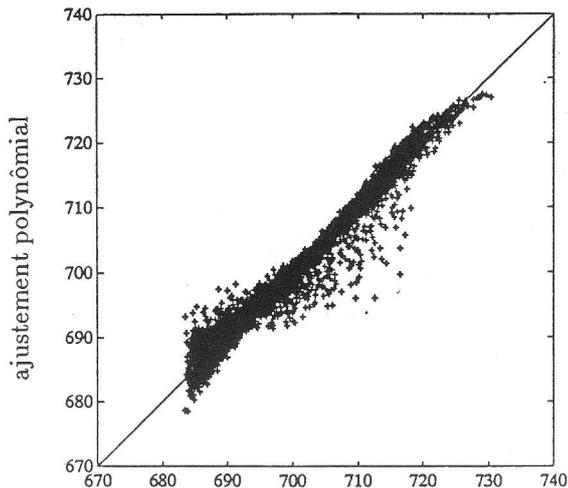


Figure 8: idem figure 6, mais λ_i estimé par ajustement polynômial des réflectances $\rho(672)$, $\rho(710)$ et $\rho(780)$.

En revanche, au niveau du couvert, λ_i apporte des informations différentes de celles des bandes large rouge et proche infrarouge. λ_i est particulièrement sensible aux caractéristiques du couvert (indice foliaire, concentration en chlorophylle) et très peu dépendant de facteurs perturbateurs comme la réflectance du sol. Cet indice spectral n'est pas affecté par la traversée de l'atmosphère. Ces diverses qualités en font un bon indicateur potentiel de la capacité photosynthétique des couverts.

Mais ces résultats demandent à être confirmés par des mesures à l'échelle rapprochée et spatiale pour ne pas se trouver strictement limités aux hypothèses sous-jacentes aux modèles. La faible dynamique de λ_i pose le problème du bruit associé aux capteurs et du choix de la méthode de calcul. Nous avons proposé une nouvelle méthode de détermination directe de λ_i . Elle aussi devra être confortée par l'expérimentation. Le développement de campagnes aéroportées offre de réelles opportunités pour résoudre ces problèmes avant que des systèmes spectro-imageurs ne soient mis sur orbite de manière opérationnelle.

Remerciements: Ce travail a été financé en partie par le CNES, le CNRS, l'INRA et l'IFREMER dans le cadre d'une "ATP Télédétection Spatiale 1990". Nous remercions Xing Fa GU (INRA Bioclimatologie, Montfavet) pour ses conseils avisés.

6 références

1 Baret F, Champion I, Guyot G et Podaire A 1987, Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer, *Remote Sens. of Environ.*, 22:367-378.

2 Baret F 1988, Un modèle simplifié de réflectance et d'absorbance d'un couvert végétal, in *Proc. 4^{ème} Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétec-*

tion, Aussois (France), 18-22 janvier 1988, ESA-SP 287:113-120.

3 Baret F et Guyot G 1990, Potentials and limits of vegetation indices, *Remote Sens. Environ.*, sous presse.

4 Belanger M J 1990, *A seasonal Perspective of several leaf developmental characteristics as related to the red edge of plant leaf reflectance*, Phd. thesis, York University, Ontario (Canada), 110 pp.

5 Boham-Carter G F 1988, Numerical procedures and computer program for fitting an inverted gaussian model to vegetation reflectance data, *Computers and Geosciences*, 14(3):339-356.

6 Boochs F, Kupfer G, Dokter K et Kühbauch W 1990, Shape of the red edge as vitality indicator for plants, *Int. J. Remote Sens.*, 11(10):1741-1753.

7 Bowers S A et Hanks R J 1965, Reflection of radiant energy from soils, *Soil Sci.*, 100:130-138.

8 Campbell G S 1986, Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using ellipsoidal inclination angle distribution, *Agric. Forest Meteorol.*, 36:317-321.

9 Chang S H et Collins W 1983, Confirmation of the airborne biogeophysical mineral exploration technique using laboratory methods, *Econ. Geol.*, 78:723-736.

10 Collins W, Chang S H, Raines G, Canney F et Ashley R 1983, Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits, *Econ. Geol.*, 78:737-749.

11 Conels J E, Adams S, Alley R E, Hoover G et Schultz S 1988, AIS radiometry and the problem of contamination from mixed spectral orders, *Remote Sens. Environ.*, 24:179-200.

12 Curran P J, Dungan J L, Macler B A et Plummer S E 1990, The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration, soumis pour publication à *Remote Sens. Environ.*

13 Curran P J, Dungan J L et Gholz H L 1991, Exploring the relationship between reflectance red-edge and chlorophyll content in slash pine, *Tree physiology*, sous presse.

14 Demetriades-Shah T H et Steven M D 1988, High spectral resolution indices for monitoring crop growth and chlorosis, in *Proc. of the 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Aussois (France), 18-22 January 1988, ESA SP-287:299-302.

- 15 Demetriades-Shah T H, Steven M D et Clark J A 1990, High resolution derivative spectra in remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, 33:55-64.
- 16 Ferns D C, Zara S J et Barber J 1984, Application of high resolution spectroradiometry to vegetation, *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 50(12):1725-1735.
- 17 Gates D M, Keegan H J, Schleter J C et Weidner V R 1965, Spectral properties of plants, *Appl. Opt.*, 4(1):11-20.
- 18 Gauthier R P et Neville R A 1985, Narrow-band multispectral imagery of the vegetation red reflectance edge for use in geobotanical remote sensing, in *Proc. 3rd Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Les Arcs (France), 16-20 December 1985, ESA SP-247:233-236.
- 19 Guyot G, Baret F et Jacquemoud S 1990, Imaging spectroscopy for vegetation studies, in *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications*, (F. Toselli and J. Bodechtel, Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- 20 Hall F G, Huemmrich K F et Goward S N 1990, Use of narrow-band spectra to estimate the fraction of absorbed photosynthetically active radiation, *Remote Sens. Environ.*, 33:47-54.
- 21 Horler D N H, Dockray M et Barber J 1983, The red edge of plant leaf reflectance, *Int. J. Remote Sensing*, 4(2):273-288.
- 22 Jacquemoud S et Baret F 1990, PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra, *Remote Sens. Environ.*, sous presse.
- 23 Jacquemoud S, Baret F et Hanocq J F 1991, Validation d'un modèle de réflectance spectrale et directionnelle de sol, in *5^{ième} Coll. Int. Signatures d'objets en télédétection*, Courchevel (France), 14-18 Janvier 1991.
- 24 Leprieur C E 1989, Preliminary evaluation of AVIRIS airborne measurements for vegetation, in *Proc. 9th EARSeL Symp.*, Espoo (Finland), 27 June-1 July 1989, 524-530.
- 25 Miller J R, Hare E W, Neville R A, Gauthier R P, Mc Coll D et Till S M 1985, Correlation of metal concentration with anomalies in narrow band multispectral imagery of the vegetation red reflectance edge, in *Proc. 4th Int. Symp. on Remote Sensing of Environ.*, Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology, San Fransisco (California), April 1-4 1985, 143-153.
- 26 Milton N M et Mouat D A 1989, Remote sensing of vegetation responses to natural and cultural environmental conditions, *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 55(8):1167-1173.
- 27 Price J C 1990, On the information content of soil reflectance spectra, *Remote Sens. Environ.*, 33:113-121.
- 28 Richardson A J et Wiegand C L 1977, Distinguishing vegetation from soil-background information, *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 43:1541-1542.
- 29 Rock B N, Hoshizaki T et Miller J R 1988, Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline, *Remote Sens. Environ.*, 24:109-127.
- 30 Rock B N, Miller J R, Moss D M, Freemanle J R et Boyer M J 1990, Spectral characterization of forest damage occurring on Whiteface Mountain, NY - studies with the Fluorescence Line Imager (FLI) and ground-based spectrometers, in *SPIE 1990 Technical Symposium on Optical Engineering and Photonic in Aerospace Sensing*, Orlando (Florida), April 16-20 1990.
- 31 Stoner E R et Baumgardner M F 1985, Characteristic variations in reflectance of surface soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:1161-1165.
- 32 Tanré D, Deroo C, Dahaut P, Herman M, Mocrette J J, Perbos J et Deschamps P Y 1990, Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code, *Int. J. Remote Sensing*, 11(4):659-668.
- 33 Vanderbilt V C, Ustin S L et Clark J 1988, Canopy geometry changes due to wind cause red edge spectral shift, in *Proc. of IGARSS'88 Symp.*, Edinburgh (Scotland), 13-16 Sept., ESA SP-284:835.
- 34 Verhoef W 1984, Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model, *Remote Sens. Environ.*, 16:125-141.
- 35 Verhoef W 1985, Earth Observation modeling based on layer scattering matrices, *Remote Sens. Environ.*, 17:165-178.
- 36 Wang Y P et Jarvis P G 1988, Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution, *Agric. Forest Meteor.*, 43:319-321.